

О квазинейтральности плазмы при осцилляторном удержании на основе наносекундного вакуумного разряда

Ю. К. Куриленков, В. П. Тараканов, А. В. Огинов, С. Ю. Гуськов, И. С. Самойлов

Одной из основных проблем для устройств инерциального электростатического удержания с инжекцией электронов является нейтрализация пространственного заряда. Данная работа посвящена анализу проблемы квазинейтральности плазмы в схеме осцилляторного удержания ионов на основе наносекундного вакуумного разряда (НВР). Электродинамическое моделирование процессов анейтронного синтеза протон–бор показало, что плазма в НВР, и особенно на оси разряда, действительно соответствует квазинейтральному режиму, заметно отличающемуся от известной схемы периодически осциллирующих плазменных сфер (ПОПС). В этом случае малые осцилляции в НВР есть механизм резонансного нагрева ионов, в отличие от когерентных сжатий в оригинальной модели ПОПС. Скейлинг мощности синтеза оказывается близок к схеме синтеза с ПОПС, но существенно отличается величинами параметра квазинейтральности и степени сжатия.

Ключевые слова: вакуумный разряд, виртуальный катод, осцилляторное удержание, ядерный синтез, скейлинг мощности синтеза.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-6-14-23

1. Введение

Схема инерционного электростатического удержания (ИЭУ) плазмы [1–6] является одной из немногих, где, в принципе, энергии ионов ~ 100 кэВ может быть довольно легко достигнута. Ускорение и удержание ионов в схеме ИЭУ имеет место в глубокой электростатической потенциальной яме (ПЯ) [1]. Однако, в традиционных схемах с ИЭУ высокая мощности ядерного синтеза оказывается в

принципе несовместимой с его безубыточностью [2], поскольку «пучковое» распределение ионов по энергиям существенно размывается кулоновскими столкновениями ещё до того, как заметно реализуется синтез.

Если ионная составляющая плазма находится в локальном термодинамическом равновесии (ЛТР), этой проблемы можно избежать. Поэтому, ранее, в качестве возможной схемы термоядерного синтеза была предложена осциллирующая плазма [7, 8]. В этой схеме, встречные ионные пучки заменены периодически осциллирующей плазменной сферой (ПОПС) в потенциале гармонического осциллятора, образованном однородным электронным фоном. В момент коллапса могут быть достигнуты необходимые для ядерного синтеза высокие плотности и температуры плазмы. В процессе колебаний ионы в схеме ПОПС находятся в состоянии ЛТР [7, 8]. Важным преимуществом устройства на основе ПОПС является благоприятный скейлинг мощности термоядерного синтеза, которая увеличивается с уменьшением радиуса виртуального катода

Куриленков Юрий Константинович^{1,2}, с.н.с., к.ф.-м.н.

E-mail: kurilenkovyuri@gmail.com

Тараканов Владимир Павлович¹, с.н.с., д.ф.-м.н.

Огинов Александр Владимирович², с.н.с., к.ф.-м.н.

Гуськов Сергей Юрьевич², г.л.н.с., д.ф.-м.н.

Самойлов Игорь Сергеевич¹, в.н.с., к.ф.-м.н.

¹ Объединённый институт высоких температур РАН.

Россия, 125412, Москва, Ижорская ул., 13, стр. 2.

² Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН.

Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53.

Статья поступила в редакцию 23 июля 2021 г.

© Куриленков Ю. К., Тараканов В. П., Огинов А. В., Гуськов С. Ю., Самойлов И. С., 2021

да (ВК) электронов [7, 9]. Как отмечалось в [9, 10], эта особенность может обеспечить уменьшение и удешевление каждой следующей установки данного типа. Кроме того, если брекэвен будет когда-то достигнут на одном маленьком устройстве (модуле) ПОПС, это могло бы привести к созданию многомодульной энергетической установки [7, 9, 11], которая окажется не слишком дорогой.

Одной из основных проблем для устройств ИЭУ с инжекцией электронов является нейтрализация пространственного заряда [2, 7, 9]. Поэтому оставался вопрос, насколько сильное сжатие плазмы может быть достигнуто за счет колебаний ПОПС. В исходных работах по ПОПС предполагалось, что в плазме будет достаточно холодных электронов, чтобы объемный заряд нейтрализовал плазменную сферу в моменты её коллапса [7, 8]. Однако, несколько позже, более детальный анализ показал [12], что существуют серьёзные ограничения на величину сжатия, которое может быть достигнуто в оригинальной схеме ПОПС, при одновременном сохранении нейтрализации пространственного заряда и параболического фонового потенциала. В результате, несмотря на успешную демонстрацию схемы ПОПС для ионов H_2^+ , He^+ и Ne^+ [9, 10], и потенциально высокую эффективность синтеза в схеме ПОПС в теории [7, 9, 13], в дальнейшем не удалось реализовать оригинальную концепцию ПОПС в экспериментах по ядерному синтезу [2, 12].

Скейлинг мощности синтеза для ПОПС [7, 9] стимулирует анализ и развитие именно компактных систем ИЭУ с осцилляциями ионов. К ним относится и давно исследуемая нами схема ИЭУ с обратной полярностью [1] на основе миниатюрного наносекундного вакуумного разряда (НВР) [14–16], в которой осцилляции ионов возникают довольно естественным образом [17]. Со временем выяснилось, что значительные надежды, связанные с потенциальными преимуществами ядерного синтеза в схеме ИЭУ с ПОПС, могут реализовываться именно в миниатюрном НВР [17–20]. В этой схеме ранее наблюдался и детально исследовался выход DD-нейтронов [14–20], а недавно был продемонстрирован и анейтронный синтез протон–бор [21]. Отметим, что поле виртуального катода в НВР удерживает осциллирующие ионы в потенциальной яме и,

одновременно, инерция самих ионов частично удерживает и электроны ВК электрическими полями. Поэтому, этот тип удержания мы называем электродинамическим или осцилляторным удержанием [20, 21].

