

ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОЕ УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ В ПЕРЕХОДНОМ РЕЖИМЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПЛАЗМЕННОЙ КИЛЬВАТЕРНОЙ ВОЛНЫ

Андреюк Николай Александрович (oefimova@otd13.vniief.ru), Пятаков Николай Петрович, Якутов Борис Петрович

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В работе представлен анализ результатов 3D численного моделирования кильватерного ускорения электронов в плазме гелия при воздействии на нее фемтосекундного лазерного импульса. Электроны ускорялись в гелиевой плазме однородной плотности $n_0 = 1,1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и длиной 5 мм. Энергия лазерного импульса была равна 2,4 Дж. В расчете реализовывался характерный для данных параметров bubble-режим ускорения (режим «пузыря»), который затем переходил в режим PWFA (возбуждение кильватерной волны электронным сгустком). В результате ускорения были получены электроны с энергией 850 МэВ. Расчеты были проведены при помощи релятивистского параллельного кода PLASMA-3P, разработанного во ВНИИЭФ, основанного на методе «частиц в ячейках» (particle-in-cell, PIC). В работе представлен анализ результатов расчета, показаны характерные особенности данного режима ускорения.

Ключевые слова: физика плазмы, метод частиц в ячейках, лазерно-плазменное ускорение электронов, плазменная кильватерная волна.

LASER-PLASMA ELECTRON ACCELERATION IN TRANSITIONAL REGIME OF PLASMA WAKEFIELD EXCITATION

Andreyuk Nikolai Aleksandrovich (oefimova@otd13.vniief.ru), Pyatakov Nikolai Petrovich, Yakutov Boris Petrovich

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

The paper presents the analysis of a 3D numerical simulation of electron wakefield acceleration in helium plasma driven by femtosecond laser pulse. Electrons were accelerated in helium plasma with uniform density $n_0 = 1.1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ and length 5 mm. The laser pulse energy was 2.4 J. The simulation implemented the bubble-regime of acceleration typical for such parameters of laser pulse and plasma which was then changed over to a PWFA-regime (wakefield excitation driven by electron bunch). The electron maximum energy gain was 850 MeV after acceleration. The simulation was carried out in the relativistic parallel PIC-based code PLASMA-3P, developed in VNIIEF. The paper gives the analysis of the results of simulation, shows typical features of this regime of laser-plasma electron acceleration.

Key words: plasma physics, particle-in-cell method, laser-plasma electron acceleration, plasma wakefield.

Введение

В настоящее время в экспериментах на мощных фемтосекундных лазерных установках получены пучки электронов гигаэлектронвольтного диапазона энергий в плазме на участках сантиметровой длины [1]. Рекордным на текущий момент является значение энергии 7,8 ГэВ у электронов, ускоренных в плазме

на длине 20 см лазерным импульсом, мощностью 0,85 ПВт, полученных на установке BELLA в Национальной лаборатории им. Лоренса в Беркли [2]. Научные и технологические возможности, которые открываются при использовании лазерно-плазменных методов ускорения, представляют значительный практический интерес, что привело к их широкому теоретическому и экспериментальному

изучению. Благодаря своей компактности и относительно небольшой стоимости по сравнению с традиционными ускорителями, данный тип установок планируется использовать для многих научных, технических и медицинских приложений [3]. Одним из возможных применений ускоренных до релятивистских энергий электронов является их использование для генерации рентгеновского и гамма-излучения для целей радиографии.

Наиболее распространенным методом ускорения, который используется в данных лазерно-плазменных установках, является лазерное кильватерное ускорение (LWFA – laser wakefield acceleration) и разновидности данного режима. При этом способе ускорения мощный фемтосекундный лазерный импульс, распространяясь в докритической плазме, возбуждает волну колебаний электронной плотности, идущую вслед за ним. В результате в плазме генерируются продольные электрические поля, ускоряющие электроны. Так как процесс возбуждения электронной плазменной волны лазерным импульсом в чем-то напоминает возбуждение кораблем волн на поверхности воды, то данный режим ускорения называют кильватерным.

