

УДК 533.922

ОБ УСКОРЕНИИ И УДЕРЖАНИИ ИОНОВ ПОЛЕМ ВИРТУАЛЬНОГО КАТОДА В ПЛАЗМЕ НАНОСЕКУНДНОГО ВАКУУМНОГО РАЗРЯДА

© 2024 г. Ю. К. Куриленков*, И. С. Самойлов

*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия***E-mail: yu.kurilenkov@lebedev.ru*

Поступила в редакцию 27.09.2023 г.

После доработки 02.10.2024 г.

Принята к публикации 08.10.2024 г.

Ранее на основе миниатюрного наносекундного вакуумного разряда малой энергии была реализована схема инерциального электростатического удержания с обратной полярностью. В эксперименте и PiC-моделировании обнаружена возможность удержания и ускорения ионов до энергий в десятки кэВ полем виртуального катода в наносекундном вакуумном разряде. Экспериментально получены как DD-нейтроны, так и α -частицы из безнейтронной реакции протон–бор. В данной работе приводятся результаты PiC-моделирования в электромагнитном коде KARAT процессов, приводящих к реакции протон–бор для реальной геометрии электродов, использованной в первых экспериментах по безнейтронному синтезу в одном миниатюрном устройстве на основе наносекундного вакуумного разряда. Из них следует, что общий выход α -частиц происходит в эксперименте за счет лишь разовых схождения протонов и ионов бора к оси разряда, ускоряемых в очень узкой потенциальной яме, а осцилляций ионов за время приложенного импульса напряжения практически нет. Формирование более объемной потенциальной ямы (широкой по радиусу и протяженной по оси разряда) с хорошо выраженными осцилляциями протонов и ионов бора может обеспечить заметное увеличение выхода реакции протон–бор.

DOI: 10.31857/S0040364424050023

ВВЕДЕНИЕ

Физика и техника коллективного ускорения ионов в системах с сильноточными электронными пучками и виртуальным катодом (ВК) имеет многолетнюю историю [1]. В частности, ранее была предложена модель коллективного ускорения ионов в искровой стадии вакуумного разряда на основе концепции глубокой потенциальной ямы [2]. Последняя соответствует виртуальному катоду, который при определенных условиях возникает на фронте катодного факела при его распространении в вакуумном диоде. Предложенная модель отражает основные процессы, приводящие к коллективному ускорению ионов в глубокой нестационарной потенциальной яме, и, в частности, позволяет объяснить неоднократно наблюдавшееся появление аномально быстрых ионов в вакуумных разрядах (см. [2, 3] и ссылки там же), природа которых долгое время оставалась непонятной.

Время жизни потенциальной ямы на фронте катодного факела крайне мало и обычно не пре-

вышает долей наносекунд [2]. Если каким-либо образом создать в вакуумном разряде условия для образования глубокой и квазистационарной потенциальной ямы, то это обеспечило бы определенное контролирование не только процесса ускорения ионов, но и их удержание с последующим ядерным синтезом в результате периодических встречных столкновений ионов. Оказалось, что это можно сделать, если реализовать хорошо известную схему инерциального электростатического удержания [4, 5], но с обратной полярностью [6], на основе миниатюрного наносекундного вакуумного разряда (НВР) цилиндрической геометрии [7–10]. Детальное PiC-моделирование в электромагнитном коде KARAT [11] выявило образование в анодном пространстве НВР виртуального катода и соответствующей ему потенциальной ямы (ПЯ) глубиной около 100 кВ. ВК образуется, когда к разряду прикладывается импульс высокого напряжения и под действием электрического поля имеет место автоматическая радиальная инжекция электронов в анодное про-

странство. В результате возникающая там квазистационарная потенциальная яма размером в несколько миллиметров играет роль как микроускорителя для попадающих в нее ионов, так и может удерживать осциллирующие в ней ионы до тех пор, пока к НВР приложено напряжение и в нем протекает ток. Ранее для данной схемы ускорения и удержания исследовался (численно и экспериментально) ядерный DD-синтез в НВР с однократным или пульсирующим выходом нейтронов с энергией 2.45 МэВ [7–9]. Пульсирующий режим выхода нейтронов являлся результатом осцилляции дейтронов в потенциальной яме и их периодических встречных столкновений с энергиями ≈ 50 кэВ на «дне» ПЯ вблизи оси разряда [10].