Как отмечалось выше, принципиально важным вопросом для устройств ИЭУ с инжекцией электронов является нейтрализация пространственного заряда. Данная работа посвящена анализу квазинейтральности плазмы в схеме осцилляторного удержания ионов в НВР. Изучение этого вопроса требуется для определения отличий данной схемы удержания от известной схемы ИЭУ с ПОПС [7, 9, 12] и определения скейлинга мощности синтеза при осцилляторном удержании.

2. Виртуальный катод и квазинейтральность в НВР. PiC-моделирование

Эксперименты по DD-синтезу в НВР были начаты на рубеже веков [22], и вскоре были зарегистрированы как однократный, так и пульсирующий выходы нейтронов [14, 15, 23]. Последующее 2D PiC-моделирование процессов, приводящих к DD-синтезу в НВР, на основе полного электродинамического кода KARAT [24] выявило принципиальную роль образования виртуального катода (ВК), и соответствующей ему глубокой потенциальной ямы [15–17], которая ускоряет и удерживает осциллирующие в ней ионы. Схема осцилляторного удержания на базе НВР включает в себя естественную инжекцию электронов в анодное пространство при приложении высокого напряжения, образование очень маленького ВК с радиусом $r_{ВК} \sim 0,1$ см и соответствующую ему потенциальную яму (ПЯ), глубиной $\phi_{ПЯ} \sim 50\text{--}100$ кВ. Встречные столкновения ускоренных в ПЯ до ~ 100 кэВ дейтронов сопровождаются выходом DD-нейтронов. Дейтроны могут осциллировать в ПЯ с частотой ~ 80 МГц, зарегистрированной в эксперименте [15, 16], достигая энергии до ~ 100 кэВ в моменты их лобового столкновения на дне ПЯ, где имеет место DD-синтез [17]. В частности, периодические осцилляции дейтронов в ПЯ приводили к наблюдавшемуся пульсирующему выходу DD-нейтронов в эксперименте с НВР [15, 18]. По аналогии с DD-

синтезом, PiC-моделирование показало, что анейтронная реакция протон–бор ($p + {}^{11}\text{B} \rightarrow \alpha + {}^8\text{Be}^* \rightarrow 3\alpha + 8,7 \text{ МэВ}$) также может быть достигнута при ускорении и удержании протонов и ионов бора в потенциальной яме ВК в НВР [25, 26]. В процессе их осцилляций в ПЯ, встречные столкновения части протонов и ионов бора с энергиями 100–300 кэВ приводят к реакции протон–бор, что недавно было продемонстрировано регистрацией выхода альфа-частиц в эксперименте с НВР [21].

В целом, общая картина DD-синтеза в НВР с виртуальным катодом остаётся справедливой и для $p+{}^{11}\text{B}$ реакции. Поэтому, квазинейтральность плазмы в схеме осцилляторного удержания в данной работе мы рассмотрим на примере PiC-моделирования анейтронного синтеза протон–бор, именно к которому заметно возрос интерес в последние годы [27–30]. Поскольку моделирование ранее достаточно адекватно и детально описало основные процессы, приводящие к DD и $p+{}^{11}\text{B}$ синтезу, и даже позволило объяснить часть экспериментов по DD-синтезу, здесь мы также воспользуемся электродинамическим кодом KARAT [24]. Для этого, при моделировании процессов, приводящих к синтезу протон–бор, в качестве первого шага мы выведем значения концентраций всех заряженных частиц в определённых точках анодного пространства НВР (рис. 1) во времени, что позволит оценить степень квазинейтральности плазмы. Представленное ниже 2D PiC-моделирование было проведено при приложенном напряжении $U = 100 \text{ кВ}$, с фронтом нарастания импульса напряжения 5 нс.

На рис. 1, а показана цилиндрическая геометрия электродов, где расстояние анод–катод составляет 0,1 см. Тонкая анодная «полочка» внутри катода соответствует в реальном аноде цилиндрическим Pd-трубкам, припаянным к торцу анода по его периметру [17]. Вдоль оси Z слева в коаксиал (рис. 1, а) запускается ТЕМ волна от высоковольтного генератора, которая создает между электродами электрическое поле, обеспечивающее автоэлектронную эмиссию. В этом поле электроны (на рисунках изображены синими точками) ускоряются к оси разряда, и пересекают анод (при $r \approx 0,3 \text{ см}$), набрав энергию $\approx 100 \text{ кэВ}$ (рис. 1, б). Облучение и нагрев анода обеспечивают эмиссию ионов бора и протонов. Далее, проникая внутрь анодного пространства (в реальном эксперименте – сквозь «сетку» из Pd анодных трубок [21]), электроны тормозятся на встречных потоках, и в результате образуют ВК с радиусом $\approx 0,1 \text{ см}$ (рис. 1, б). Внешнее электрическое поле импульса отсутствует внутри анода, но отрицательный электрический заряд электронов в окрестности оси создает там потенциальную яму и обеспечивает ускорение ионов бора и протонов к оси разряда Z ($r = 0$). На ней скорость зарядов достигает максимальной величины, как и их плотность. Проблема состоит в том, что периоды осцилляций ионов бора и протонов из-за разности масс и зарядов отличается, но при определенных условиях, которые реализуются в PiC-моделировании [24, 25] и в эксперименте [21], эти ионы и протоны могут сталкиваться в окрестности оси и происходит реакция $p+{}^{11}\text{B}$ синтеза.

