

## Скиновый электрический взрыв двуслойных проводников с напыленным низкопроводящим слоем

© И.М. Дацко, Н.А. Лабецкая, С.А. Чайковский, В.В. Шугуров

Институт сильноточной электроники СО РАН,  
634055 Томск, Россия  
e-mail: datsko@ovpe.hcei.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 17 марта 2015 г. В окончательной редакции 10 ноября 2015 г.)

На сильноточном генераторе МИГ (при амплитуде тока до 2.5 МА и времени его нарастания 100 ns) были проведены эксперименты по взрыву цилиндрических проводников, цель которых состояла в сравнении процесса плазмообразования при скиновом взрыве однородных и двуслойных проводников с внешним слоем меньшей проводимости. Нагрузкой генератора служили цилиндрические медные проводники диаметром 3 mm, на прикатодную часть которых методом вакуумного напыления наносился слой титана толщиной 20, 50 и 80  $\mu\text{m}$ . Использование такого типа нагрузки позволило в идентичных условиях сравнить поведение однородного и двуслойного проводников. Показано, что за счет двуслойной структуры проводника с внешним слоем меньшей проводимости толщиной 20–80  $\mu\text{m}$ , полученным способом вакуумного напыления, возможно достижение более высоких значений индукции магнитного поля на его поверхности до начала процесса образования и разлета плазмы по сравнению с однородным проводником.

### Введение

Интерес к электрическому взрыву проводников (ЭВП) подогревается различными приложениями, такими как генерация сверхсильных магнитных полей, сжатие тяжелых металлических лайнеров, транспортировка энергии в вакуумных передающих линиях и др. В экспериментах реализуются несколько режимов ЭВП, отличающихся временем ввода энергии в нагрузку и характерными временами диффузии магнитного поля в проводнике, развития неустойчивостей и так далее [1–3]. По характеру протекания тока в проводнике может реализоваться три режима: режим равномерного распределения тока в нагрузке, режим скинирования и переходный режим. Если время ввода энергии в проводник меньше или сравнимо со временем диффузии магнитного поля в нем, протекание тока и соответственно джоулево тепловыделение происходят в поверхностном слое вещества размером порядка толщины скин-слоя, поэтому режим скинирования тока часто называют поверхностным или „сверхбыстрым“ [2,3]. Основными процессами, которыми характеризуется ЭВП в скиновом режиме, являются распространение в веществе проводника ударной волны (УВ) и волны нелинейной диффузии (ВНД) магнитного поля, а также образование на поверхности проводника низкотемпературной плазмы и развитие перегревных неустойчивостей [4–8].

Плазмообразование на поверхности проводника вследствие скинового взрыва, который происходит при достижении плотности тепловой энергии значения плотности энергии сублимации вещества, является одним из ограничений на максимальную индукцию магнитного поля на поверхности электродов вакуумной передающей линии сильноточных импульсных генераторов, так как происходит перекрытие зазора расширяющейся плазмой и ухудшение эффективности

транспортировки энергии. Например, для эффективной передачи энергии в Z-пинч необходимо обеспечить отсутствие перекрытия зазора плазмой в течении времени нарастания импульса тока, так как максимум энерговыклада в такую нагрузку достигается примерно на максимуме тока. Этого можно достичь снижением скорости разлета плазмы, используя материал электрода с большей массой ионов [9,10], или увеличением времени генерации плазмы на поверхности электрода за счет, например, двуслойной структуры проводника. Так, известны аналитические решения уравнений линейной диффузии магнитного поля [11–13], показывающие, что при увеличении проводимости вглубь проводника можно снизить плотность джоулево тепловыделения на поверхности в 2–4 раза по сравнению с однородным проводником при той же величине индукции магнитного поля. В случае нелинейной диффузии магнитного поля, проявляющейся в магнитных полях выше так называемого характеристического поля [13], которое для наиболее распространенных металлов составляет 30–50 Т, аналитические решения отсутствуют. Численные решения, полученные при выборе некоторой зависимости проводимости металла от температуры [14], показывают возможность снижения коэффициента поверхностной энергии  $(\epsilon_w/\epsilon_m)_{sur}$  на поверхности двуслойного проводника по сравнению с однородным (коэффициент поверхностной энергии определяется как отношение объемной плотности энергии джоулево тепловыделения к плотности энергии магнитного поля на поверхности проводника). В этой же работе [14] приводятся результаты экспериментов по взрыву цилиндрических проводников с внешним диаметром 3 mm на сильноточном генераторе МИГ при максимальном токе 2.5 МА и времени его нарастания 100 ns с целью сравнения скинового взрыва однородных и двуслойных проводников с внешним