Относительно недавно в литературе появились сведения об экспериментальном наблюдении гибридного режима, в котором режим лазерного кильватерного ускорения (LWFA) переходит в режим плазменного кильватерного ускорения (PWFA – plasma wakefield acceleration), и который отличается от предшествующего тем, что в качестве драйвера, генерирующего плазменную волну, выступает уже не лазерный импульс, а мощный сгусток заряженных частиц (в данном случае электронов).

Одной из первых подобных работ является статья [4]. В ней описан эксперимент, в котором при воздействии на однородную плазму гелия фемтосекундным лазерным импульсом с длительностью 30 фс и энергией 2,4 Дж электроны плазмы ускорились до энергии порядка ~ 1 ГэВ. Плотность плазмы была равна $1,1 \times 10^{19}$ см⁻³, длина – 5 мм. При данных параметрах лазерного излучения, плазмы характерной максимальной энергией ускоренных электронов является значение ~ 400 МэВ. Значительное превышение данной величины в эксперименте объясняется как раз переходом лазерного кильватерного ускорения в плазменное.

В данной работе представлен анализ результатов 3D численного моделирования ускорения электронов в плазме для параметров эксперимента, описанного в статье [4].

В расчете реализовывался характерный при этих параметрах bubble-режим кильватерного ускорения,

который затем переходил в режим PWFA (возбуждение кильватерной волны электронным сгустком). Электроны ускорялись до энергии свыше 800 МэВ.

Расчеты были проведены при помощи релятивистского параллельного кода PLASMA-3P, разработанного во ВНИИЭФ [4], основанном на методе «частиц в ячейках» (particle-in-cell, PIC). Численное моделирование в PIC-кодах проводится на основе хорошо известной физической модели полностью ионизированной бесстолкновительной плазмы, которая включает в себя релятивистские кинетические уравнения Власова для функций распределения ионов и электронов, а также уравнения Максвелла для электромагнитного поля.

В докладе представлено сравнение расчетных результатов с результатами, представленными в работе [4], описаны характерные особенности данного режима.

Гибридный режим генерации кильватерной волны

Впервые концепция лазерного кильватерного ускорения (LWFA) была предложена в работе [5] в 1979 г. Этот метод ускорения основан на том факте, что ультракороткий тераваттный лазерный импульс, распространяясь в докритической плазме, возбуждает сильные по амплитуде плазменные волны, которые могут захватить и ускорить электроны до высоких энергий. В зависимости от интенсивности лазерного импульса, плотности плазмы, существует несколько разновидностей данного режима. В последнее время большинство экспериментов проводят в так называемом режиме «выброса» электронов (blowout), другое название – режим «пузыря» (bubble), поскольку в нем электроны ускоряются до наибольших значений энергии, а также, можно получить моноэнергетические пучки электронов. В этом режиме происходит выталкивание электронов от оси распространения лазерного импульса в радиальных направлениях поперечной пондеромоторной силой лазерного излучения, в результате возникает трехмерная область («пузырь»), почти свободная от электронов. Данный пузырь, заполненный ионами, окружен оболочкой релятивистских электронов, некоторые из которых могут быть захвачены электрическим полем волны и ускорены до высоких энергий. На рис. 1 показано изображение распределения плотности электронов гелиевой плазмы в bubble-режиме ускорения, полученное в одном из расчетов.