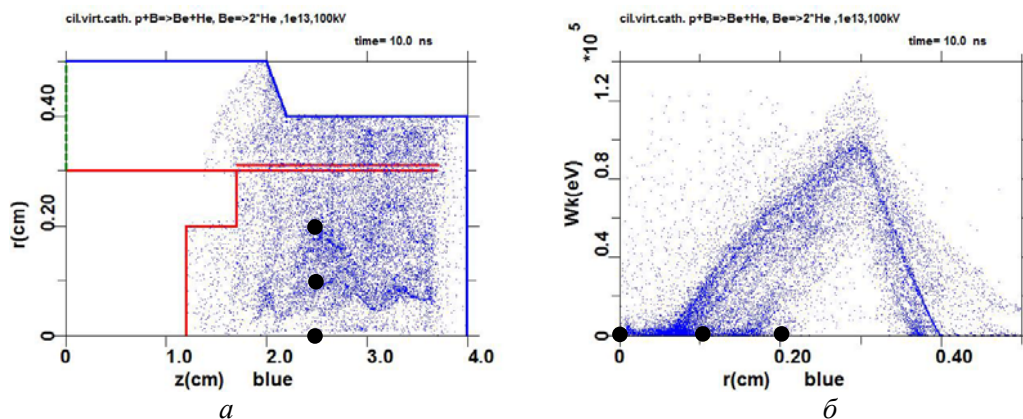


Рис. 1. а) – плотность электронов ВК в анодном пространстве, б) – энергия ускоренных (до $\approx 100 \text{ кэВ}$) и далее тормозящихся электронов в анодном пространстве по мере их приближения к оси разряда. Отмечены выбранные точки по радиусу, для которых показаны концентрации заряженных частиц во времени на рис. 3 ниже.

Потенциальная яма внутри анодного пространства, соответствующая облаку электронов ВК к 10-й нс расчёта, приведена на рис. 2, а. Глубина ПЯ составляет ≈ 100 кВ. Напомним, что в реальном эксперименте Pd анодные трубки наполнены водородом, а их поверхность со сложным микрорельефом покрыта наночастицами бора [21]. При облучении энергичным пучком электронов, в анодном пространстве на краю ПЯ появятся протоны и ионы бора. (В PiC-моделировании анодная «трубка», полочка на рис. 1, а, также «наполняется» протонами и ионами бора, для которых ограничимся зарядом +3 [21]). Далее, ускоряясь по радиусу в поле ВК, протоны и ионы бора начнут осциллировать в ПЯ, которая будет их также и удерживать в процессе осцилляций.

Осцилляторное удержание проиллюстрировано на рис. 2, б, где приведена зависимость энергии отдельных выделенных групп протонов (индекс r) и ионов бора (индекс y) в ПЯ от времени. Электродинамическое моделирование отражает действительно осцилляторный характер удержания протонов и ионов бора в ПЯ: максимальная энергия зарядов соответствует моменту их прилёту к оси разряда, нулевая – окончанию их торможения в ПЯ и развороту вниз у её верхнего края. В силу разницы масс и заряда, частоты колебаний протонов и ионов бора будут отличаться (рис. 2, б). Для эффективности синтеза это

хуже, чем для осцилляций ионов с одинаковой массой (например, дейтронов [15, 31]). Тем не менее, встречные столкновения на оси разряда и в её окрестности при достаточных энергиях заряженных частиц могут приводить к реакции $p+^{11}\text{B}$, что сопровождается выходом α частиц, зарегистрированных в эксперименте [21]. Таким образом, рис. 1, 2 иллюстрируют ключевую роль образования виртуального катода, и соответствующей ему глубокой ПЯ, в цепочке основных событий, приводящих к анейтронному синтезу $p + ^{11}\text{B}$ в НВР.

Перейдём к анализу квазинейтральности рВ плазмы при осцилляторном удержании. На рис. 3, а–в показаны изменения во времени концентраций электронов, протонов и ионов бора для трёх фиксированных точек по радиусу разряда $r = 0, 0,1$ и $0,2$ см при $Z = 2,5$ см (приведенные на рис. 3 кривые получены расчётным усреднением по области $\pm 0,05$ см, примыкающей к выбранной точке по радиусу, рис. 1). Для лучшего разрешения во времени, здесь мы ограничимся временным интервалом лишь в 10 нс, за это время разряд переходит в стационарный режим (рис. 2, б) и успевают сформироваться и проявиться особенности пространственного заряда в анодной области НВР. На рис. 1, 2 отмечены точки в этой области по радиусу, для которых приведены зависимости плотности зарядов (рис. 3, а–б, и ниже обсуждается степень нейтральности плазмы.

