

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСКОРЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ И ИОНОВ ИЗ МАЛОПЛОТНЫХ МИШЕНЕЙ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ МУЛЬТИПЕТАВАТТНОЙ МОЩНОСТИ

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

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

В работе представлены результаты двумерных и трехмерных численных расчетов, ускорения протонов и электронов при облучении малоплотных мишеней фемтосекундным лазерным излучением интенсивности 10^{22} – 10^{23} Вт/см². 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 показана возможность ускорения протонов до энергий в сотни МэВ и электронов до энергий в несколько ГэВ в процессе лазерно-плазменного взаимодействия. В расчетах мишени представляли собой малоплотную водородосодержащую плазму с концентрацией электронов $\approx 4 \cdot n_{cr}$ и толщиной около 20 мкм, лазерный импульс имели параметры: длину волны 1 мкм, длительность 25 фс и интенсивность 10^{22} – 10^{23} Вт/см². В проведенных трехмерных расчетах, при интенсивности лазерного импульса 10^{23} Вт/см², коэффициент конверсии энергии лазерного излучения в энергию протонов достигает значений порядка 8 %, электронов – 15 %. В работе также представлено сравнение эффективности ускорения заряженных частиц для нескольких типов мишеней при различной интенсивности лазерного импульса.

Ключевые слова: физика плазмы, метод частиц в ячейках, лазерно-плазменное ускорение ионов и электронов.

THREE-DIMENSIONAL SIMULATION OF ELECTRON AND ION ACCELERATION BY ULTRA-INTENSE LASER PULSE INTERACTING WITH LOW-DENSITY TARGETS

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

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

This paper presents the analysis of 2D and 3D numerical simulations of laser-driven proton and electron acceleration from low-density targets irradiated by the femtosecond laser pulse with the intensity of the order of 10^{22} – 10^{23} W/cm². Simulations were carried out with the relativistic parallel PIC code PLASMA-3P, developed in VNIIEF. The results of simulations show the possibility of proton energy gain up to the value of hundreds of MeV and of electron energy gain up to the value of few GeV in the process of laser-plasma interaction. The target was modeled as a low-density hydrogen-bearing plasma with electron density of $\approx 4 \cdot n_{cr}$ and thickness of 20 μ m and the parameters of the laser pulse were: 1 μ m wavelength, pulse duration 25 fs and intensity 10^{22} – 10^{23} W/cm². In 3D simulations, at the laser pulse intensity of 10^{23} W/cm², the efficiency of laser energy conversion into protons was on the order of 8 % and the efficiency of conversion into electrons was 15 %. The paper also gives the analysis of the particle acceleration process for several types of the targets at different intensities of the laser pulse.

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

Введение

В последние годы достигнут значительный прогресс в лазерной технике. Стало возможным созда-

ние лазерных систем, генерирующих фемтосекундные импульсы со сверхвысокими интенсивностями, порядка 10^{17} – 10^{21} Вт/см². При таких интенсивностях в лазерном импульсе достигаются недоступные ра-

нее сверхсильные электрические поля, превосходящие атомное электрическое поле $E_a = 5,14 \times 10^9$ В/см. Практически сразу после появления подобных систем мультитераваттной мощности и фемто-, субпикосекундной длительности стали развиваться лазерные методы ускорения заряженных частиц, в частности протонов и электронов [1, 2].

Использование подобных систем в качестве ионного лазерного ускорителя, при облучении тонких фольг, позволило получать мультимэвные протонные пучки с поперечным размером в десятки микрон, длительностью меньше или порядка пикосекунды, общим числом протонов до 10^{10} – 10^{12} штук и характерной энергией протона до десятков МэВ. Создание пучков с таким же количеством протонов и такой же (и значительно большей энергией) возможно и на стандартном ускорителе, но приводит к увеличению длительности и поперечного размера пучка. Кроме того, лазерный ускоритель дешевле и компактнее стандартного. Поэтому лазерные протонные пучки имеют хорошие перспективы применения в физике (инжекторы для обычных ускорителей, генераторы изотопов), технике (протонная радиография) [3], медицине (протонная терапия) [4]. Однако, лазерное ускорение протонов при облучении тонкой фольги накладывает довольно жесткие ограничения на контраст лазерных импульсов. Поэтому представляет интерес проведение исследований ускорения ионов при облучении мишеней в виде газовых струй или малоплотных пен, которые могут быть менее чувствительны к контрасту.