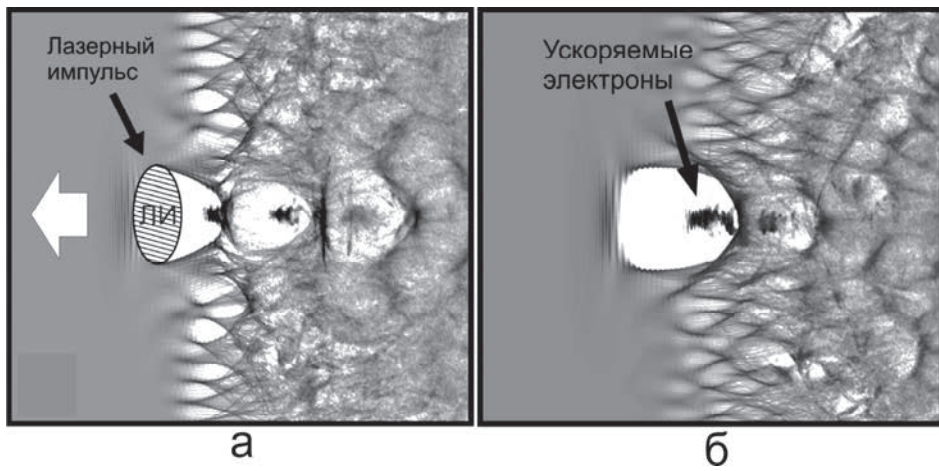


Рис. 1. Картина распределения плотности в режиме лазерного кильватерного ускорения (bubble-режим), полученная в расчете по коду PLASMA-3P: а – момент времени, когда лазерный импульс прошел в плазме расстояние 0,5 мм; б – момент времени, когда лазерный импульс прошел в плазме расстояние 0,62 мм. В расчете лазерный импульс движется влево

На рис. 1,а и рис. 1,б хорошо видно, как электроны втягиваются в область избыточного положительного заряда – происходит самоинжекция электронов в пузырь. Более темным цветом на рисунке показана повышенная плотность электронов в плазме, более светлым – пониженная (по сравнению с начальной плотностью гелиевой плазмы $n_e = 1,1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$). Видно, что внутри «пузыря» плотность электронов практически нулевая и ускоряемые электроны втягиваются в эту область, формируя плотный сгусток. Продольное электрическое поле, ускоряющее электроны в направлении распространения лазерного излучения, для рис. 1,а достигает значения $\sim 1 \times 10^{10} \text{ В/см}$. Понятно, что пока электроны будут находится под действием этого поля, их энергия будет расти. Однако, в режиме LWFA существует два основных ограничения. Первое вызвано дефазировкой электронов в кильватерной волне, второе – истощением лазерного импульса. Дефазировка электронов из области ускоряющего поля возникает вследствие того, что их скорость по мере увеличения энергии продолжает расти и стремится к скорости света $v_e \rightarrow c$. Скорость же движения «пузыря» (кильватерной волны) равна групповой скорости лазерного импульса (при этом предполагается, что плотность плазмы много меньше критической плотности):

$$v_g \approx c(1 - \omega_l^2 / 2\omega_{pl}^2), \quad (1)$$

где c – скорость света, ω_l – несущая частота лазерного импульса, ω_{pl} – плазменная частота ($\omega_{pl} = (4\pi n_e e^2 / m_e)^{1/2}$, n_e – начальная плотность электронов плазмы, e – заряд электрона, m_e – масса электрона). В результате, электроны могут обогнать плазменную волну и перейти в область с тормозящим продольным электрическим полем. Длину участка плазмы, где происходит только ускорение электронов, принято называть длиной

дефазировки – L_d , ее можно оценить следующим образом [1]:

$$L_d \approx \frac{(\pi c / 2\omega_{pl})c}{v_e - v_g} \approx \frac{\pi c}{\omega_{pl}} \frac{\omega_l^2}{\omega_{pl}^2}. \quad (2)$$

В нашем случае, при плотности плазмы $n_e = 1,1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и длине волны лазерного импульса $\lambda_l = 0,8 \text{ мкм}$, длина дефазировки равна $L_d \approx 800 \text{ мкм}$. По мере движения в плазме, лазерный импульс тратит энергию на возбуждение кильватерной волны и постепенно истощается, с чем связан второй параметр – длина истощения лазерного импульса L_{pd} . Она может быть оценена следующим образом [6]:

$$L_{pd} \approx c\tau_l \frac{\omega_l^2}{\omega_{pl}^2}, \quad (3)$$

где τ_l – длительность лазерного импульса. Для наших параметров эксперимента $L_{pd} \approx 1400 \text{ мкм}$.

Видно, что и длина дефазировки и длина истощения излучения намного меньше общей длины гелиевой плазмы, использовавшейся в эксперименте (общая длина мишени – $5 \text{ мм} = 5000 \text{ мкм}$). Однако и в эксперименте, описанном в работе [4], и в наших расчетах энергия электронов продолжает расти на второй половине длины мишени. Это объясняется тем, что после режима LWFA в плазме начинается ускорение в режиме PWFA, в котором драйвером для плазменной волны служит уже не лазерный импульс, а мощный сгусток электронов. Таким образом, возникает гибридный режим, сочетающий в себе оба процесса генерации кильватерной волны. На рис. 2 представлено изображение распределения плотности электронов гелиевой плазмы в режиме ускорения PWFA, полученное на длине плазмы $\sim 3,2 \text{ мм}$.