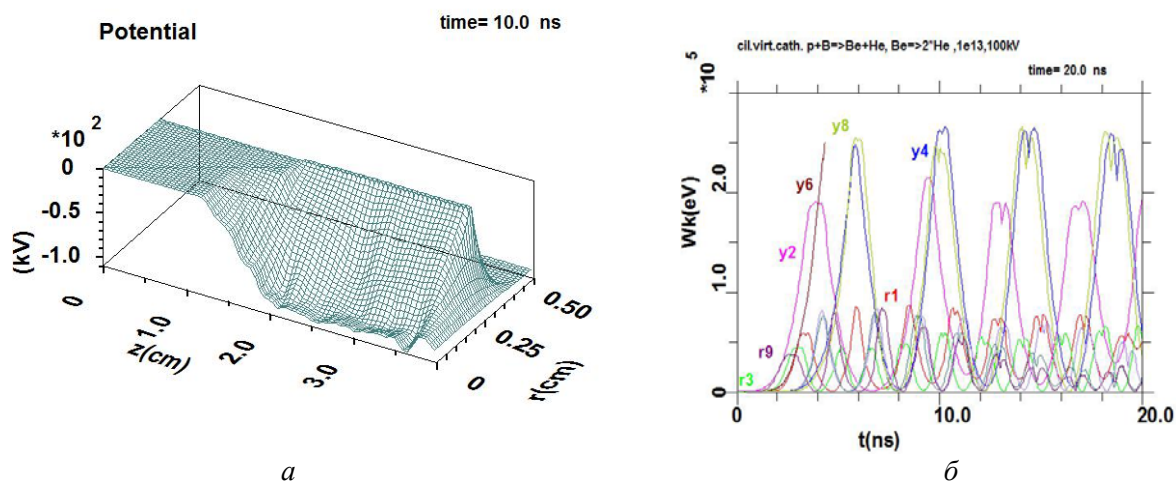


Рис. 2. а) – потенциальная яма (ПЯ) виртуального катода (ВК), б) – зависимость энергии выделенных групп протонов (индекс r) и ионов бора с зарядом +3 (индекс y) от времени в процессе их осцилляций в ПЯ.

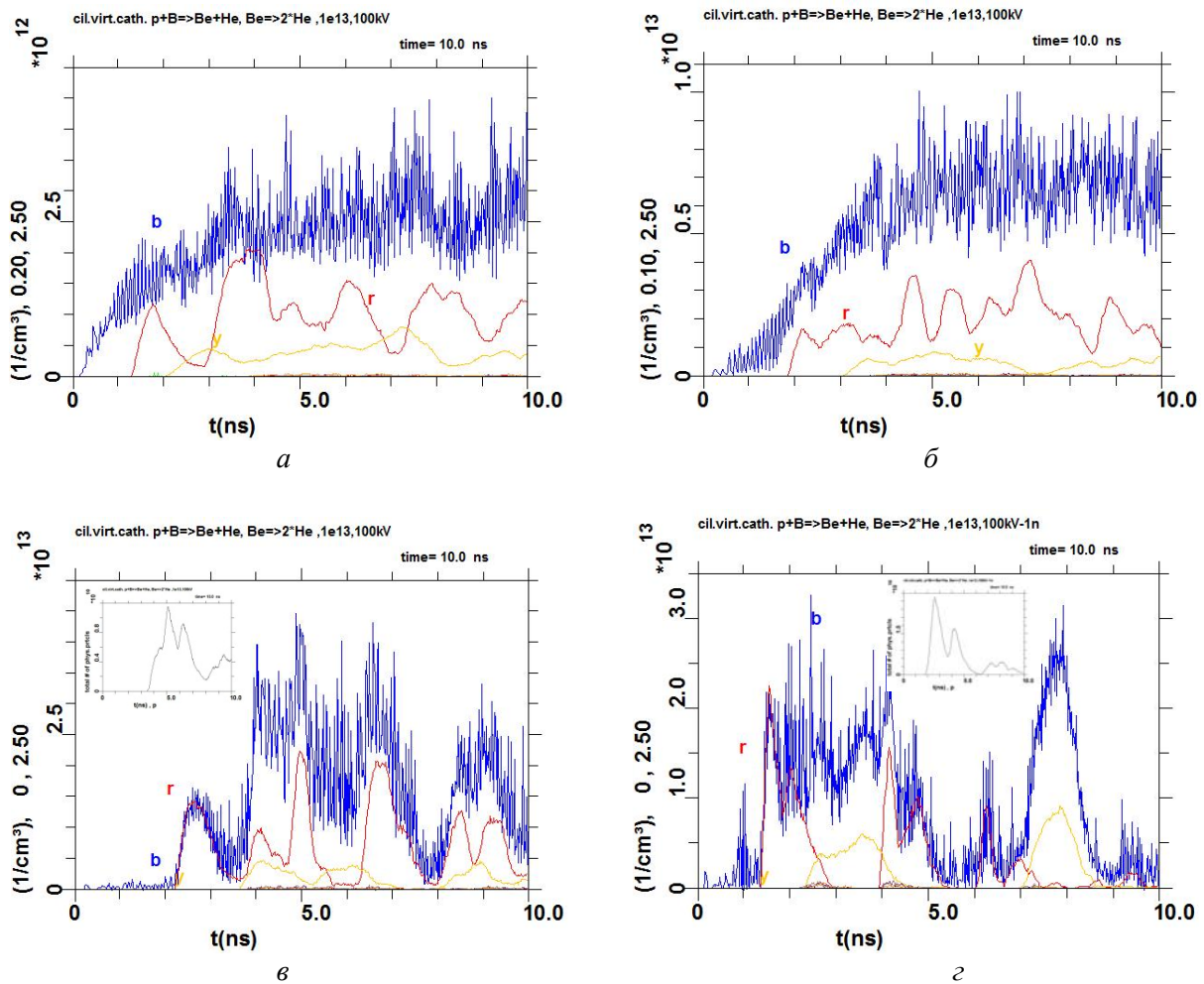


Рис. 3. PiC-моделирование реакции $p+^{11}\text{B}$ в НВП. Зависимости концентрации заряженных частиц в выбранных точках анодного пространства от времени для приложенного импульса напряжения $U = 100$ кВ с фронтом 5 нс при $Z = 2,5$ см: а) $r = 0,2$ см, б) $r = 0,1$ см, в) $r = 0$ см; г) $r = 0$ см для $U = 100$ кВ с фронтом 1 нс (точки по радиусу r отмечены для наглядности и на рис. 1). Синие кривые – электроны (b), красные – протоны (r), жёлтые – ионы бора с зарядом +3(y). Вставки на рис. 3, в) и 3, г) – выход α частиц из реакции $p+^{11}\text{B}$.