В данной работе представлены результаты двумерных и трехмерных численных расчетов, ускорения протонов и электронов при облучении малоплотных мишеней фемтосекундным лазерным излучением интенсивности 10^{22} – 10^{23} Вт/см². Данный диапазон интенсивности ультракороткого лазерного импульса планируется достичь на лазерном комплексе, создаваемом в рамках проекта XCELS [5]. В работе показана возможность ускорения протонов до энергий в сотни МэВ и электронов до энергий в несколько ГэВ при облучении малоплотных водородосодержащих мишеней.

Ускорение ионов приповерхностным слоем горячих электронов

Существует несколько схем ускорения ионов при воздействии ультракороткого сверхинтенсивного лазерного излучения на тонкие мишени [2]. Наиболее часто реализуется в экспериментах способ ускорения ионов приповерхностным слоем нагретых электронов, известный в литературе, как TNSA – target normal sheath acceleration («ускорение электрическим полем по нормали к мишени»). Механизм ускорения заряженных частиц в данном режиме схематично изображен на рис. 1. В этой схеме в результате взаимодействия ультракороткого, сверхинтенсивного лазерного импульса с мишенью происходит ионизация вещества мишени. В качестве мишеней

обычно используют металлические фольги, пластиковые пленки, возможно также использование малоплотных водородосодержащих пен [6] и газовых струй. Быстрые электроны, ускоряемые пондеромоторной силой лазерного импульса, проходят мишень насквозь и накапливаются на тыльной стороне мишени. В результате избытка отрицательного заряда на тыльной стороне мишени генерируется сильное электрическое поле, которое ускоряет протоны и ионы в направлении, перпендикулярном поверхности мишени.

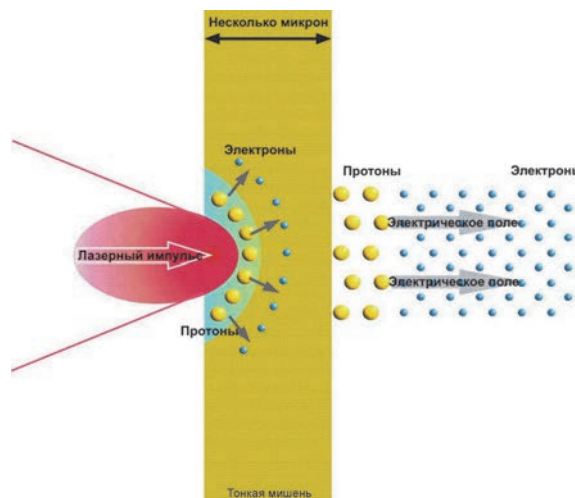


Рис. 1. Схема ускорения частиц в режиме TNSA (Target Normal Sheath Acceleration – «ускорение электрическим полем по нормали к мишени»)

Поскольку в данных процессах при облучении плазмы лазерным пучком с интенсивностью свыше $I_L > 10^{18}$ Вт/см², температура электронов в течении десятка фемтосекунд достигает значений свыше нескольких кэВ, плазму можно считать бесстолкновительной. Поэтому определяющими в описании плазмы являются эффекты, связанные с коллективным взаимодействием электромагнитного поля и частиц. Для моделирования подобных процессов обычно используют PIC-коды (Particle-in-Cell) – математические программы, в основе которых лежит метод «частиц-в-ячейке».