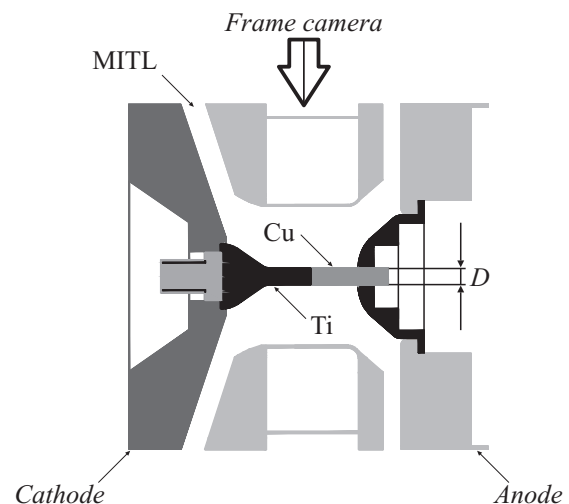
слоем меньшей проводимости. Сравнение проводилось путем регистрации собственного свечения поверхности проводников из титана и нержавеющей стали. Нагрузки изготавливались таким образом, что одна их половина представляла собой сплошной цилиндр из титана или нержавеющей стали (однородный проводник), а вторая — трубку того же диаметра из того же материала с толщиной стенки 150–250  $\mu\text{m}$  со вставкой из меди (двуслойный проводник). Это позволяло в идентичных условиях сравнивать поведение сплошного и двуслойного проводников в быстронарастающем магнитном поле.

Показано, что за счет двуслойной структуры проводника с внешним слоем меньшей проводимости возможно достижение более высоких значений индукции магнитного поля на поверхности проводника без ее взрыва [14].

Изготовление двуслойных проводников таким способом не позволяло получать внешний слой проводника толщиной менее 100  $\mu\text{m}$ , кроме того, данная технология не давала возможности изготавливать двуслойные электроды сложной конфигурации. В настоящей работе приведено исследование скин-эффекта однородных и двуслойных проводников, причем двуслойные проводники изготавливались более технологичным методом напыления внешнего слоя меньшей проводимости на медный проводник.

## Постановка эксперимента

Эксперименты проводились на тераваттном сильноточном генераторе МИГ при амплитуде тока до 2.5 МА и времени его нарастания 100 ns [15]. Диагностический комплекс генератора МИГ состоял из поясов Роговского, магнитных зондов, делителей напряжения и четырехкадровой оптической камеры HSFC Pro с минимальной экспозицией каждого отдельного кадра 3 ns. Нагрузкой генератора служили цилиндрические медные проводники диаметром 3 mm, на прикатодную часть которых методом напыления в вакууме наносился слой титана толщиной 20–80  $\mu\text{m}$ . Напыление титана производилось на вакуумной ионно-плазменной установке КВИНТА [16–18], созданной для работ по напылению тонких пленок в лаборатории плазменной эмиссионной электроники ИСЭ СО РАН. Установка КВИНТА включает в себя три плазмотрона. Данные источники плазмы выполняют в одном вакуумном технологическом цикле несколько функций: очистку и активацию поверхности, плазменное ассистирование газоразрядным плазмотроном на основе несамостоятельного дугового разряда ПИНК (плазменный источник с накаливаемым катодом) и напыление пленки двумя вакуумными электродуговыми испарителями. Система планетарного вращения обрабатываемых и напыляемых деталей и специально разработанная система одновременного вращения четырех деталей вокруг своей оси позволяли наносить равномерные пленки на детали малого диаметра (менее 2 mm) и высотой до 5 см с неоднородностью по толщине менее 1%.



**Рис. 1.** Схематическое изображение узла нагрузки генератора МИГ. Ti — двуслойная часть нагрузки (сплошной медный цилиндр диаметром 3 mm с нанесенным слоем титана), Cu — сплошной медный цилиндр диаметром 3 mm.

