

Импульсная модуляция PIG источников ионов

*Н.Н. Щитов**

Всероссийский научно-исследовательский институт Автоматики им. Н.Л. Духова, Москва, Российская Федерация

**nschitov@mail.ru*

Аннотация. Представлены результаты исследований модуляции разряда в источнике ионов Пеннинга (PIG ion source – PIGIS). Модуляция осуществлялась путем генерации импульсных полей при разряде накопительной емкости через плоские и конусные (воронкообразные) спирали (антенны), являвшиеся катодами PIGIS. Разряд происходил в остаточной атмосфере водорода при давлениях 3–10 Па. Проанализированы особенности данного способа модуляции, его преимущества и недостатки. Кратко перечислены возможности различных технологий для реализации данного способа модуляции в различных PIGIS. Уточнены полученные ранее результаты в плане необходимой длительности импульса для различных давлений. Обсуждается влияние конфигурации электродов PIGIS на его работу.

Ключевые слова: PIGIS, импульсные поля, конфигурация электродов, конусные антенны.

1. Введение

Модуляция PIGIS обычно осуществляется анодным напряжением в случае холодных катодов или электронным током при наличии накального катода [1]. Возможна также модуляция с помощью резонансного поля накачки, использованного для компенсации потерь энергии на излучение в экспериментах Х. Демельта [2]. Теоретически возможна модуляция при создании в объеме газоразрядной камеры (ГРК) PIGIS импульсного поля различной природы. В [3, 4] представлены предварительные результаты исследований влияния импульсных полей на работу PIGIS. Поля в PIGIS генерировались при разряде накопительной емкости через плоские спиральные антенны, служившие катодами в PIGIS. Выбор данного способа модуляции был обусловлен несколькими причинами, частично перечисленными в [3]. Среди них стоит еще раз отметить расчеты, выполненные в [5]. В ней исследован эффект отсечки электронов в плоском диоде магнитным полем внешнего плоского индуктора на примере вакуумного выключателя с плоскими контактами. С другой стороны, модель индуктивно-связанной плазмы, генерируемой аналогичными индукторами, разработанная в [6], дает возможность получить необходимые предварительные оценки необходимых уровней мощности для реализации различных режимов горения. Но эта модель разработана для стационарного режима горения разряда в стандартной GEK-ячейке, так что сравнение ее результатов с импульсным экспериментом представлялось весьма интересным с научной точки зрения. Кроме того, модель PIGIS, представленная в [7], показывает предпочтительность модуляции магнитным полем по сравнению с электрическим с точки зрения перехода к сильнотоочной и низковольтной форме разряда в скрещенных полях. Это обуславливает возможную практическую ценность. Наконец, последняя причина дополнительного исследования отличной от плоской геометрии электродов заключалась в улучшенных характеристиках PIGIS с коническим концентратором постоянного магнитного поля, описанного в [8]. Следует так же отметить, недавние исследования [9], которые подтвердили, что оптимизация распределения неоднородного магнитного поля может улучшить характеристики импульса тока, уменьшить ток разряда и увеличить коэффициент извлечения ионов.

В [1] эксперименты проводились с плоскими спиралями, выполненными из Al проволоки диаметром 1.5 мм. В [2] все эксперименты проводились с электродами, выполненными из металлизированной керамики и прорезанными алмазным резцом канавками. Эта технология была признана неудобной и несовершенной, в частности, потому что невозможно изготовить двойные и двойниковые антенны (twin or double antennas) [6]. В

настоящее время изучается возможность изготовления различных антенн на стандартных металлизированных поликорковых подложках методом лазерной резки. Во всех вариантах, кроме модуляции с помощью соленоида, выполненного прорезанием канавки на внутренней поверхности металлизированного анода, возникающее импульсное поле неоднородно, так что описание такого импульсного разряда достаточно сложно, поэтому использовались самые простые оценки. В частности, для определения вероятности зажигания рассчитывалась ионизация «представительным электроном» по методу, изложенному в [10], за время, равное половине периода импульса.