Представляет большой интерес управление ядерным «горением» и других более продвинутых топлив [12]. В частности, открытая еще в 30-х годах прошлого века [13, 14] безнейтронная ядерная реакция протон–бор (pV) $p + {}^{11}B \rightarrow \alpha + {}^8Be^* \rightarrow 3\alpha + 8.7 \text{ МэВ}$ с выходом практически одних α -частиц привлекает в наше время все больший как фундаментальный, так и прикладной интерес. Помимо пока весьма заоблачных вариантов производства «чистой» энергии на ее основе [15], имеется растущая современная практическая потребность в простых и надежных источниках α -частиц для ядерной медицины, материаловедения, электроники и других междисциплинарных приложений, включая аэрокосмические [16–18]. Однако выход реакции pV может стать заметным лишь при существенно больших энергиях частиц, чем это необходимо для реакций DT- или DD-синтеза [12]. Начиная с пионерской работы В.С. Беляева и его коллег в 2005 г. [19], реакция pV наблюдалась лишь в экспериментах, где так или иначе имелось лазерное воздействие на борсодержащие мишени. Отметим большой прогресс, достигнутый в последние годы в изучении безнейтронного синтеза pV в лазерной плазме, сопровождаемый существенным увеличением регистрируемого выхода α -частиц (см. обзоры в [20, 21]).

Помимо активно развиваемых схем pV -синтеза с лазерным воздействием на мишени [21], также представляет несомненный интерес реализация безнейтронной реакции pV в одном устройстве с удержанием плазмы без внешнего воздействия лазерных или протонных пучков на мишень с бором. В частности, недавно впервые был реализован pV -синтез в системе с магнитным удержанием плазмы при инжекции крупинки бора и пучка быстрых нейтральных атомов водорода [22]. Несколько ранее авторами данной работы был продемонстрирован безнейтронный pV -синтез с электродинамическим

удержанием ионов полем ВК в миниатюрном НВР с полым катодом [23] и были представлены результаты по регистрации выхода α -частиц. Экспериментам предшествовало детальное PiC-моделирование в электромагнитном коде КАРАТ [11] всех процессов, сопровождающих протекание pV -реакции. Оно выявило, в частности, возможный осцилляторный характер удержания ионов в потенциальной яме НВР с определенной геометрией [23–25]. В процессе осцилляции ионов в ПЯ глубиной ≈ 100 кВ встречные столкновения части протонов и ионов бора с энергиями ~ 100 –500 кэВ могут приводить к реакции pV и появлению α -частиц.

В данной работе уточняются представленные ранее результаты PiC-моделирования реакции pV в коде КАРАТ для условий первых экспериментов [23] с миниатюрным устройством на базе НВР с полым катодом и рассматриваются особенности генерации α -частиц для реальной геометрии анод–катод, использованной в этих экспериментах.

PIС-МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЯДЕРНОГО СИНТЕЗА ПРОТОН–БОР ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ АНОД–КАТОД

PiC-моделирование выявило некоторую оптимальную геометрию электродов для максимального выхода α -частиц из реакции протон–бор при осцилляторном удержании плазмы в НВР [23]. Соответствующие результаты для энергии осциллирующих ионов, возникающей потенциальной ямы и выхода α -частиц (в произвольных единицах) приведены в [23]. Однако было отмечено, что пробный эксперимент по ядерному горению протон–бор был проведен не для оптимальных расчетных геометрий анод–катод (А–К). Ниже приводятся и обсуждаются результаты PiC-моделирования в коде КАРАТ электродинамических процессов, приводящих к pV -синтезу для реальной геометрии А–К, использованной в эксперименте [23].