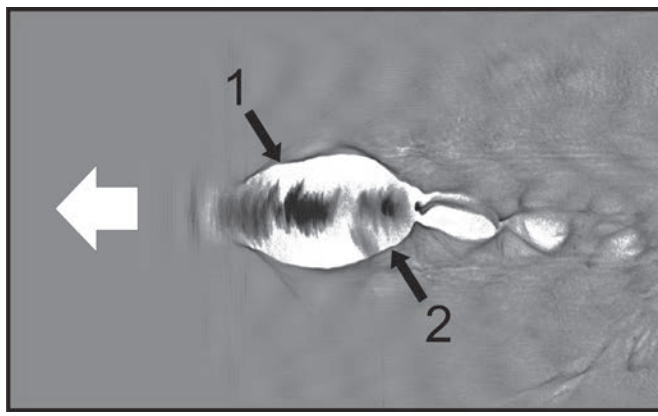


Рис. 2. Картина распределения плотности в режиме плазменного кильватерного ускорения (PWFA), полученная в расчете по коду PLASMA-3P: 1 – «драйвер» (электронный сгусток), возбуждающий волну; 2 – ускоряющиеся электроны. Стрелкой на рисунке показано направление движения кильватерной волны. От начала расчета кильватерная волна прошла в плазме 3,2 мм

Из рис. 2 видно, что в режиме PWFA заметно изменилась форма «пузыря» – она вытянулась в соответствии с размерами сгустка электронов, потому что именно его электрическое поле возбуждает плазменную волну на данном этапе. Причем в этом режиме фазовая скорость кильватерного следа совпадает со скоростью электронного пучка (драйвера) и, таким образом, не зависит от плотности плазмы. Следовательно, дефазировка между ускоряемыми электронами и драйвером наступает только в том случае, когда пучок электронов достигает энергий и скоростей больших, чем пучок, выступающий в роли драйвера. Данное различие является важным преимуществом режима PWFA в сравнении с LWFA, в остальном механизм ускорения остается тем же.

Постановка задачи и метод расчета

Численное моделирование проводилось при помощи трехмерного релятивистского параллельного PIC-кода PLASMA-3P, разработанного во ВНИИЭФ [7].

PIC-коды (Particle-In-Cell) – математические программы, моделирующие взаимодействие лазерного излучения с бесстолкновительной плазмой путем решения системы уравнений Максвелла-Власова методом «частиц-в-ячейке».

В расчете моделировалось распространение в однородной гелиевой плазме лазерного импульса.

Общая длина плазмы составляла 5 мм. Из-за достаточно большой длины плазмы, расчеты проводились в режиме «окна». Начальные параметры лазерного импульса, плазмы соответствовали эксперименту, описанному в работе [4]. Расчетная область, плазменная мишень и система координат, принятая при моделировании, схематически показаны на рис. 3.

При численном моделировании расчетная область имела размеры $5080 \times 64 \times 64$ мкм по осям X, Y, Z. Лазерное излучение распространялось в отрицательном направлении оси X. В качестве мишени в моделировании использовалась однородная гелиевая плазма с размерами $5000 \times 64 \times 64$ мкм по осям X, Y, Z. Размеры «окна» были равны $120 \times 64 \times 64$ мкм по осям X, Y, Z. Расчетная сетка окна состояла из 600 млн. ячеек в окне, в моделировании участвовало ~1,2 млрд. частиц. Плотность плазмы была равна $n_e = 1,1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Лазерное излучение имело следующие параметры: длина волны $\lambda = 0,8$ мкм, гауссов профиль по времени и пространству, поляризация – линейная, длительность импульса на полувысоте от максимума (FWHM) $\tau = 30$ фс, диаметр пучка (FWHM) $d = 22$ мкм, энергия $e = 2,4$ Дж, интенсивность $I = 1,4 \times 10^{19} \text{ Вт/см}^2$, параметр силы волны $a_0 = eE_0 / (m_e c \omega_0) = 2,6$, где e – заряд электрона, m_e – масса электрона, c – скорость света, ω_0 – лазерная частота.