В [3], так же, как и в [5] рассматривалась возможность модуляции разряда исключительно импульсным магнитным полем. Анод находится под потенциалом горения, который ниже потенциала поджига на несколько десятков или даже сотен вольт. Кратковременное резкое увеличение магнитного поля приводит к повышению эффективного давления, а следовательно, и снижению потенциала зажигания. Вихревые электрические поля, вызывающие индукционные потери (токи Фуко), рассматривались как вредные, приводящие к потерям энергии, идущей на нагрев проводников. При этом предполагались три варианта развития разряда после завершения импульса [3]:

1) после подачи «поджигающего разряд» импульса разряд продолжает гореть при постоянном потенциале горения и для его гашения необходимо изменить направление тока в антеннах;

2) разряд может гореть только в течение времени импульса или, точнее, его части;

3) разряд может продолжать гореть некоторое время после поджига, самопроизвольно затухая в силу естественных особенностей разряда.

Рассматривались также и различные варианты модуляции, когда ключ (вакуумный разрядник) располагался в разных точках схемы, так что катоды могут быть или постоянно под потенциалом земли, или же один, а то и оба в начальный момент находятся под потенциалом анода, но в процессе разряда накопительной емкости «заземляются». Таким образом, на фоне вихревых магнитных полей возникает и кратковременное аксиальное электрическое поле, существование которого определяется временем зарядки накопительной емкости. Все поля на фоне наличия или отсутствия постоянных полей, которые для случая простой цилиндрической геометрии оцениваются легко, позволяют с достаточной степенью точности использовать метод оценки вероятности развития разряда, описанный в [10]. Но в случае относительно сложной геометрии, например, с катодами в виде усеченных конусов, простые оценки, использованные в [3], уже не могут быть выполнены.

2. Расчет полей в случае конусных антенн

Как уже было отмечено во введении, изменение геометрии ячейки Пеннинга позволяет радикально изменить ее характеристики. В частности, упомянутая выше ловушка Пеннинга, описанная в [2] (см. Рис.1) выполнена из комбинации однополостного (анод) и двухполостного (катоды) гиперболоидов. Подобная конфигурация позволяет отсечь все электроны, кроме одного, осциллирующего строго по оси Z (геоний) с легко рассчитываемыми частотами, в частности частота осцилляций геония составляла 60 МГц.

Если же думать, напротив, об удержании максимального количества электронов, необходимых для генерации плотной плазмы, то естественно рассмотреть некую гладкую фигуру, «инверсную» по отношению к гиперболоиду. Например, параболоид, дискретной кусочно-постоянной имитацией которого был бы цилиндр и основания в виде усеченных конусов. При этом вершины конусов обращены вовне ячейки.

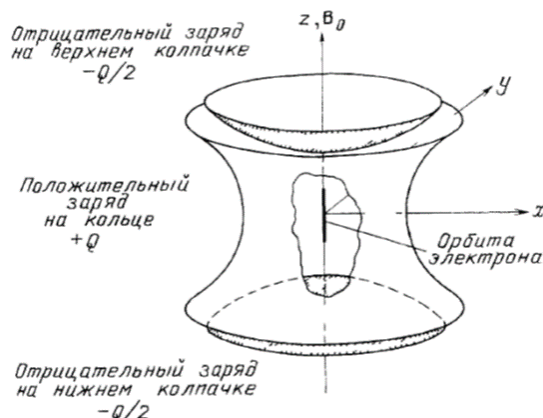


Рис.1. Ловушка Пеннинга, использованная для удержания электрона [2].

В случае, если антенны не плоские, а имеют конусную, «воронкообразную» форму, мгновенная картина полей импульсных радикально изменяется. В зависимости от угла раствора конуса максимальное значение аксиальной компоненты магнитного поля смещается вдоль оси Z в направлении от плоскостей катода и антиматода. Кроме того, помимо изменения картины вихревых полей, меняется и конфигурация стационарного (потенциального) электрического поля. Разряд приобретает черты комбинированного – разряда с осциллирующими электронами: в скрещенных полях (Пеннинга) и в полном катоде. Приведем сравнительные зависимости компонент магнитного поля для случая плоских антенн и конусных с углом полураствора приблизительно 65° (шаг спирали по высоте 0.5 мм). Размеры ячейки при этом остаются теми же, соответственно, уменьшается высота анода и объем ячейки. Итак, сначала графики максимальных значений (в момент максимума тока; Рис.2 и Рис.3) суммарных компонент магнитного поля на оси ячейки. Кривые, относящиеся к плоским спиральям, отмечены черными кружками, воронкообразные поля имеют дополнительный индекс «В».