Отметим, что при переходе от исследования DD-синтеза [7–10] к первым экспериментам по нейтронному pV -синтезу в НВР возникла задача доставки протонов и ионов бора в анодное пространство. Протоны (водород) могли попасть в анодные Pd-трубки, как и ранее дейтерий [7, 8], в процессе электролиза в обычной воде. Новой задачей стала доставка ионов бора в анодное пространство. В связи с этим в работе [23] использовался старый анод, состоящий из трех Pd-трубок, прикрепленных к торцу медного основания [23]. Из-за многократного использования этого анода при исследовании DD-синтеза [9], его поверхность содержала огромное количество

микроратеров и очень развитый микрорельеф в целом [23]. Именно это оказалось крайне удобным на тот момент развития эксперимента для заполнения поверхности старого Pd-анода наночастицами бора (~ 20 нм) в процессе катафореза. При облучении такого анода энергичными электронами, летящими с катода, в эрозионной плазме у поверхности анода, совпадающей с верхним краем ПЯ [23], могли бы оказаться как протоны, так и ионы бора.

Реальная геометрия электродов А–К, использованная в первых экспериментах по анейтронному синтезу рВ в НВР [23], показана на рис. 1а. В реальном эксперименте имеем набор анодных Pd-трубок [23], расположенных по периметру цилиндрического медного основания анода. На рис. 1а и 1б приведены те результаты 2D PiC-моделирования динамики электронов (на момент времени $t = 10$ нс), формирующих ВК в анодном пространстве (с расстоянием 0.15 см между цилиндрическими анодом и катодом). Здесь и далее в расчетах использована экспериментальная зависимость приложенного напряжения от времени [23]. При моделировании в коде КАРАТ с левой стороны в коаксиал вдоль оси z (рис. 1а) подается поперечная электромагнитная волна от высоковольтного генератора, что формирует электрическое поле между электродами, вызывающее эмиссию электронов с катода. Скорости электронов и других частиц, включая продукты реакции рВ, в зависимости от их положения по радиусу приведены на рис. 1б. Особенности и детали моделирования рВ-синтеза в коде КАРАТ описаны ранее в [11, 24, 25].

По сравнению с оптимальной геометрией А–К для осцилляций ионов [23] в первом эксперименте применялись очень короткие анодные Pd-трубки (рис. 1а). Длина потенциальной ямы в НВР оказывается примерно пропорциональна длине анодной трубки в [23], и для реальной анодной Pd-трубки, как видно на рис. 2а, ПЯ оказывается довольно небольшой в длину по оси z . Можно предположить, что выход α -частиц из рВ-реакции будет пропорционален объему, в котором имеет место синтез, т.е. длине и ширине потенциальной ямы. Поэтому, чем короче анодная трубка в НВР, тем меньше будет ожидаемый выход реакции. Кроме того, реальные анодные Pd-трубки (рис. 1а) смещены к оси разряда по сравнению с их положением в [23]. Это приводит к тому, что фазовый портрет (рис. 1б) отличается от аналогичного для оптимальной геометрии А–К, где виртуальный катод сформирован на расстоянии ≈ 0.1 см от оси разряда z , как в [25]. Именно в поле такого ВК имеют место хорошо выраженные осцилляции протонов и ионов бора [23, 25]. В реальной же геометрии (рис. 1) электроны окончательно тормозятся лишь почти на оси разряда ($r \approx 0$). В результате в эксперименте [23] потенциальная яма (рис. 2а) оказывается не только узкой по оси z , но и небольшой по радиусу r (при $t = 5$ нс ПЯ будет еще в два раза уже [26]). В том числе и поэтому PiC-моделирование положений случайно выбранных в начальный момент времени из «анодной плазмы» (зеленая область на рис. 1а) групп протонов (индекс r) и ионов бора (индекс y) по радиусу во времени, как видно на рис. 2б, не обнаруживает никаких осцилляций протонов и ионов бора для реального ано-