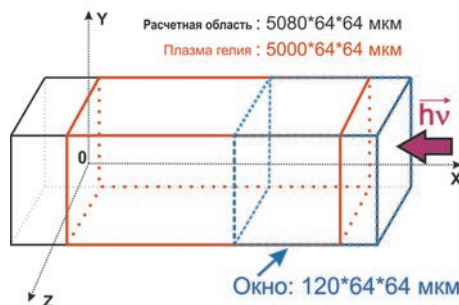


Рис. 3. Схема расчётной области, использовавшейся в численном моделировании

Результаты расчетов. Сравнение с экспериментом

На первом этапе расчета ускорение электронов проходит в bubble-режиме LWFA. Хорошо заметно как формируется область, свободная от электронов, самоинжекция ускоряемых электронов в «пузырь» начинается уже при длине ~ 400 мкм.

Поскольку мощность лазерного излучения в расчете – $P \approx \varepsilon / \tau = 80$ ТВт намного больше критической мощности релятивистской самофокусировки [8] – $P_{cr}(GW) = 17,4 n_{crit}/n_e = 2,7$ ТВт, где $n_{crit} = m_e \omega_0^2 / (4\pi e^2)$ – критическая плотность электронов плазмы, равная $1,74 \times 10^{21}$ см $^{-3}$ для длины волны лазерного излучения $\lambda = 0,8$ мкм (e – заряд электрона, m_e – масса электрона, ω_0 – лазерная частота), то практически сразу в плазме происходит самофокусировка лазерного излучения и амплитуда лазерного поля заметно увеличивается.

Соответственно увеличивается и размер «пузыря», на который также влияет и сгусток ускоряемых электронов. Примерно через 3400 фс после начала расчета, когда лазерный импульс прошел в плазме расстояние ~ 1 мм, электроны, которые первыми были втянуты в «пузырь», достигают середины полости и переходят в область тормозящего продольного электрического поля, что согласуется с выражением (2) для длины дефазировки – $L_d \approx 0,8$ мм. Максимальная энергия электронов при этом продолжает расти еще на участке приблизительно в 500 мкм, т. к.

благодаря большому заряду электронов в ускоряемом пучке, размеры пузыря дополнительно возрастают. Однако на момент времени 6000 фс, что соответствует расстоянию пройденному импульсом в $\sim 1,8$ мм, пузырь начинает сужаться в поперечном направлении, поскольку лазерный импульс достигает длины истощения $L_{pd} = 1,4$ мм (выражение (3)) и уже не может поддерживать генерацию кильватерной волны. На рис. 4 показаны три изображения распределения плотности электронов гелиевой плазмы, характеризующие первый этап ускорения электронов в расчете (bubble-режим LWFA).

Как видно из рис. 4, на первом этапе ускорения сформировался мощный пучок электронов, максимальная энергия его в этом случае достигает значения ~ 500 МэВ. Помимо лазерного импульса, электроны сами воздействуют на окружающую плазму, за счет чего «пузырь» растягивается в продольном направлении. Но максимальная энергия на данном этапе перестает расти, т. к. лазерный импульс достигает длины истощения, а также наступает дефазировка электронов, которые в том числе начинают разлетаться в поперечном направлении за счет кулоновского отталкивания, что хорошо видно на кадре для времени 7000 фс. На рис. 5 показаны три кадра плотности энергии электромагнитного поля, полученные в расчете для моментов времени 400, 2800 и 10000 фс. Лазерный импульс движется влево.

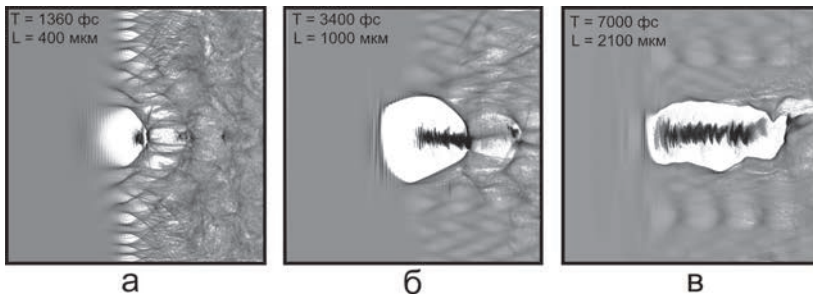


Рис. 4. Картина распределения плотности в режиме лазерного кильватерного ускорения (bubble-режим), полученная в расчете по коду PLASMA-3P. Кадры для расстояний, которые прошел импульс в плазме: а – 400 мкм, б – 1000 мкм, в – 2100 мкм. Более темным цветом показана повышенная плотность электронов в плазме, более светлым – пониженная (по сравнению с начальной плотностью)