Результат на рис. 3, а соответствует самой удалённой от оси разряда точке, $r = 0,2$. Плотность электронов ВК даёт кривая b, кривые r и y соответствуют плотности протонов и ионов бора. Мы видим, что электронов в области $r = 0,2$ см будет несколько больше во всём интервале времени. В момент $t = 4$ нс в эту область прилетят первые протоны, а ионы бора в силу большей массы появятся позже. Для качественной оценки степени квазинейтральности с помощью приведенного графика (рис. 3, а), нужно в выбранный момент времени добавить к концентрации протонов (красная кривая) плотность ионов бора (жёлтая кривая), умноженную на их заряд +3, и мысленно вычесть полученное из концентрации электронов (синяя кривая). В те повторяющиеся моменты, когда наблюдаются пульсации

плотности протонов, суммарная плотность ионов будет близка к плотности электронов, $n_i(t) \approx n_e(t)$, т. е. плазма будет квазинейтральна. Здесь и в дальнейшем, по аналогии с [12], для характеристики степени квазинейтральности плазмы можно ввести параметр $\eta = n_{i0} / n_{e0}$, где n_{i0} – начальная плотность ионов, $n_{e0} = n_e - n_i$ – электронная плотность, образующая ВК однородной плотности (n_e и n_i – концентрации электронов и ионов, соответственно, зависящие в общем случае от времени и координаты). В квазинейтральном пределе $n_{e0} \rightarrow 0$, и формально получим $\eta \rightarrow \infty$ [12].

В следующей точке $r = 0,1$ плотность электронов в среднем в два раза больше, чем в предыдущем случае ($r = 0,2$). В этой точке ионы заметно ускоряются в ПЯ, и квазинейтральность оказывается несколько хуже.

И, наконец, на оси разряда (рис. 3, в, $r = 0$), где n_e на порядок больше, чем для случая $r = 0,2$, мы видим, что кривая плотности электронов практически огибает во времени суммарную плотность ионов. То есть плазма на оси разряда квазинейтральна не в отдельные моменты времени, как на рис. 3, а, а в течении почти всего времени «наблюдения», 10 нс (рис. 3, в). Выход α частиц во времени, с первым максимумом при $t \approx 5$ нс, приведен на вставке на рис. 3, в.

В моделировании и эксперименте с НВР было замечено, что процессы, приводящие к ядерному синтезу, оказываются чувствительными к величине фронта приложенного напряжения. Для сравнения, на рис. 3, г дана плотность заряженных частиц на оси разряда при фронте напряжения 1 нс ($U = 100$ кВ). Здесь, как и на рис. 3, в, плотность электронов огибает суммарную плотность ионов, и плазма на оси разряда тоже квазинейтральна во всём интервале времени, начиная с $t \approx 3$ нс. Сгустки плотностей протонов и ионов бора более изолированы и ярко выражены, чем на рис. 3, в. Выход α частиц начинается раньше ($t \approx 3$ нс, вставка на рис. 3, г), а полный их выход оказывается примерно вдвое больше, чем при фронте U в 5 нс.

Таким образом, можно оценить, что в отдельных областях анодного пространства с ВК в некоторые моменты времени (рис. 3, а–г), величина η достигает локальных значений ~ 10 – 100 в процессе осцилляций заряженных частиц в ПЯ, а на оси разряда и вблизи величина $\eta \sim 100$ достигается в первые 3–4 нс и почти не меняется во времени.

3. Схема ПОПС и её ограничения. Малые сжатия в квазинейтральном пределе в НВР

Теоретические работы по осциллирующей плазме появились в конце 90-х гг. прошлого века [7, 8], и концепция ПОПС была большим шагом вперёд в развитии схемы ИЭУ и, в целом, многообещающей для термоядерного синтеза, включая идею многомодульного ИЭУ реактора с большим числом ПОПС микромодулей [9, 11]. В 2005 году эта схема осцилляций была продемонстрирована экспериментально для ионов H_2^+ , He^+ и Ne^+ в

схеме ИЭУ с сетками [9, 10]. В этих экспериментах ионы в виртуальном катоде проявляют резонансное поведение при движении на частотах ПОПС. Было получено масштабирование частоты осцилляций ν по массе ионов и глубине потенциальной ямы. Между наблюдаемой резонансной частотой ПОПС и теоретическими предсказаниями ($\nu \sim (\phi / r_{VC}^2 m_i)^{1/2}$) было получено хорошее согласие [9, 10]. В эксперименте с демонстрацией ПОПС величины U были небольшими, и пока речь не шла о ядерном DD-синтезе. При этом глубины ПЯ, полученные в эксперименте, не превышали величины 300 В, а частоты осцилляций ионов – 700 кГц. Эксперимент был удачным, но в то же время отдельная инжекция электронов, задание внешних резонансных с частотой ПОПС импульсов и т. п. делали его достаточно сложным (данных о ПОПС эксперименте [9] при высоких напряжениях нет).

Работы по ПОПС показали, что общая мощность термоядерного синтеза масштабируется как $P \sim \phi^2 \eta^2 \theta^2 / r_{VC}$, где ϕ – глубина ПЯ, $\eta \approx n_i / n_e \sim 0,1$ и $r_{VC} \sim a$ (a – радиус анодного пространства) [7, 9]. Было отмечено, что в оригинальной схеме ПОПС степень сжатия θ должна составить для возможной реакторной системы $\sim 10^3$. Однако, последующий более детальный анализ авторов ПОПС показал [12], что эти параметры не могут быть достигнуты одновременно с ограничениями, налагаемыми на степень сжатия в сферической геометрии.