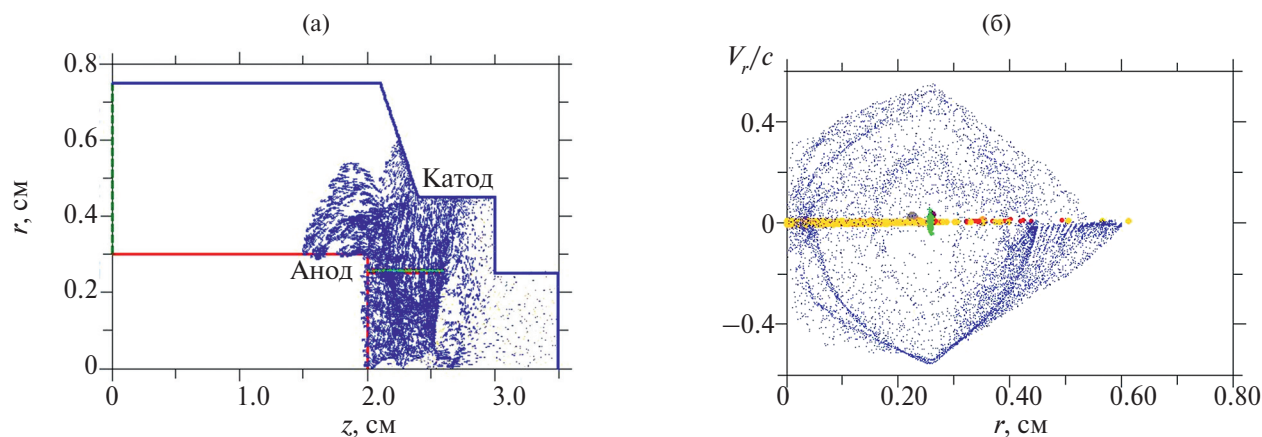


Рис. 1. Виртуальный катод (а) в межэлектродном пространстве НВР: векторные синие точки — электроны, красный — анод, синий — катод, зеленый — анодная «трубка», перпендикулярная основанию анода; (б) — скорости всех частиц V_r/c по радиусу анода, отнесенные к скорости света c : синие — электроны, желтые — ионы бора, красные — протоны, фиолетовые — первичные α -частицы, серые — бериллий $^8\text{Be}^*$, оранжевые — вторичные α -частицы, возникающие из-за распада $^8\text{Be}^*$ [23] (зеленая область — «анодная плазма», содержащая протоны и ионы бора с зарядом $Z_B = +3$).