Схематическое изображение узла нагрузки генератора МИГ представлено на рис. 1, из которого видно, что нагрузка состоит из двух частей — сплошного медного цилиндра с напыленным слоем титана от катодного фланца до примерно середины нагрузки (двуслойный проводник) и сплошного медного цилиндра от середины нагрузки до скользящего контакта анодного фланца (однородный проводник). Длина цилиндрической части нагрузки и соответственно диагностического окна обратного токопровода увеличена до 15 mm для исключения влияния на измерения краевых эффектов и приконтактных областей.

Нагрузки в виде медных цилиндров с плавным утолщением к катоду изготавливались на токарном станке. Специальной дополнительной обработки поверхности цилиндров не проводилось. Согласно изображениям, полученным с помощью микроскопа, шероховатость поверхности составляет  $\pm 10 \mu\text{m}$ . Эксперименты проводились в вакуумной камере, откачиваемой паромасляным насосом до давления  $10^{-4}$  Torr.

Индуктивность, которую „видит“ генератор с такой нагрузкой, приблизительно равна 23–25 nH, амплитуда тока при этом достигает 2.5 МА со временем нарастания  $\sim 100$  ns, что позволяет достигать пиковых значений индукции азимутального магнитного поля на поверхности проводника до 300–500 Т. Импульс тока в нагрузке имеет предимпульс, который начинается примерно за 250 ns до начала основного импульса, нарастает приблизительно линейно и достигает значений  $\sim 3\%$  от амплитуды основного импульса. При работе генератора МИГ с такими нагрузками примерно на максимуме обратной полуволны напряжения на них происходит перекрытие вакуумной поверхности проходного изолятора вода–вакуум. Вследствие „захвата“ магнитного потока в вакуумной передающей линии ток нагрузки

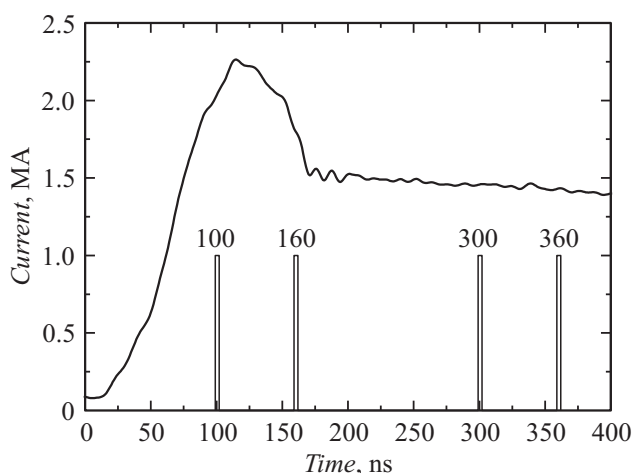
на 130–150-ой ns приобретает форму слабо спадающей экспоненты с характерным временем спада несколько микросекунд.

Регистрация собственного свечения поверхности двуслойных и однородных проводников в видимом диапазоне спектра производилась с помощью оптической четырехкадровой камеры HSFC Pro с минимальной экспозицией кадра 3 ns.

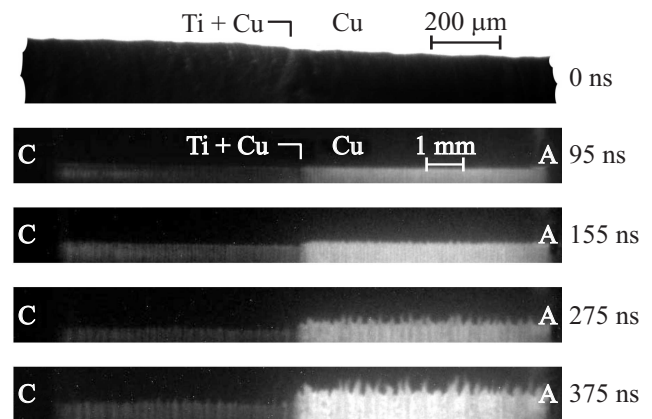
## 1. Экспериментальные результаты

На рис. 2 представлены типичная осциллограмма тока, полученная в эксперименте с однородным медным проводником диаметром 3 mm, и моменты времени съемки камерой HSFC Pro. Полученные снимки показали, что начиная с 100 ns регистрируется свечение поверхностной плазмы нагрузки диаметром 3 mm, которая со временем расширяется и интенсивность ее свечения увеличивается [18].