Видно, что, во-первых, максимумы аксиальной компоненты для конусных антенн смещены от катодов, так что, меняя угол полураствора конуса, можно совместить их с максимумом коэффициента ионизации. Во-вторых, радиальные компоненты индукции для конусных антенн вблизи катодов значительно превосходят аналогичные для плоских. Это означает, что асимметрия по отношению к полярности будет выше для случая конусов. С точки зрения извлечения ионов это может быть полезным.

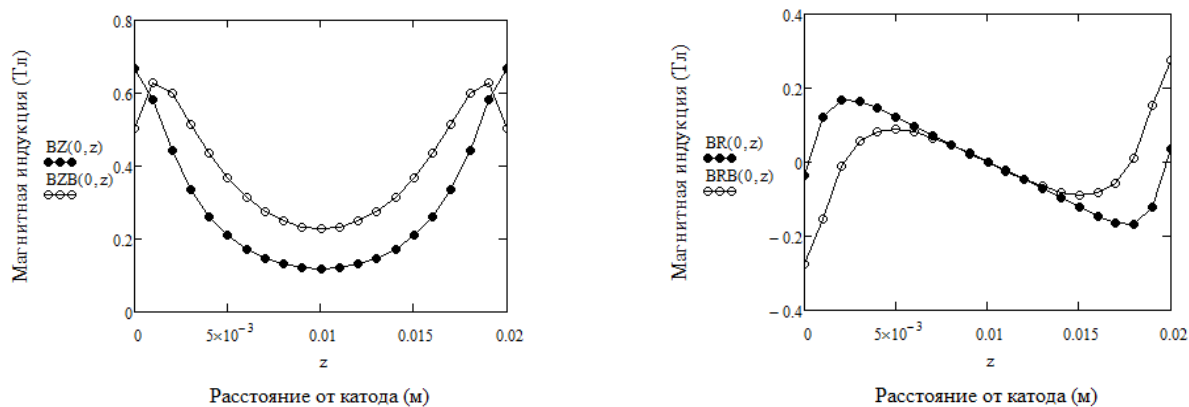


Рис.2. Сравнение аксиальных – слева и радиальных – справа максимальных значений компонент магнитной индукции на оси ячейки для плоских (черные кружки) и конусных (светлые кружки) антенн, как функций расстояния от катода.

На Рис.3 приведены графики зависимости азимутальных компонент вихревых электрических полей в начальный момент времени на расстоянии 5 мм от оси ячейки от расстояния до катода для плоских и воронкообразных антенн. Видно, что для плоских антенн максимальное по модулю значение суммарного поля достигается в плоскости антенн катода и антикатада, тогда как для воронкообразных антенн максимум достигается на расстоянии примерно 3 мм от краев ячейки. Среднее значение модуля так же во втором случае больше. Как и в случае с аксиальным магнитным полем, варьируя угол воронки можно, вероятно, добиться совпадения максимального значения с максимумом вероятности ионизации.

Наличие элемента длины по оси Z в конусной антенне приводит к возникновению вихревого аксиального электрического поля, чего в случае плоских антенн нет. На Рис.4 слева приведены характерные зависимости.

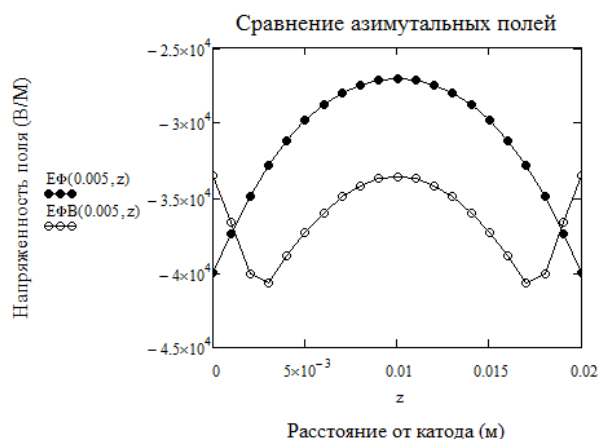


Рис.3. Сравнение максимальных значений азимутальных компонент вихревого электрического поля на расстоянии 5 мм от оси ячейки для плоских (черные кружки) и конусных (светлые кружки) антенн, как функций расстояния от катода.