Постановка задачи и метод расчета

Численное моделирование ускорения ионов в данной работе 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 воздействие фемтосекундного ультраинтенсивного лазерного импульса на малоплотную, водородосодержащую мишень.

Были проведены серии расчетов для мишеней двух типов: в одном случае моделировалась плазма водорода с начальной концентрацией электронов $n_e = 4,456 \times 10^{21} \text{ см}^{-3} \approx 4 \times n_{\text{crit}}$ и толщиной 18 мкм, в другом – мишень представляла собой малоплотную пену из полиэтилена (CH_2) с такой же начальной плотностью электронов $n_e = 4,456 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$, плотностью ионов водорода $n_H = 1,0 \cdot n_e$, плотностью ионов углерода $n_C = 0,5 \cdot n_e$ и толщиной 18 мкм. Предполагалось, что вещество мишени полностью ионизовано. Лазерный импульс входил в расчетную область через правую границу (распространялся справа налево) и падал на мишень под прямым углом. Расчетная область, плазменная мишень и система координат, принятая при моделировании, схематически показаны на рис. 2.

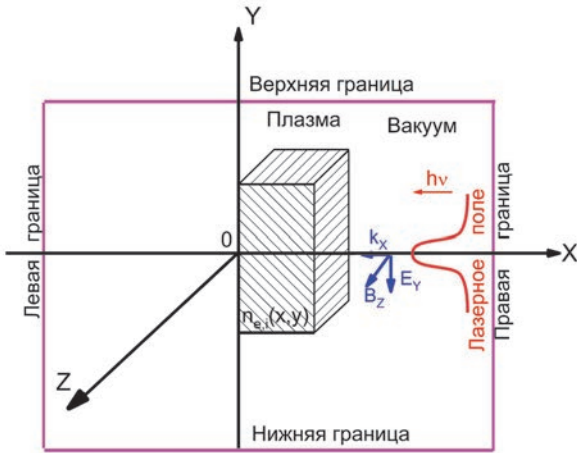


Рис. 2. Схема расчетной области, использовавшейся в численном моделировании

При численном моделировании расчетная область имела размеры $83,5 \times 40 \times 40 \text{ мкм}$ по осям X, Y, Z. Лазерное излучение распространялось в отрицательном направлении оси X. Расчетная сетка в трехмерных расчетах состояла из 1,05 млрд. ячеек, размер одной ячейки – $0,02 \times 0,08 \times 0,08 \text{ мкм}$, в моделировании участвовало $\sim 5,85$ млрд. частиц в расчетах с водородной плазмой, 8,55 млрд. частиц в расчетах с плазмой CH_2 . Лазерное излучение имело следующие параметры: длина волны $\lambda = 1 \text{ мкм}$; поляризация – линейная, R-поляризация; по времени лазерный импульс имел форму «трапеции», по пространству – «супергаусс» 4-го порядка; длительность импульса (по основанию) $\tau = 30 \text{ фс}$; диаметр пучка $d = 4,2 \text{ мкм}$; интенсивность принимала значения $I_1 = 1 \times 10^{22} \text{ Вт/см}^2$, $I_2 = 3 \times 10^{22} \text{ Вт/см}^2$, $I_3 = 1 \times 10^{23} \text{ Вт/см}^2$ и, соответственно, параметр силы волны $a_0 = eE_0/(m_e c \omega_0)$ был равен $a_{01} \approx 85,5$, $a_{02} \approx 148$, $a_{03} \approx 270,5$, где e – заряд электрона, m_e – масса электрона, c – скорость света, ω_0 – лазерная частота.