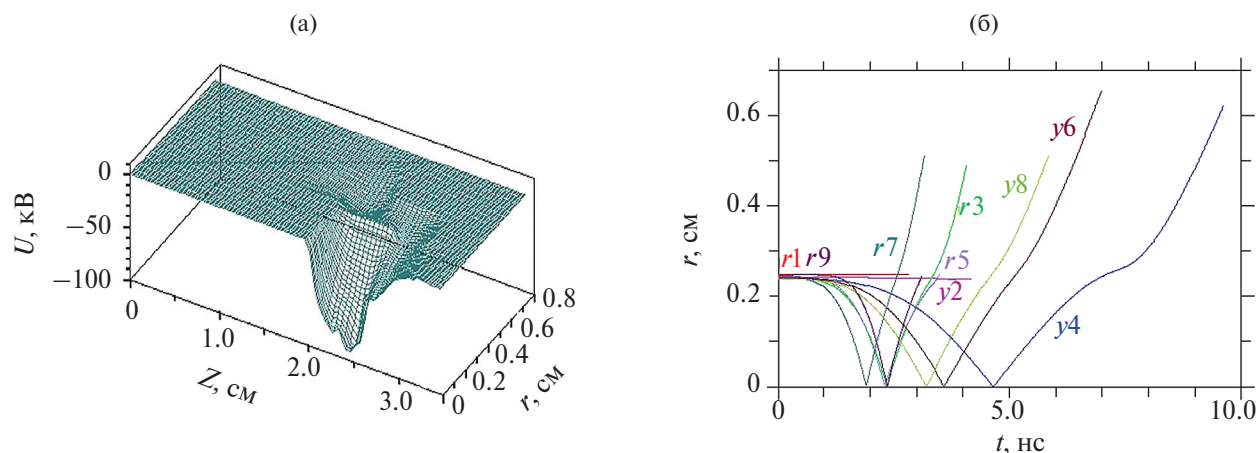


Рис. 2. Потенциальная яма (а) глубиной около 100 кВ, образуемая виртуальным катодом в анодном пространстве НВР ($t = 10$ нс); (б) — положение в анодном пространстве случайно выбранных групп протонов (индекс r) и ионов бора (y) в зависимости от времени, число при индексе — номер данной группы.

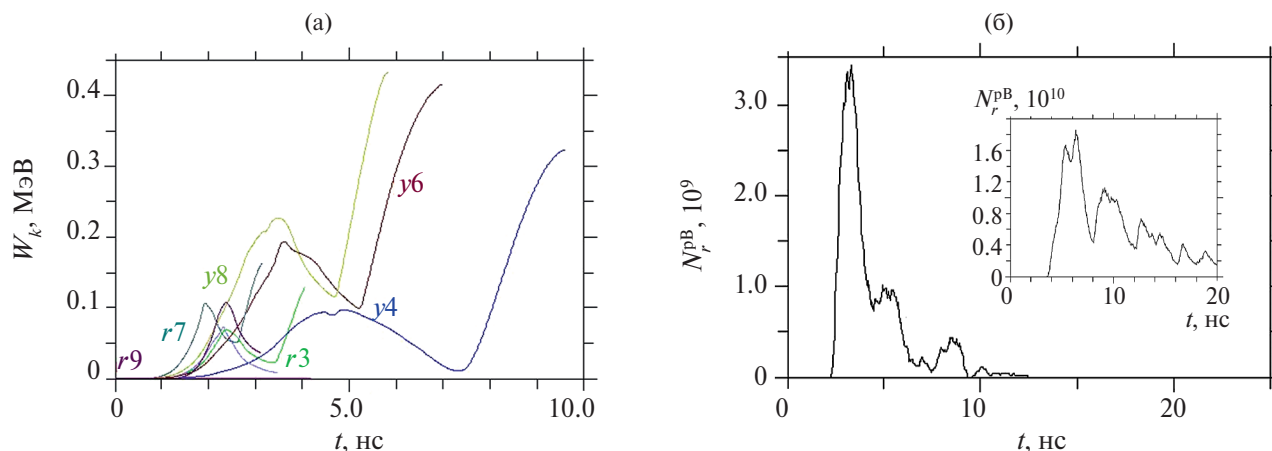


Рис. 3. Энергии (а) случайно выбранных различных групп протонов (r) и ионов бора (y) во времени для геометрии А–К, использованной в эксперименте [23]; (б) — выход вторичных α -частиц в зависимости от времени (п.е.) для геометрии А–К, использованной в эксперименте (рис. 1а); на вставке — выход α -частиц при хорошо определенных осцилляциях ионов в потенциальной яме (PiC-моделирование [23]).

да (координаты, скорости, энергия и действующие на группу частиц электрические поля прослеживаются во времени). Полученный график зависимости энергий различных групп протонов и ионов бора во времени $W_k(t)$ для реального анода (рис. 3а), в отличие от зависимости $W_k(t)$ в [23], также не содержит сильных периодических флуктуаций во времени, характерных для случая хорошо определенных осцилляций ионов в потенциальной яме [25, 26]. В результате, по-видимому, в первых экспериментах по рВ синтезу в НВР [23] возникала небольшая и довольно узкая ПЯ (рис. 2а) и, кроме первичного схождения ионов к оси разряда и последующего их разлета в интервале времени $t = 0–10$ нс (рис. 2б и рис. 3а), фактически отсутствовали какие-либо осцилляции протонов и ионов бора (в отличие от более оптимальной геометрии А–К, исполь-