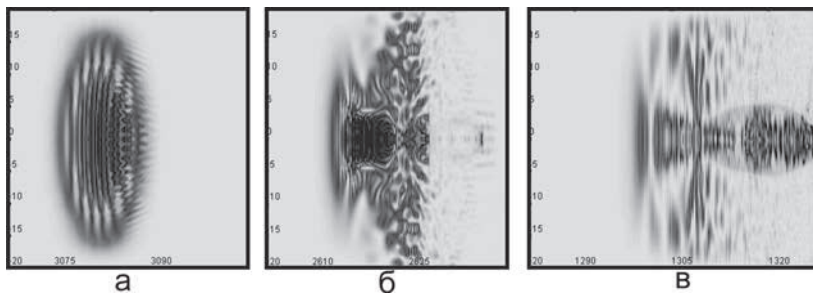


Рис. 5. Картина распределения плотности электромагнитного поля в режиме лазерного кильватерного ускорения (bubble-режим), полученная в расчете по коду PLASMA-3P. Распространение импульса в плазме: а – начальный момент на расстоянии ~ 100 мкм, время 400 фс; б – на расстоянии ~ 840 мкм, время 2800 фс; в – на расстоянии ~ 3000 мкм, время ~ 10000 фс

На рис. 5 видно как происходит самофокусировка и истощение лазерного импульса. Первоначальный размер лазерного пучка, который показан на рис. 5,а сокращается в ~ 4 раза в поперечном направлении при прохождении импульсом в плазме 840 мкм (рис. 5,б), амплитуда лазерного поля увеличивается при этом от 1×10^{11} В/см до 4×10^{11} В/см, а амплитуда продольного поля, ускоряющего электроны от 6×10^9 В/см до 1×10^{10} В/см. На рис. 5,в, который соответствует длине плазмы 3 мм видно, что лазерное поле уже истощилось и расплывается за счет дифракции, также на этом кадре хорошо заметно поле в правой части рис. 5,в, позади импульса, создаваемое сгустком электронов. Это изображение соответствует уже режиму PWFA, который хорошо заметен в расчете начиная с 7000 фс.

Поскольку плотность плазмы достаточно большая (для bubble-режима ускорения) – $n_e = 1,1 \times 10^{19}$ см $^{-3}$, на начальном этапе в «пузырь» самоинжектируется большое число электронов, которые, в итоге, формируют мощный сгусток. Это хорошо видно на рис. 4,в для времени 7000 фс. Электроны передней части этого пучка уже тормозятся и теряют энергию, те электроны, которые находятся в «хвосте» – напротив, еще ускоряются и догоняют первых. Таким образом, пучок группируется в один мощный сгусток, и на второй половине мишени, начиная с 2 мм и до конца, уже данные электроны становятся драйвером для кильватерной волны. Причем размер ускоряющей области в режиме PWFA становится больше в продольном направлении в соответствии с размерами драйвера. Максимальную энергию электронов достигаемую в расчете, порядка 850 МэВ, приобретает уже второй сгусток электронов, который ускоряется в режиме PWFA. Это хорошо видно на рис. 6, на котором представлены зависимости безразмерных импульсов электронов $p_x/m_e c$ от безразмерной длины $x\omega_p/c$, полученные на оси распространения лазерного излучения для трех моментов времени.

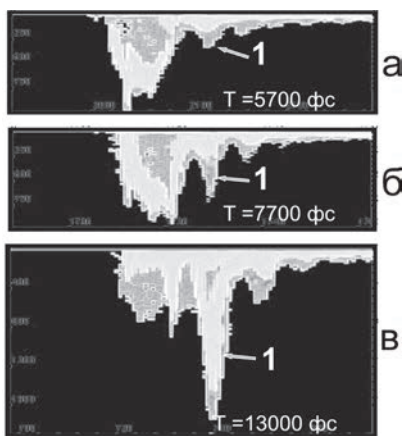


Рис. 6. Зависимость импульсов $p_x/m_e c$ электронов от координаты $x\omega_p/c$, полученные на оси распространения лазерного излучения для трех моментов времени: а – 5700 фс, б – 7700 фс, в – 13000 фс; 1 – сгусток электронов, ускоряющийся в режиме PWFA до энергии 850 МэВ