Результаты расчетов. Сравнение энергетических спектров ускоренных протонов

На рис. 3 показаны распределения плотности по результатам трехмерного расчета с водородной плазмой при $I = 1 \times 10^{22} \text{ Вт/см}^2$ и энергией лазерного импульса $\sim 29 \text{ Дж}$ для моментов времени $t_1 = 115 \text{ фс}$ и $t_2 = 230 \text{ фс}$, соответственно: рис. 3, а и рис.3, б – энергии электромагнитного поля, на рис. 3, в и рис. 3, г – концентрации электронов, на рис. 3, д и рис. 3, е – концентрации протонов.

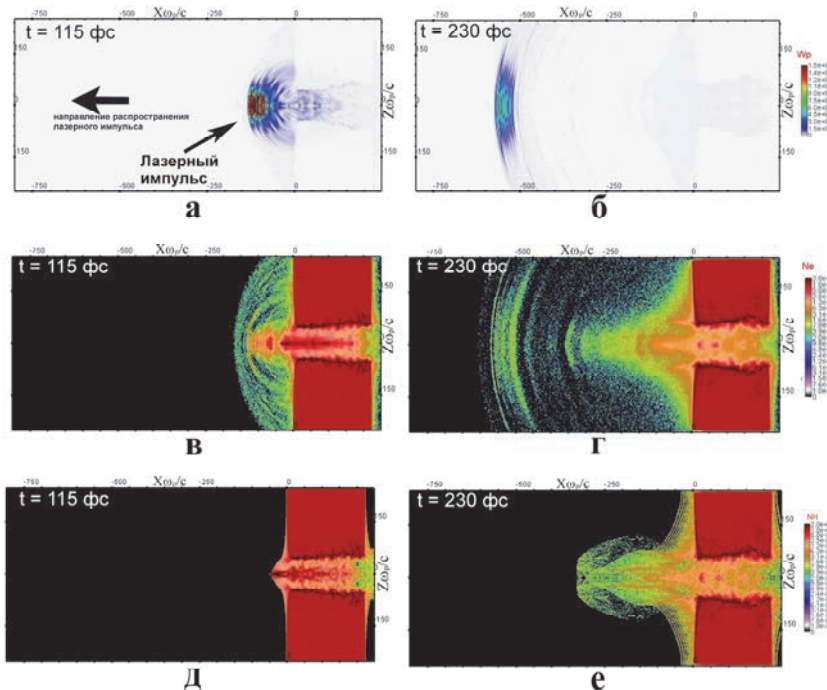


Рис. 3. Картины распределения плотности: в момент времени $t = 115 \text{ фс}$: а – энергии электромагнитного поля, в – электронов плазмы, д – протонов плазмы; в момент времени $t = 230 \text{ фс}$: б – энергии электромагнитного поля, г – электронов плазмы, е – протонов плазмы

Все распределения на рис. 3 взяты в плоскости XZ (лазерный импульс распространяется в отрицательном направлении оси X). Как видно из рис. 3, при взаимодействии лазерного излучения с плазмой электроны, расположенные на оси распространения лазерного импульса выталкиваются вперед, вслед за импульсом, причем наиболее высокоэнергетичные электроны продолжают ускоряться в лазерном поле и после вылета из мишени. Выброс электронов приводит к формированию малоплотного канала на оси распространения лазерного излучения и к образованию сильного электрического поля на тыльной стороне мишени (напряженность данного поля равна $4,5 \times 10^{11}$ В/см для момента времени 115 фс), которое в свою очередь ускоряет в продольном направлении протоны плазмы. Итоговые энергетические спектры ускоренных электронов и протонов, полученные в трехмерных расчетах для мишени из водородной плазмы, показаны на рис. 4 и рис. 5, расчеты проводились до момента времени 265 фс (для интенсивности 1×10^{22} Вт/см²) и 530 фс (для интенсивностей 3×10^{22} Вт/см² и 1×10^{23} Вт/см²). Расчеты проведены по программе PLASMA-3P.