зованной при PiC-моделировании в [23]). Электроны виртуального катода (при $r \leq 0.1$ см) имеют довольно большую скорость (рис. 1б), что может сделать «дно» потенциальной ямы (рис. 2а) не только узким, но и нестабильным во времени. Таким образом, основной выход α -частиц в эксперименте [23], по-видимому, имел место лишь из-за однократного схождения протонов и ионов бора к оси разряда (рис. 2б), и наблюдается лишь в первые ≈ 10 нс (рис. 3б).

Отметим, что в коде КАРАТ в принципе нельзя получать реальную оценку выхода α -частиц [11], но расчетные значения выхода в произвольных единицах (п.е.) позволяют провести сравнения между расчетами с отличающимися начальными параметрами задачи (или эксперимента), и проследить тенденции при их варьировании. Число рВ-реакций, получен-

ное при PiC-моделировании для экспериментальной геометрии А–К (рис. 1а) составляет $N_r^{pB} = 1.07 \times 10^9$ (п.е.). На вставке рис. 3б для сравнения приведено число реакций для более оптимальной геометрии А–К [23], в которой есть осцилляции ионов, и оно оказывается более чем на порядок выше. Действительно, как показало дальнейшее PiC-моделирование [26], увеличивая радиус анода и длину ПЯ по сравнению с показанной на рис. 2а, можно заметно повысить выход рВ-реакции. В частности, число рВ-реакций для различных значений радиуса анода в интервале $R_A = 0.1–0.7$ см при длине потенциальной ямы $L \approx 1–1.5$ см, в которой осциллируют ионы бора и протоны, участвующие в реакции, составляет $N_r^{pB} \approx 1.9 \times 10^{10}–1.15 \times 10^{11}$ (п.е.), согласно [26].

Ранее в [23] было подчеркнуто, что геометрия использованного в эксперименте старого анода с развитым микрорельефом является не оптимальной для достижения хорошо выраженных осцилляций ионов в ПЯ. Поэтому численная оценка выхода α -частиц была сделана в [23] именно в предположении, что основной вклад в рВ реакцию будет определяться однократным схождением встречных протонов и ионов бора к оси разряда с энергиями до ≈ 100 и ≈ 300 кэВ (для $Z_B = +3$) соответственно, что качественно подтвердилось представленным выше PiC-моделированием (рис. 2б и рис. 3а). Согласно этой оценке, за один «выстрел» в НВР (с длительностью приложенного напряжения около 20 нс) для интервала сечения рВ-реакции $10^{-3}–10^{-2}$ барн (и с учетом всплеска до 0.1 барна при вторичном резонансе) можно получить выход α -частиц $N_\alpha \approx 18–180$. В эксперименте [23] выход α -частиц за выстрел составил в среднем $N_\alpha^{\text{exp}} \approx 250$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные выше результаты PiC-моделирования для реальной геометрии А–К показали, что общий наблюдаемый выход α -частиц был накоплен, по-видимому, за счет разовых схождений протонов и ионов бора к оси разряда при каждом выстреле, а их осцилляций для геометрии анод–катод, использованной в эксперименте [23], практически нет [26]. Однако даже при неоптимальной конфигурации А–К в первых экспериментах по анейтронному синтезу рВ в одном миниатюрном устройстве на основе НВР все-таки удалось зарегистрировать определенный выход α -частиц [23]. В режиме хорошо определенных осцилляций (осцилляторного удержания ионов) при более оптимальной геометрии А–К и увеличенном объеме потенциальной ямы можно надеяться получить выход