В той же работе, где было теоретически показано, что схема ПОПС не пригодна для потенциального реактора, в заключительном разделе (Секция V, [12]) в качестве другого варианта осцилляций было предложено использовать небольшие сжатия в квазинейтральном пределе $\eta \rightarrow \infty$. Было отмечено, что это ведёт к устройству, отличающемуся от того, которое первоначально предполагалось для ПОПС. Для этого устройства колебания типа ПОПС в первую очередь являются механизмом резонансного нагрева ионов, а не когерентного сжатия (сжатие в новом устройстве будет небольшим). В отличие от сценария с ПОПС, в этих устройствах можно работать и со смесью дейтерия и трития.

Наше PiC-моделирование (раздел 2) показало, что плазма в НВР, и особенно на оси разряда, соответствует квазинейтральному режиму, где величина параметра $\eta \sim 100$. Сравнивая плотности зарядов в НВР в окрестности оси разряда (рис. 3, в) и вдали от оси (рис. 3, а), мы получим степень сжатия ~ 3 . Относительно величины θ в эксперименте с НВР, напомним, что при регистрации DD-нейтронов с самого начала были замечены довольно широкие во времени пики экстрарентгена (~ 12 нс), возникающие за счёт разлёта энергичных продуктов DD-реакции в моменты синтеза (канал 4, рис. 2, 3 в [17]). Относительно плавное нарастание экстрарентгена означало, что DD-синтез тоже нарастает постепенно, и начинается в областях анодного пространства, ещё далеких от оси НВР, что фактически указывает на небольшие степени сжатия. Недавно продемонстрированный анейтронный синтез $p+^{11}\text{B}$ [21], т. е. работа со смесью различных масс, обсуждавшаяся в [12], также косвенно подтверждает квазинейтральный режим плазмы в НВР.

После отказа от ПОПС [12], предложенные там же малые осцилляции в квазинейтральном режиме оставляли всё же некоторую надежду на ядерный синтез в осциллирующей плазме. Интересно, что эксперимент по DD-синтезу в НВР [14, 15, 23], где были фактически продемонстрированы маломасштабные осцилляции дейтронов (через пульсирующий выход нейтронов, рис. 4 в [14]), появился несколько раньше, чем работа [12]. Отметим, что несмотря на различную физику ПОПС и малых осцилляций в НВР, обсуждавшийся ранее для ПОПС благоприятный скейлинг мощности синтеза, внешне, по-видимому, почти сохранится и для осцилляторного удержания в НВР, где для цилиндрической геометрии получим $P \sim \varphi^2 \eta^2 \theta l / ne^2 r_{\text{VC}}^2$ (l – длина цилиндра, e – заряд электрона). При этом сами величины входящих в P параметров будут сильно различаться. Для ПОПС имеем $\eta \sim 0,1$ и $\theta \sim 10^3$ [7, 9], в то время как для осцилляторного удержания получим $\eta \sim 100$ и $\theta \leq 10$, а также характерные для миниатюрного НВР величины $r_{\text{VC}} \sim 0,1$ и $\varphi \sim 100$ кВ (рис. 16, рис. 2, а), необходимые для высокой мощности синтеза.

4. Заключительные замечания

Несмотря на относительную простоту устройств ИЭУ с обратной полярностью, их эволюция идёт довольно медленно. Устройство с непараболической потенциальной ямой, похожее на НВР (в сечении по радиусу), было предложено в одной из самых первых теоретических работ по ИЭУ в 1959 г. [1]. В ней рассматривалась симметричная инжекция электронов в открытый полый сферический анод, которая создавала бы отрицательный электростатический потенциал в центре анода. Такая ПЯ могла бы обеспечить схождение радиальных потоков ионов к центру, где в самом фокусе возможно достижение высокой плотности ионов. Авторы [1] отмечали, что данную схему вряд ли можно будет реализовать как полноценный термоядерный реактор, но «она может быть пригодна для получения малых объёмов термоядерной плазмы для исследований» [1]. Предложенная через 40 лет после работы [1] схема ИЭУ с ПОПС, с тепловым облаком ионов, погруженных в электронный ВК, где формируется потенциал гармонического осциллятора [7, 8], обещает в теории эффективность, необходимую даже для выработки энергии термоядерного синтеза. Однако, продвинуться далее в эксперименте в схеме ПОПС с термальными ионами и реализовать предсказанный скейлинг мощности синтеза пока не удаётся [2, 9, 12]. На сегодня, продолжая отмеченные исследования ИЭУ с обратной полярностью, за последние 15 лет нам удалось, опираясь на электродинамическое моделирование [15, 16, 19], экспериментально реализовать в миниатюрном НВР с осцилляторным удержанием как DD-синтез [14, 17, 20], так и анейтронный синтез $p+^{11}\text{B}$ [21]. Осцилляции в НВР являются, по-видимому, механизмом резонансного нагрева ионов, а не когерентного сжатия, как для ПОПС.

Как показало проведенное в данной работе PiC-моделирование, в отличие от схемы с ПОПС [12], нейтрализация пространственного заряда имеет свою специфику при осцилляторном удержании. Степень квазинейтральности плазмы в анодном пространстве НВР может меняться во времени по радиусу (рис. 3, а, б), и в частности, вне оси разряда в те моменты осцилляций зарядов, когда плотности протонов максимальны, плазма бу-

дет почти квазинейтральна. В остальное время вне оси преобладает пространственный заряд электронов. На самой оси разряда плазма оказывается практически нейтральной (рис. 3, в, з), и это не противоречит существованию самой ПЯ (рис. 2, а), поскольку последняя создаётся всем объёмным зарядом анодного пространства. Поскольку синтез $p+^{11}\text{B}$ имеет место на оси разряда или её окрестностях, скейлинг мощности синтеза в НВР будет соответствовать малым осцилляциям в квазинейтральном режиме (раздел 3).