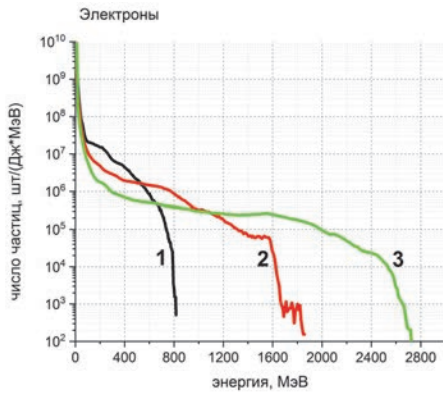


Рис. 4. Энергетические спектры электронов, полученные при облучении водородной мишени для различной интенсивности лазерного импульса: 1 – $I = 1 \times 10^{22}$ Вт/см², 2 – $I = 3 \times 10^{22}$ Вт/см², 3 – $I = 1 \times 10^{23}$ Вт/см²

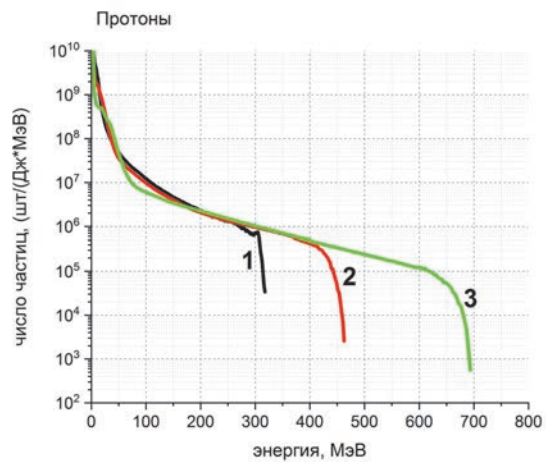


Рис. 5. Энергетические спектры протонов, полученные при облучении водородной мишени для различной интенсивности лазерного импульса: 1 – $I = 1 \times 10^{22}$ Вт/см², 2 – $I = 3 \times 10^{22}$ Вт/см², 3 – $I = 1 \times 10^{23}$ Вт/см²

Из рис. 5 видно, что для интенсивности 1×10^{22} Вт/см² максимальная энергия протонов на момент окончания расчетов достигает ≈ 320 МэВ, в двумерном расчете, проведенном в той же постановке максимальная энергия протонов равна 550 МэВ. Превышение максимальной энергии протонов в $\sim 1,5$ раза в двумерных расчетах по сравнению с трехмерными наблюдается также в расчетах для интенсивностей 3×10^{22} Вт/см² и 1×10^{23} Вт/см². Это вызвано тем, что в двумерных расчетах завышено значение электрического поля, ускоряющего протоны. Итоговые значения максимальной, средней энергии протонов и электронов, полученные в трехмерных расчетах с водородной мишенью, а также энергии вылетевших их плазмы электронных и протонных пучков представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры электронов и протонов, ускоренных лазерным импульсом сверхвысокой интенсивности длительностью 25 фс в водородной плазме, полученные при трехмерном численном моделировании при помощи PIC-кода PLASMA-3P

I , Вт/см ²	ϵ_e^{\max} , МэВ	$\langle \epsilon_e \rangle$, МэВ	$\langle \epsilon_e \rangle N_e$, Дж	ϵ_p^{\max} , МэВ	$\langle \epsilon_p \rangle$, МэВ	$\langle \epsilon_p \rangle N_p$, Дж
1×10^{22}	820	47	6	320	14	1,9
3×10^{22}	1800	65	13,6	460	17	5
1×10^{23}	2730	124	34,2	700	32	12,3

Примечание: I – интенсивность лазерного излучения; ϵ_e^{\max} – максимальная энергия электронов; $\langle \epsilon_e \rangle$ – средняя энергия электронов; $\langle \epsilon_e \rangle N_e$ – энергия вылетевших из плазмы электронов; ϵ_p^{\max} – максимальная энергия протонов; $\langle \epsilon_p \rangle$ – средняя энергия протонов; $\langle \epsilon_p \rangle N_p$ – энергия вылетевших из плазмы протонов.