Таким образом, подводя итог проведенным оценкам, можно отметить, что возникающие при разряде накопительной емкости на систему антенн поля имеют вполне сравнимую и даже значительно превосходящую (для случая магнитных полей) стационарные значения величину.

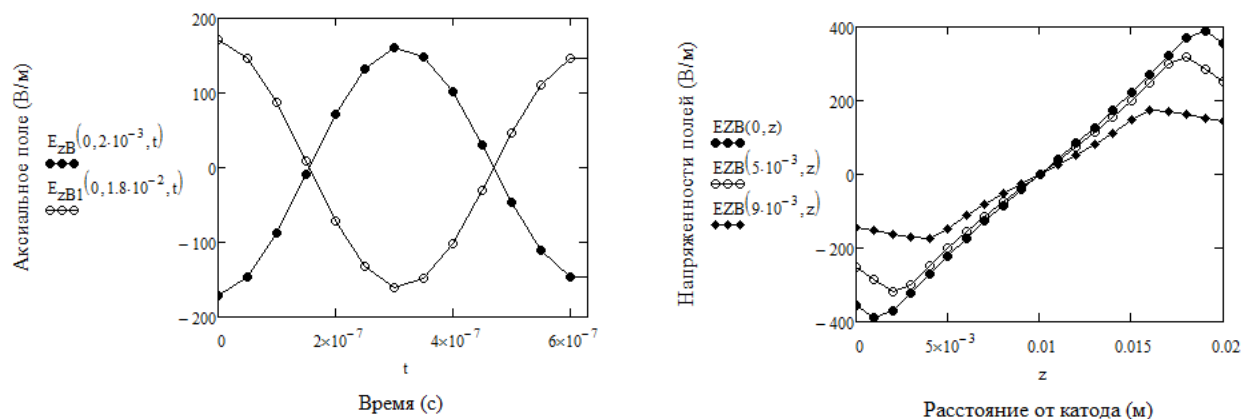


Рис.4. Зависимость от времени аксиальных компонент вихревого электрического поля антенн катода (черные кружки) и антикатада (светлые кружки) на расстоянии 2 мм от краев ячейки – слева. Распределение по высоте суммарного аксиального поля для разных расстояний от оси в начальный момент времени – справа.

Для оценки времени развития разряда по методу, описанному в [1] и использованному в [2], помимо расчета собственно импульсных полей необходимо и знание стационарного распределения поля в ячейке Пеннинга. Как уже отмечено во введении, в случае плоских катодов или антенн это поле легко рассчитывается методом Фурье, а в случае произвольной геометрии разрядной области, даже такой простой, как цилиндр, ограниченный усеченными конусами, необходимо использовать численные методы. Было начато моделирование реальной разрядной ячейки, описанной в следующем разделе, в пакете Comsol 6.5 (выполнял Узволок А.А.). При этом спирали, естественно заменялись плоскими усеченными конусами. К моменту написания данной работы удалось только промоделировать распределение потенциала и стационарного магнитного поля для различных углов полураствора конуса – пример приведен на Рис.5. Однако наложение рассчитанных в пакете MathCad 15 импульсных полей и расчет траекторий движения электронов в ячейке с учетом торможения и ионизации оказалось довольно сложным, и пока не доведено до конца. Поэтому сделать относительно полные теоретические оценки преимуществ и недостатков использования подобной конфигурации катодов в PIGIS пока не представляется возможным.