α -частиц $N_\alpha^{\text{exp}} \sim 10^3$ и выше (вставка на рис. 3б) [23,26]. Если напряжение в НВР увеличить, например, до $U \approx 150$ кВ, можно будет несколько приблизиться и к основному резонансному пику реакции рВ при 675 кэВ, что также увеличит выход α -частиц. Что касается возможного источника α -частиц на основе НВР, то, если использовать импульсно-периодический генератор высокого напряжения и решить проблемы эрозии анода и отвода тепла, выход α -частиц будет пропорционален частоте подаваемых импульсов напряжения, например, при ~ 1 кГц это может составить около $10^6–10^7$ α -частиц/с. Это не так много, как для некоторых лазерных источников α -частиц [21], но практическая ниша для НВР в качестве простого и дешевого источника α -частиц вполне возможна. Добавим, что частоты осцилляций протонов и ионов бора в потенциальной яме будут заметно отличаться из-за разницы в массах и зарядов ионов, и выход рВ-реакции будет определяться не только процессами вблизи оси разряда, как в случае DD-синтеза [25], но и реакциями во всем анодном объеме НВР [26]. Представленные выше расчеты выхода реакции рВ в эксперименте [23] послужили отправной точкой для дальнейшего PiC-моделирования в диапазоне значений радиуса анода $R_A = 0.1–0.7$ см. Оно показало [26], что мощность анейтронного синтеза протон–бор, в заметном отличии от скейлинга DD-синтеза в осциллирующей плазме [25], растет с увеличением радиуса виртуального катода и длины потенциальной ямы по оси z .

Данная работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (госзадание № 075-00270-24-00).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубинов А.Е., Корнилова И.Ю., Селимир В.Д. Коллективное ускорение ионов в системах с виртуальным катодом // УФН. 2002. Т. 172. № 11. С. 1225.
2. Баренгольц С.А., Месяц Г.А., Перельштейн Э.А. Модель коллективного ускорения ионов в вакуумном разряде на основе концепции глубокой потенциальной ямы // ЖЭТФ. 2000. Т. 118. Вып. 6(12). С. 1358.
3. Баренгольц С.А., Месяц Г.А., Перельштейн Э.А. Феноменологическая модель неустойчивой стадии вакуумного искрового разряда // ЖТФ. 2009. Т. 79. Вып. 10. С. 45.
4. Miley G.H., Murali S.K. Inertial Electrostatic Confinement (IEC) Fusion Fundamentals and Applications. N.Y.: Springer, 2014.
5. Lavrent'ev O.A. Electrostatic and Electromagnetic High-temperature Plasma Traps // Ann. N.Y. Acad. Sci. 1975. V. 251. P. 152.