Далее исследовалось плазмообразование на поверхности составных (двуслойного и однородного) проводников из меди длиной 15 mm, на половину которых (7.5 mm) со стороны катода наносился слой титана различной толщины, как показано на рис. 1. На рис. 3 представлены полученное с помощью микроскопа изображение участка поверхности такого составного проводника вблизи границы раздела с напыленным слоем титана толщиной 50  $\mu\text{m}$  на одну его половину, и снимки поверхности нагрузки, полученные с помощью оптической камеры HSFC Pro в моменты времени 95, 155, 275 и 375 ns от начала протекания тока. Анализ снимков показал, что свечение двуслойной части проводника практически отсутствует вплоть до 275 ns от начала протекания тока, тогда как на однородной части Cu проводника регистрируется появление поверхностной плазмы, расширяющейся со временем с образованием



**Рис. 2.** Типичная осциллограмма тока, регистрируемая в экспериментах с однородным медным проводником диаметром 3 mm с указанными моментами времени получения снимков камерой HSFC Pro.



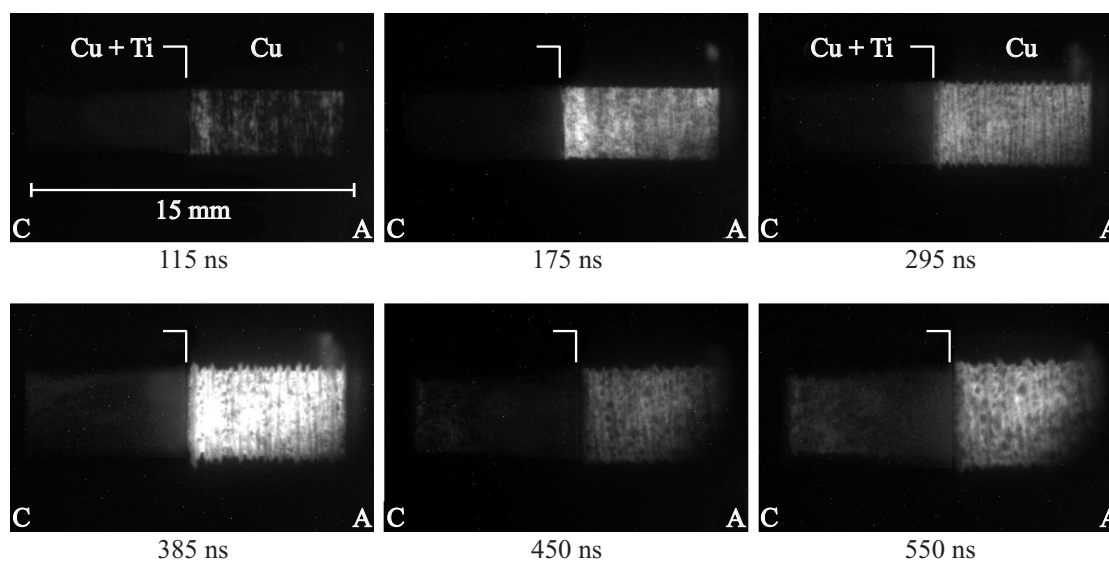
**Рис. 3.** Фотография поверхности Cu проводника диаметром 3 mm с напыленным слоем Ti толщиной 50  $\mu\text{m}$  вблизи границы напыления с увеличением в 40 раз (0 ns) и снимки его поверхности в собственном свечении в различные моменты времени от начала тока генератора.

и развитием крупномасштабных неустойчивостей, аналогичных регистрируемым в [7,8]. Слабое изображение двуслойной части проводника, видимое на снимках, обусловлено подсветкой от светящейся части однородного медного проводника и не свидетельствует о наличии поверхностной плазмы у двуслойного проводника в данном временном интервале. Таким образом, можно сделать вывод, что двуслойный проводник не излучает в видимом диапазоне практически до трехсотой наносекунды от начала протекания по нему тока. В то же время изображение однородного медного проводника достаточно яркое и свидетельствует о наличии поверхностной плазмы, которая расширяется с образованием и развитием крупномасштабных неустойчивостей.