Поскольку в расчете излучение распространялось в отрицательном направлении оси X и электроны, соответственно, распространялись в отрицательном направлении, импульсы на рисунке имеют отрицательные значения. Как видно из рисунка, энергия первичного пучка электронов, который служит драйвером в режиме PWFA, не увеличивается во второй половине расчета. Пучок, который набирает энергию в режиме PWFA отмечен на рис. 6 цифрой 1. Он короче в продольном направлении первого пучка, но достигает значительно большей энергии – 850 МэВ. На рис. 7 представлена зависимость максимальной энергии электронов от времени расчета.

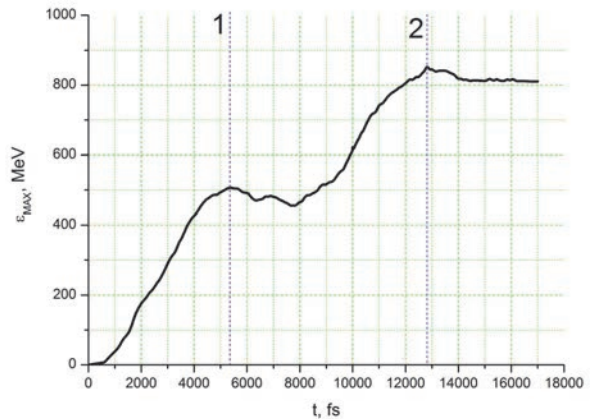


Рис. 7. Зависимость максимальной энергии электронов от времени расчета: 1 – максимальное значение энергии, полученное в режиме LWFA ~ 500 МэВ; 2 – в режиме PWFA ~ 850 МэВ

Два максимума энергии на рис. 7 соответствуют максимальным значениям энергии электронов, полученным на первом этапе ускорения (режим LWFA) и на втором этапе (режим PWFA). Таким образом, благодаря гибриднему режиму генерации кильватерной волны, удалось увеличить максимальную энергию электронов почти в 2 раза. Итоговое максимальное значение энергии, полученное в расчете $\epsilon_{max} \approx 850$ МэВ с учетом погрешности, присутствовавшей в эксперименте, совпадает со значением, представленным в работе [4]. В статье также проводилось численное моделирование в коде SCPIC [9] данного эксперимента и были представлены энергетические спектры электронов, полученных в расчете. На рис. 8–10 сравниваются энергетические спектры электронов, полученных в расчетах по коду PLASMA-3P, с результатами, полученными в коде SCPIC, представленными в статье [4] для трех моментов времени, когда лазерный импульс прошел в плазме длины 1,2 мм; 2,4 мм и 3,9 мм соответственно.

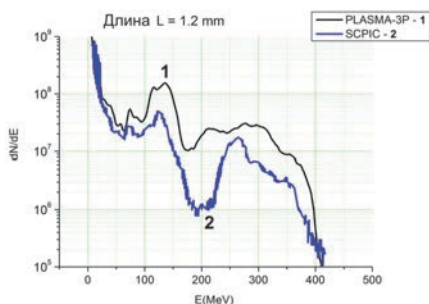


Рис. 8. Энергетические спектры электронов, полученные для момента, когда лазерный импульс прошел в плазме длину 1,2 мм: 1 – код PLASMA-3P; 2 – код SCPIC

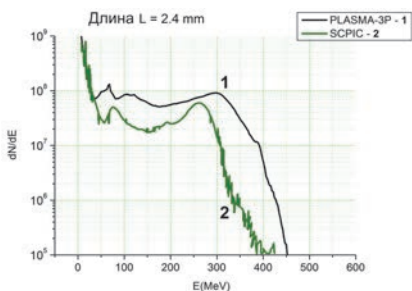


Рис. 9. Энергетические спектры электронов, полученные для момента, когда лазерный импульс прошел в плазме длину 2,4 мм: 1 – код PLASMA-3P; 2 – код SCPIC