Тот факт, что в НВР экспериментально реализован анейтронный синтез $p+^{11}\text{B}$, где задействованы ионы существенно разных масс [21], также подтверждает, что наша схема осцилляторного удержания использует небольшие осцилляции типа ПОПС для нагрева плазмы именно в квазинейтральном режиме [12]. Энергия ускоряемых ионов близка к энергии инжектируемых электронов в схеме НВР, что обеспечивает её определённую стабильность [1, 12], хотя функция распределения ионов по энергиям остаётся в НВР немаксвелловской [15, 18]. В связи с последним, подчеркнём, что в имеющемся на сегодня эксперименте с НВР [15, 17, 20], время пролёта ионами объёма всего анодного пространства оказывается меньше времени, необходимого для ион-ионной релаксации при схождении ионов к оси разряда [19]. В результате, по-видимому, мы имеем в НВР не микрообъёмы термоядерной плазмы, типа предсказанных ранее в [1], а наблюдаем DD-синтез [15] и анейтронный синтез $p+^{11}\text{B}$ [21] в неравновесной плазме [31], остающейся «незажжённой» на оси разряда.

ЛИТЕРАТУРА

1. Elmore W. C., Tuck J. L., Watson K. M. // Phys. Fluids. 1959. Vol. 2. P. 239.
2. Miley G. H., Murali S. K. Inertial Electrostatic Confinement (IEC) Fusion Fundamentals and Applications. – NY.: Springer, 2014.
3. Lavrent'ev O. A. // Ukrainian Phys. Journ. 1963. Vol. 8. P. 440.
4. Lavrent'ev O. A. // Ann. NY Acad. Sci. 1975. Vol. 251. P. 152.
5. Bondarenko B. D. // Uspekhi Phys. Nauk. 2001. Vol. 171. P. 886.

6. Hirsch R. L. // J. Appl. Phys. 1967. Vol. 38. P. 4522.
7. Nebel R. A., Barnes D. C. // Fusion Technol. 1998. Vol. 34. P. 28.
8. Barnes D., Nebel R. // Phys. Plasmas. 1998. Vol. 5. P. 2498.
9. Park J., Nebel R. A., Stange S., Murali S. K. // Phys. Plasmas. 2005. Vol. 12. P. 056315.
10. Park J., Nebel R. A., Stange S., Murali S. K. // Phys. Rev. Lett. 2005. Vol. 95. P. 015003.
11. Park J., Nebel R. A., Aragonz R. et al. Innovative Confinement Concepts Workshop. – USA, Texas, Austin, February 13–16, 2006) Proceedings <http://icc2006.ph.utexas.edu/proceedings.php>
12. Evstatiev E., Nebel R., Chacon L., Park J., Lapenta G. // Phys. Plasmas. 2007. Vol. 14. P. 042701.
13. Chacon L., Miley G., Barnes D., Knoll D. // Phys. Plasmas. 2000. Vol. 7. P. 4547.
14. Kurilenkov Yu. K., Skowronek M., Dufty J. // J. Phys. A: Math. Gen. 2006. Vol. 39. P. 4375.
15. Kurilenkov Yu. K., Tarakanov V. P., Skowronek M., Guskov S. Yu., Dufty J. // J. Phys. A: Math. Theor. 2009. Vol. 42. P. 214041.
16. Kurilenkov Yu. K., Tarakanov V., Gus'kov S. Yu. // Plasma Phys. Rep. 2010. Vol. 36. P. 1227.
17. Kurilenkov Yu. K., Tarakanov V., Gus'kov S. Yu. et al. // Contrib. Plasma Phys. 2011. Vol. 51. P. 427.
18. Kurilenkov Yu. K., Tarakanov V., Gus'kov S. Yu., Samoylov I. S., Ostashev V. E. // J. Phys.: Conf. Ser. 2015. Vol. 653. P. 012026.
19. Gus'kov S. Yu., Kurilenkov Yu. K. // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. Vol. 774. P. 012132.
20. Kurilenkov Yu. K., Tarakanov V., Gus'kov S. Yu., Oginov A., Karpukhin V. // Contrib. Plasma Phys. 2018. Vol. 58. P. 952.
21. Kurilenkov Yu. K., Oginov A. V., Tarakanov V. P., Gus'kov S. Yu., Samoylov I. S. // Physical Review E. 2021. Vol. 103. P. 043208.
22. Kurilenkov Yu. K., Skowronek M., Louvet G., Rukhadze A., Dufty A. // Journal de Physique IV. 2000. Vol. 10. P. Pr5–409.
23. Kurilenkov Yu. K., Skowronek M. // Pramana J. Phys. 2003. Vol. 61. P. 1188.
24. Tarakanov V. P. // EPJ Web Conf. 2017. Vol. 149. P. 04024.
25. Kurilenkov Yu. K., Tarakanov V., Gus'kov S. Yu. // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. Vol. 774. P. 012133.
26. Varaksin A. Yu. // Doklady Physics. 2021. Vol. 66. P. 72.
27. Giuffrida L., Belloni F., Margarone D. et al. // Physical Review E. 2020. Vol. 101. P. 013204.
28. Беляев В. С., Матафонов А. П., Крайнов В. П. и др. // Ядерная физика. 2020. Т. 83. № 5. С. 370.
29. Демченко Н. Н., Беляев В. С., Матафонов А. П. и др. // ЖЭТФ. 2019. Т. 156. С. 428.
30. Bonvalet J., Nicolai Ph., Raffestin D. et al. // Physical Review E. 2021. Vol. 103. P. 053202.
31. Hirsch R. L. 14th U.S.-Japan IECF Workshop, Maryland USA, October 14–17 (2012), <http://www.aero.umd.edu/sedwick/posters.html>.