Увеличение толщины слоя напыления Ti на однородный медный проводник приводит к еще более позднему появлению свечения поверхности двуслойной части проводника, что хорошо видно на рис. 4. На нем приведены снимки с оптической камеры, полученные в различные моменты времени от 115-й до 550-й ns от начала тока для Cu проводника диаметром 3 mm с напыленным слоем Ti у катодной части толщиной 80  $\mu\text{m}$ . Можно констатировать, что при толщине напыления слоя титана на медное основание более 80  $\mu\text{m}$  плазмообразования на поверхности двуслойного проводника не будет вплоть до 500 ns от начала протекания через него тока.

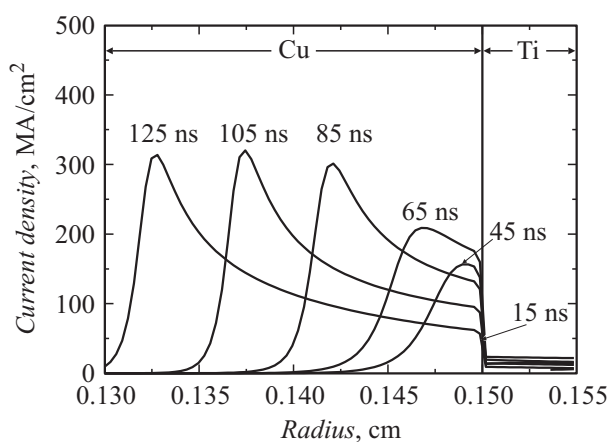
Уменьшение же толщины титанового слоя до 20  $\mu\text{m}$  приводит к более раннему появлению свечения двуслойной части проводника и соответственно плазмообразованию на его поверхности по сравнению с толщиной титанового слоя 50  $\mu\text{m}$  и больше, но все равно это свечение начиналось на 150–200 ns позже начала свечения однородной медной части проводника.

Для объяснения полученного эффекта задержки плазмообразования и количественной интерпретации результатов экспериментов были проведены расчеты распреде-



**Рис. 4.** Снимки Cu проводника диаметром 3 mm с напыленным слоем Ti у катодной части в собственном свечении в различные моменты времени от начала тока генератора. Толщина напыления титана — 80  $\mu\text{m}$ .

ления плотности тока по толщине медного проводника диаметром 3 mm с нанесенным слоем титана толщиной 50  $\mu\text{m}$  при нелинейной диффузии магнитного поля с амплитудой и формой его импульса, соответствующей экспериментальной, по описанной в [14] методике. На рис. 5 приведены полученные расчетные зависимости распределения плотности тока по толщине двуслойного проводника в различные моменты времени при амплитуде и форме импульса магнитного поля, соответствующей представленной на рис. 2. Видно, что практически с самого начала импульса поля распределение плотности тока в титановом слое близко к равномерному, а максимум плотности тока находится в медном проводнике. При этом плотность энергии магнитного поля на поверхности в момент максимума поля составляет 29  $\text{kJ}/\text{cm}^3$ ,



**Рис. 5.** Расчетные зависимости распределения плотности тока в различные моменты времени для двуслойного проводника, состоящего из меди радиусом 0.15 cm с нанесенным внешним слоем титана 50  $\mu\text{m}$ .

а плотность тепловой энергии всего 6.2  $\text{kJ}/\text{cm}^3$ . То есть для титана при его энергии сублимации 39  $\text{kJ}/\text{cm}^3$  взрыва поверхности может и не происходить.

Таким образом, проведенные расчеты и эксперименты показывают, что для двуслойных проводников с толщиной внешнего слоя титана 20–80  $\mu\text{m}$ , полученного методом вакуумного напыления на сплошной медный цилиндр диаметром 3 mm, за счет перераспределения плотности тока по сечению и снижения джоулевого тепловыделения на поверхности наблюдается задержка процесса плазмообразования на 200 ns и более по сравнению с однородным медным проводником при значении магнитного поля до 300 T.

## Заключение

В экспериментах, проведенных на сильноточном генераторе МИГ, было показано, что за счет двуслойной структуры проводника с внешним слоем меньшей проводимости, полученным способом вакуумного напыления (толщина 20–80  $\mu\text{m}$ ), наблюдается задержка плазмообразования на его поверхности до 300–500 ns от начала протекания через него тока при значении магнитного поля до 300 T.