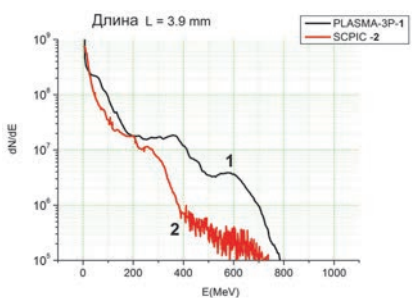


Рис. 10. Энергетические спектры электронов, полученные для момента, когда лазерный импульс прошел в плазме длину 3,9 мм: 1 – код PLASMA-3P; 2 – код SCPIC

Из рисунков видно хорошее согласие результатов обоих расчетов. На рис. 8 и 9 максимальная энергия ускоренных электронов приблизительно совпадает и равна ≈ 450 МэВ. На рис. 10 максимальная энергия ускоренных электронов в обоих расчетах достигает значения приблизительно 800 МэВ. В целом, результаты расчета по коду PLASMA-3P совпадают с результатами эксперимента и расчетами представленными в работе [4].

Закключение

При помощи разработанного во ВНИИЭФ параллельного полностью релятивистского кода PLASMA-3P (3D3P), основанного на методе «частиц в ячейках»,

проведено численное моделирование ускорения электронов в гибридном режиме генерации кильватерной волны, возбуждаемой в однородной гелиевой плазме лазерным импульсом длительностью 30 фс (FWHM) и интенсивностью $1,4 \times 10^{19}$ Вт/см². Начальная плотность электронов плазмы была равна $n_e = 1,1 \times 10^{19}$ см⁻³, длина мишени равнялась 5 мм.

Было показано, что при данных параметрах лазерного импульса, плазмы происходит генерация кильватерной волны в гибридном режиме: на первом этапе реализуется bubble-режим кильватерного ускорения, который затем, на втором этапе, переходит в режим PWFA (возбуждение кильватерной волны электронным сгустком), благодаря чему максимальная энергия электронов увеличивается приблизительно в 2 раза.

Начальные параметры лазерного импульса, плазмы отвечали условиям эксперимента, описанного в работе [4]. Был проведен анализ результатов численного моделирования, сравнение энергетических спектров ускоренных электронов показало хорошее согласие с экспериментом. Максимальная энергия электронов, полученных в расчете оказалась равна $\epsilon_{max} \approx 850$ МэВ.

Список литературы

1. Костюков И. Ю., Пухов А. М. Плазменные методы ускорения электронов: современное состояние и перспективы // УФН. 2015. Т. 185, № 1. С. 89–96.
2. Gonsalves A. J., Nakamura K., Daniels J. et al. Petawatt Laser Guiding and Electron Beam Acceleration to 8 GeV in a Laser-Heated Capillary Discharge Waveguide // Phys. Rev. Lett. 2019. Vol. 122.
3. Hidding B., Hooker S., Jamison S. et al. Plasma Wakefield Accelerator Research 2019–2040 // arXiv: 1904. 09205 v1, [physics.acc-ph], 19 Apr. 2019.
4. Masson-Laborde P. E., Mo M. Z., Ali A. et al. Giga-electronvolt electrons due to a transition from laser wakefield acceleration to plasma wakefield acceleration // Phys. of Plasmas. 2014. Vol. 21.
5. Tajima T., Dawson J. M. Laser Electron Accelerator // Phys. Rev. Lett. 1979. Vol. 43, N 4. P. 267–270.
6. Lu W., Tzoufras M., Joshi C. et al. Generating multi-GeV electron bunches using single stage laser wakefield acceleration in a 3D nonlinear regime // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2007. Vol. 10.
7. Голубев А. И., Сысоева Т. Г., Якутов Б. П. Генерация ионов в тонких мишенях лазерными импульсами круговой поляризации. / Проблемы физики высоких плотностей энергии. XII международные Харитоновские тематические научные чтения // Труды конференции. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2010. С. 369–374.
8. Schmidt G., Horton W. Self-focusing of laser beams in the beat-wave accelerator // Comments on Plasma Phys. and Controlled Fusion. 1985. Vol. 9. P. 85–90.
9. Popov K. I., Bychenkov V. Yu., Rozmus V. et al. Vacuum electron acceleration by tightly focused laser pulses with nanoscale targets // Phys. of Plasmas. 2009. Vol. 16.