On the plasma quasineutrality under oscillatory confinement based on a nanosecond vacuum discharge

*Yu. K. Kurilenkov^{1,2}, V. P. Tarakanov¹, A. V. Oginov², S. Yu. Gus'kov²,
and I. S. Samoylov¹*

¹ Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences
Bd. 2, 13 Izhorskaya st., Moscow, 125412, Russia
E-mail: kurilenkovyuri@gmail.com

² Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences
53 Leninskii Prospect, Moscow 119991, Russia

Received November 01, 2021

One of the main problems for inertial electrostatic confinement devices with electron injection is the space charge neutralization. This work is devoted to the analysis of the problem of plasma quasineutrality in the scheme of plasma oscillatory confinement based on nanosecond vacuum discharge (NVD). Electrodynamics modeling of the processes of aneutronic fusion of proton–boron showed that the plasma in the NVD, and especially on the discharge axis, really corresponds to a quasineutral regime, which is rather different from the well-known scheme of periodically oscillating plasma spheres (POPS). In this case, small oscillations in the NVD are a mechanism of resonant ion heating, unlike coherent compressions in the original POPS model. The scaling of the fusion power turns out to be close to the fusion scheme with POPS, but differs significantly in the values of the parameter of quasineutrality and the compression ratio.

Keywords: vacuum discharge, virtual cathode, oscillatory confinement, nuclear fusion, scaling of fusion power.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-6-14-23

REFERENCES

1. W. C. Elmore, J. L. Tuck, and K. M. Watson, *Phys. Fluids* **2**, 239 (1959).
2. G. H. Miley and S. K. Murali, *Inertial Electrostatic Confinement (IEC) Fusion Fundamentals and Applications* (Springer, NY, 2014).
3. O. A. Lavrent'ev, *Ukrainian Phys. Journ.* **8**, 440 (1963).
4. O. A. Lavrent'ev, *Ann. NY Acad. Sci.* **251**, 152 (1975).
5. B. D. Bondarenko, *Uspekhi Phys. Nauk* **171**, 886 (2001).
6. R. L. Hirsch, *J. Appl. Phys.* **38**, 4522 (1967).
7. R. A. Nebel and D. C. Barnes, *Fusion Technol.* **34**, 28 (1998).
8. D. Barnes and R. Nebel, *Phys. Plasmas* **5**, 2498 (1998).
9. J. Park, R. A. Nebel, S. Stange, and S. K. Murali, *Phys. Plasmas* **12**, 056315 (2005).
10. J. Park, R. A. Nebel, S. Stange, and S. K. Murali, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 015003 (2005).
11. J. Park, R. A. Nebel, R. Aragonz et al., *Innovative Confinement Concepts Workshop* (USA, Texas, Austin, February 13–16, 2006) Proceedings <http://icc2006.ph.utexas.edu/proceedings.php>
12. E. Evstatiev, R. Nebel, L. Chacon, J. Park, and G. Lapenta, *Phys. Plasmas* **14**, 042701 (2007).
13. L. Chacon, G. Miley, D. Barnes, and D. Knoll, *Phys. Plasmas* **7**, 4547 (2000).
14. Yu. K. Kurilenkov, M. Skowronek, and J. Dufty, *J. Phys. A: Math. Gen.* **39**, 4375 (2006).

15. Yu. K. Kurilenkov, V. P. Tarakanov, M. Skowronek, S. Yu. Gus'kov, and J. Dufty, *J. Phys. A: Math. Theor.* **42**, 214041 (2009).
16. Yu. K. Kurilenkov, V. Tarakanov, and S. Yu. Gus'kov, *Plasma Phys. Rep.* **36**, 1227 (2010).
17. Yu. K. Kurilenkov, V. Tarakanov, S. Yu. Gus'kov et al., *Contrib. Plasma Phys.* **51**, 427 (2011).
18. Yu. K. Kurilenkov, V. Tarakanov, S. Yu. Gus'kov, I. S. Samoylov, and V. E. Ostashev, *J. Phys.: Conf. Ser.* **653**, 012026 (2015).
19. S. Yu. Gus'kov and Yu. K. Kurilenkov, *J. Phys.: Conf. Ser.* **774**, 012132 (2016).
20. Yu. K. Kurilenkov, V. Tarakanov, S. Yu. Gus'kov, A. Oginov, and V. Karpukhin, *Contrib. Plasma Phys.* **58**, 952 (2018).
21. Yu. K. Kurilenkov, A. V. Oginov, V. P. Tarakanov, S. Yu. Gus'kov, I. S. Samoylov, *Physical Review E* **103**, 043208 (2021).
22. Yu. K. Kurilenkov, M. Skowronek, G. Louvet, A. Rukhadze, and A. Dufty, *Journal de Physique IV* **10**, Pr5–409 (2000).
23. Yu. K. Kurilenkov and M. Skowronek, *Pramana J. Phys.* **61** 1188 (2003).
24. V. P. Tarakanov, *EPJ Web Conf.* **149**, 04024 (2017).
25. Yu. K. Kurilenkov, V. P. Tarakanov, and S. Yu. Gus'kov, *J. Phys.: Conf. Ser.* **774**, 012133 (2016).
26. A. Yu. Varaksin, *Doklady Physics* **66**, 72 (2021).
27. L. Giuffrida, F. Belloni, D. Margarone et al., *Physical Review E* **101**, 013204 (2020).
28. V. S. Belyaev, A. P. Matafonov, V. P. Krainov et al., *Physics of Atomic Nuclei* **83** (5), 370 (2020).
29. N. N. Demchenko, V. S. Belyaev, A. P. Matafonov et al., *JETP* **156**, 428 (2019).
30. J. Bonvalet, Ph. Nicolai, D. Raffestin et al., *Physical Review E* **103**, 053202 (2021).
31. R. L. Hirsch, in *14th U.S.-Japan IECF Workshop, Maryland USA, October 14–17* (2012), <http://www.aero.umd.edu/sedwick/posters.html>.