Способ изготовления двуслойных электродов методом вакуумного нанесения покрытий на поверхность проводников вполне технологичен и может быть использован при конструировании вакуумных передающих линий мультимеггаамперных генераторов тока следующего поколения.

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований президиума РАН № 2 (проект 2.15), грант РФФИ № 14-08-00524.

## Список литературы

- [1] *Bennett F.D.* High temperature exploding wires. Progress in high temperature physics and chemistry. Oxford. Pergamon Press, 1968. Vol. 2. P. 1–63.
- [2] *Бурцев В.А., Калинин Н.В., Лучинский А.В.* Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. М.: Энергоатомиздат, 1990. 288 с.
- [3] *Орешкин В.И., Баренгольц С.А., Чайковский С.А.* // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 5. С. 108–116.
- [4] *Oreshkin V.I., Chaikovsky S.A.* // Phys. Plasm. 2012. Vol. 19. P. 022706.
- [5] *Peterson K.J., Sinars D.B., Yu E.P., Herrmann M.C., Cuneo M.E., Slutz S.A., Smith I.C., Atherton B.W., Knudson M.D., Nakhleh C.* // Phys. Plasm. 2012. Vol. 19. P. 092701.
- [6] *Chaikovsky S.A., Oreshkin V.I., Mesyats G.A., Ratakhin N.A., Datsko I.M., Kablambaev B.A.* // Phys. Plasm. 2009. Vol. 16. P. 042701.
- [7] *Peterson K.J., Yu E.P., Sinars D.B., Cuneo M.E., Slutz S.A., Koning J.M., Marinak M.M., Nakhleh C., Herrmann M.C.* // Phys. Plasm. 2013. Vol. 20. P. 056305-1–056305-9.
- [8] *Peterson K.J., Awe T.J., Yu E.P., Sinars D.B., Field E.S., Cuneo M.E., Herrmann M.C., Savage M., Schroen D., Tomlinson K., Nakhleh C.* // Phys. Lett. 2014. Vol. 112. P. 135002-1–135002-5.
- [9] *Kalinin Y.G., Anan'ev S.S., Bakshaev Y.L., Bartov A.V., Blinov P.I., Chernenko A.S., Kazakov E.D., Kingsep A.S., Korolev V.D., Mizhiritsky V.I., Smirnov V.P., Mazarakis M., Olson C.* Proc. of the 16th IEEE International Pulsed Power Conference. Albuquerque. New Mexico, 2007. P. 1761–1764.
- [10] *Bakshaev Yu.L., Bartov A.V., Blinov P.I., Chernenko A.S., Danko S.A., Kalinin Yu.G., Kingsep A.S., Korolev V.D., Mizhiritski V.I., Smirnov V.P., Shashkov A.Yu., Sasorov P.V., Tkachenko S.I.* // Plasm. Phys. Rep. 2007. Vol. 33. N. 4. P. 259–270.
- [11] *Шнеерсон Г.А.* Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов. М.: Энергоатомиздат, 1992. 416 с.
- [12] *Шнеерсон Г.А.* // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. Вып. 6. С. 18–21.
- [13] *Кнопфель Г.* Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972. 392 с.
- [14] *Chaikovsky S.A., Oreshkin V.I., Datsko I.M., Labetskaya N.A., Ratakhin N.A.* // Phys. Plasm. 2014. Vol. 21. P. 042706.
- [15] *Лучинский А.В., Ратахин Н.А., Федущак В.Ф., Шенелев А.Н.* // Изв. вузов. Физика. 1997. Т. 40. С. 67–75.
- [16] *Григорьев С.В., Девятков В.Н., Денисов В.В., Коваль Н.Н., Лопатин И.В., Шугуров В.В., Яковлев В.В.* // Ученые записки Петрозаводского гос. ун-та. 2010. № 2(107). С. 86–95.
- [17] *Koval N.N., Ivanov Yu.F., Krygina O.V., Shugurov V.V.* // Изв. вузов. Физика. 2012. № 12/2.
- [18] *Datsko I.M., Chaikovsky S.A., Labetskaya N.A., Oreshkin V.I., Ratakhin N.A.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. Vol. 552. N 1. P. 012013.