6. *Elmore W.C., Tuck J.L., Watson K.M.* On the Inertial-electrostatic Confinement of a Plasma // *Phys. Fluids*. 1959. V. 2. P. 239.
7. *Kurilenkov Yu.K., Skowronek M., Dufty J.* Multiple DD Fusion Events at Interelectrode Media of Nanosecond Vacuum Discharge // *J. Phys. A: Math. Gen.* 2006. V. 39. P. 4375.
8. *Kurilenkov Yu.K., Tarakanov V.P., Skowronek M., Gus'kov S.Yu., Dufty J.* Inertial Electrostatic Confinement and DD Fusion at Interelectrode Media of Nanosecond Vacuum Discharge. PIC Simulations and Experiment // *J. Phys. A: Math. Theor.* 2009. V. 42. 214041.
9. *Kurilenkov Yu.K., Tarakanov V.P., Gus'kov S.Yu., Karpukhin V.T., Valyano V.E.* Warm Dense Matter Generation and DD Synthesis at Vacuum Discharge with Deuterium-loaded Pd Anode // *Contrib. Plasma Phys.* 2011. V. 51. P. 427.
10. *Kurilenkov Yu.K., Tarakanov V.P., Gus'kov S.Yu., Oginov A.V., Karpukhin V.T.* Oscillating Ions under Inertial Electrostatic Confinement (IEC) Based on Nanosecond Vacuum Discharge // *Contrib. Plasma Phys.* 2018. V. 58. P. 952.
11. *Andreev S.N., Kurilenkov Yu.K., Oginov A.V.* Fully Electromagnetic Code KARAT Applied to the Problem of Aneutronic Proton–Boron Fusion // *Mathematics*. 2023. V. 11. 4009.
12. *Atzeni S., Meyer-ter Vehn J.* The Physics of Inertial Fusion: Beam Plasma Interaction, Hydrodynamics, Hot Dense Matter. Oxford: Oxford University Press, 2004. V. 125.
13. *Oliphant M., Rutheford L.* Experiments on the Transmutation of Elements by Protons // *Proc. R. Soc. Lond.* 1933. V. A141. P. 259.
14. *Dee P.I., Gilbert C.W.* The Disintegration of Boron into Three α -particles // *Proc. R. Soc. Lond.* 1936. V. 154. P. 279.
15. *McKenzie W., Batani D., Mehlhorn T.A., Margarone D., Belloni F., Campbe E.M. et al.* HB11—Understanding Hydrogen-Boron Fusion as a New Clean Energy Source // *J. Fusion Energy*. 2023. V. 42. P. 17. doi:10.1007/s10894-023-00349-9.
16. *Cirrone G.A.P., Manti L., Margarone D., Petringa G., Giuffrida L., Minopoli A. et al.* First Experimental Proof of Proton Boron Capture Therapy (PBCT) to Enhance Protontherapy Effectiveness // *Sci. Rep.* 2018. V. 8. № 1. P. 1141.
17. *Hong E., Jungmin A. et al.* Alpha Particle Effect on Multi-nanosheet Tunneling Field-effect Transistor at 3-nm Technology Node // *Micromachines*. 2019. V. 10. № 12. P. 847.
18. *Takacs S., Hermanne A., Tárkányi F., Ignatyuk A.* Cross-sections for Alpha Particle Produced Radionuclides on Natural Silver // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2010. V. 268. P. 2.
19. *Belyaev V.S., Matafonov A.P., Vinogradov V.I., Krainov V., Lisitsa V., Rusetski A.S. et al.* Observation of Neutronless Fusion Reactions in Picosecond Laser Plasmas // *Phys. Rev. E*. 2005. V. 72. № 2. 026406.
20. *Bonvalet J., Nicolai Ph., Rafestin D. et al.* Energetic α -particle Sources Produced Through Proton-boron Reactions by High-energy High-intensity Laser Beams // *Phys. Rev. E*. 2021. V. 103. № 5. 053202.
21. *Margarone D., Bonvalet J., Giuffrida L., Morace A., Kantarelou V., Tosca M. et al.* In-Target Proton – Boron Nuclear Fusion Using a PW-Class Laser // *Appl. Sci.* 2022. V. 12. P. 1444.
22. *Magee R.M., Ogawa K., Tajima T., Alfrey I., Gota H., McCarroll P. et al.* First Measurements of p11B Fusion in a Magnetically Confined Plasma // *Nature Commun.* 2023. V. 14. P. 955.
23. *Kurilenkov Yu.K., Oginov A.V., Tarakanov V.P., Gus'kov S.Yu., Samoylov I.S.* Proton-boron Fusion in a Compact Scheme of Plasma Oscillatory Confinement // *Phys. Rev. E*. 2021. V. 103. 043208.
24. *Kurilenkov Yu.K., Tarakanov V.P., Gus'kov S.Yu.* Simulation of Proton–boron Nuclear Burning in the Potential Well of Virtual Cathode at Nanosecond Vacuum Discharge // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2016. V. 774. 012133.
25. *Kurilenkov Yu.K., Tarakanov V.P., Oginov A.V., Gus'kov S.Yu., Samoylov I.S.* Oscillating Plasmas for Proton-Boron Fusion in Miniature Vacuum Discharge // *Laser Part. Beams*. 2023. 9563197.
26. *Kurilenkov Yu.K., Andreev S.N.* On Scaling of Proton-Boron Fusion Power in a Nanosecond Vacuum Discharge // *Frontiers in Physics (Fusion Plasma Physics)*. 2024. doi: 10.3389/fphy.2024.1440040.