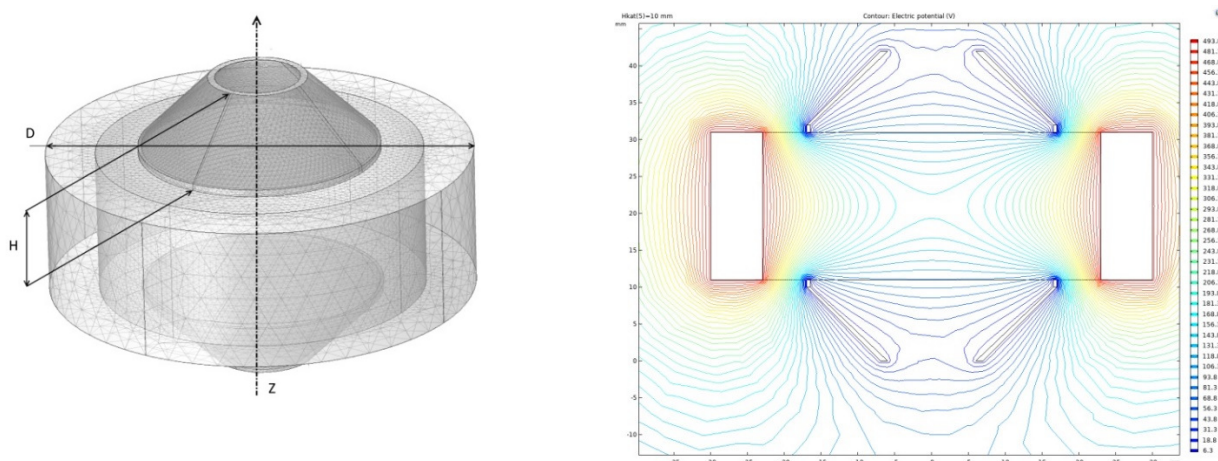


Рис.5. Расчетная модель экспериментальной сборки и распределение потенциала в плоскости ZR при потенциале анода 500 В.

3. Экспериментальные результаты

Для проведения экспериментов использовались антенны, описанные в [1], а для сравнения с плоскими – металлизированные текстолитовые диски с прорезанными канавками, аналогичные по сопротивлению и индуктивности керамическим катодам, описанным в [2] – Рис.6. Схема измерений практически аналогична описанной в [3]. Для сохранения коэффициента вторичной эмиссии перед прорезанием канавок на медь нановилось покрытие из алюминия методом термического напыления толщиной порядка 1 мкм. В отличие от сборки, описанной в [3], анод и магнитная система были меньшей высоты, но большего диаметра, а сеточный коллектор был вынесен над ячейкой из-за выступа верхней конусной антенны. Для определения необходимого для поджига разряда времени снимался сигнал с анода, потенциал которого в отсутствии рабочего газа поддерживался выше потенциала зажигания для данного давления (порядка $1.5 \cdot 10^{-1}$ Торр) – 1.2 кВ, а при напуске газа падал до потенциала горения – порядка 600 В. Ток разряда ограничивался аппаратно 10 мА. Время развития определялось по осциллограмме – Рис.7. Аналогично определялось и время затухания.

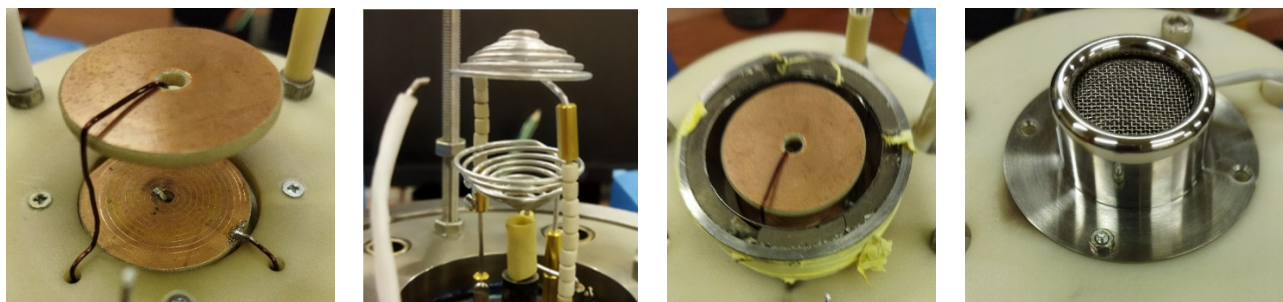


Рис.6. Последовательность сборки модельной ячейки Пеннинга. Установка плоских керамических катодов, установка конусных антенн, монтаж анода вместе с магнитной системой (для конусных антенн – аналогично), окончательная сборка с сеточным коллектором.

Как видно из приведенной осциллограммы, время развития пробоя составляло для данного давления 3.75 мкс. Время же погасания разряда было около 50 мкс. Ясно, что характерные времена разряда накопительной емкости – с периодом порядка мкс – слишком малы для развития разряда. Поэтому сделанный в [3] вывод о невозможности инициации разряда импульсным полем справедлив только для плоских спиралей при любом подключении и одинаковом направлении токов. Этот вывод был подтвержден и в экспериментах с плоскими текстолитовыми катодами. В случае противоположного направления токов, т.е. образования монокасповой ловушки, возможно гашение разряда, несмотря на значительное время самопроизвольного погасания. В случае же конусных антенн параллельное включение так же не приводит к инициации, несмотря на большое амплитудное значение токов. Но последовательное включение, приводящее к увеличению индуктивности, а следовательно, увеличению длительности разряда до примерно 3 мкс, позволяет осуществить пробой, т.е. инициировать разряд – Рис.7 в центре и справа.

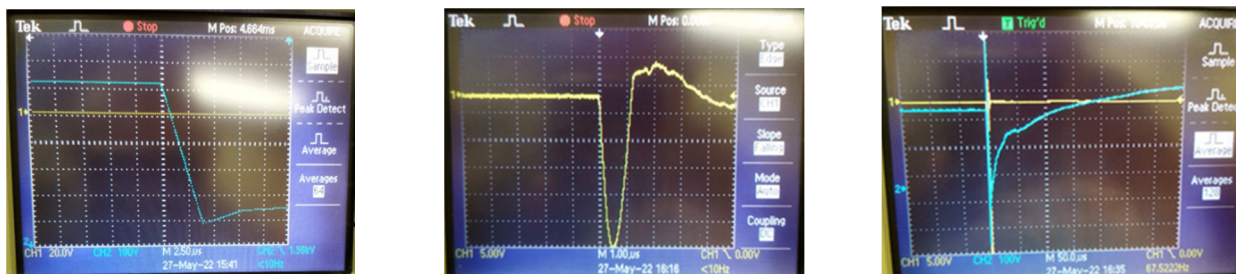


Рис.7. Осциллограмма развития разряда – падение анодного напряжения от потенциала зажигания 1.2 кВ до потенциала горения порядка 650 В. Токовый импульс при последовательном соединении спиралей – в центре и осциллограмма пробоя этим импульсом разрядного промежутка – справа.

3. Заключение

Результаты проведенного модельного исследования доказывают существенное влияние конфигурации электродной системы PIGIS на его рабочие характеристики при модуляции импульсными полями, генерируемыми при разряде накопительной емкости через спиральные антенны. В частности, удалось экспериментально подтвердить возможность инициации разряда, что не удавалось сделать с помощью плоских антенн. Этот факт нельзя отнести лишь на счет малой длительности импульса, т.к. сравнивались импульсы одинаковой длительности и амплитуды. Значительное усложнение расчетной модели не позволило пока определить оптимальную конфигурацию электродов, а несовершенство экспериментального оформления – сделать это *insitu* путем изменения угла полураствора конусов. Тем не менее, отмеченные проблемы будут решены в ближайшем будущем.

4. Список литературы

- [1] Габович М.Д., *Физика и техника плазменных источников ионов*. (Москва: Атомиздат, 1972).
- [2] Демельт Х., *Нобелевские лекции по физике*, **160**(12), 129, 1990;
- [3] Schitov N.N., *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1393**, 012053, 2019;
doi: 10.1088/1742-6596/1393/1/012053
- [4] Schitov N.N., *7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2020 online): Abstracts*, Tomsk, Russia, 98, 2020;
- [5] Kadetov V.A., *Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doctors der Fakultät für Physik und Astronomie der Ruhr-Universität Bochum*, 2004.
- [6] Drozd I., Kuzmichev A., Maikut S., *Problems of Atomic Science and Technology*, **118** (6), 281, 2018;
- [7] Зюлькова Л.А., Козырев А.В., Проскуровский Д.И., *Журнал Техники Физики*, 2005, **75**(11), 59, 2005; url: <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/8707>
- [8] Вересов Л.П., Вересов О.Л., Литвинов П.А., *Журнал Техники Физики*, 2000, **70**(4), 111, 2000; url: <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/37416>
- [9] Mamedov N.V., *Plasma Sources Sci. Technol.*, **29**, 025001, 2020;
doi: 10.1088/1361-6595/ab6758
- [10] Schitov N.N., Yurkov D.I., *J. Phys.: Conf. Ser.*, **830**, 012056, 2017;
doi: 10.1088/1742-6596/830/1/012056
- [11] Щитов Н.Н., Мороков В.А., Узвлок А.А., *Сборник трудов 9-й Всероссийской с международным участием научно-технической конференции «Быстрозакаленные материалы и покрытия»*, Москва, Россия, 2010.