Интересно сравнить среднюю энергию электронов, ускоренных лазерным импульсом, полученную в расчетах, с теоретическим значением средней энергии быстрых электронов, ускоряемых лазерным полем, которую в ультррелятивистском пределе ($a \gg 1$) можно оценить по формуле [8]:

$$\epsilon_a = mc^2 \times a, \quad (1)$$

где $mc^2=0,511$ МэВ – энергия покоя электрона, a – параметр силы волны, который вычисляется по формуле:

$$a = \frac{eE}{mc\omega} = \sqrt{\frac{I\lambda^2}{1,37 \times 10^{18} \text{ Вт} \times \text{мкм}^2 \text{ см}^{-2}}}, \quad (2)$$

E – амплитуда напряженности поля лазерного излучения, e – заряд электрона, m – масса электрона, c – скорость света, ω – лазерная частота. Данное сравнение приведено в табл. 2.

Как видно из табл. 2, PIC-код и формула (1) дают практически одинаковые средние значения энергии электронов, таким образом формула (1) дает хорошую оценку средних значений энергии электронов, полученных при помощи PIC-кода PLASMA-3P.

Трехмерные расчеты, проведенные с мишенью из малоплотной углеродной пены (CH_2), в основном, отличаются от расчетов с водородной мишенью тем, что в процессе TNSA-ускорения энергию набирают также и ионы углерода. Так что итоговая энергия протонов снижается примерно на 30 % относительно расчета с чисто водородной мишенью. В остальном, механизм ускорения остается тем же. На рис. 6 приведены максимальные значения энергий протонов, ионов углерода для обоих типов мишеней при различной интенсивности лазерного импульса.

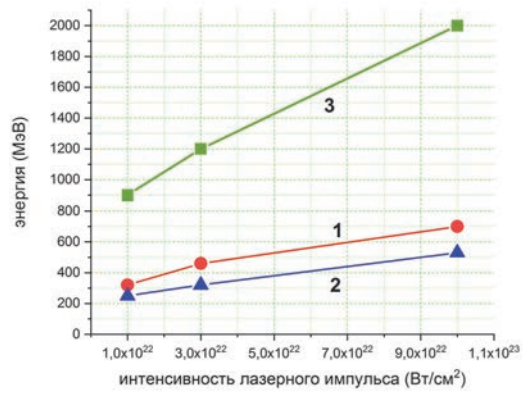


Рис. 6. Зависимости максимальной энергии протонов и ионов углерода от интенсивности лазерного импульса: 1 – водородная мишень, максимальная энергия протонов; 2 – CH_2 -мишень, максимальная энергия протонов; 3 – CH_2 -мишень, максимальная энергия ионов C^{6+}

В итоге, для максимального значения интенсивности лазерного импульса 1×10^{23} Вт/см² (энергии импульса 289 Дж, мощности 11,55 ПВт) в трехмерных расчетах для водородной мишени были получены пучки протонов со средней энергией протона в пучке $\langle \epsilon_p \rangle = 32$ МэВ, общим числом протонов вылетевших из плазмы в направлении лазерного импульса $N_p = 2,4 \times 10^{12}$ и общей энергией пучка $\langle \epsilon_p \rangle N_p = 12,3$ Дж; для CH_2 мишени – пучки протонов со средней энергией протона в пучке $\langle \epsilon_p \rangle \approx 56$ МэВ, общим числом протонов вылетевших из плазмы в направлении лазерного импульса $N_p = 5,1 \times 10^{11}$ и общей энергией пучка $\langle \epsilon_p \rangle N_p = 4,5$ Дж; ионы углерода со средней энергией иона в пучке $\langle \epsilon_C \rangle = 94$ МэВ, общим числом ионов вылетевших из плазмы в направлении лазерного импульса $N_C = 2,64 \times 10^{11}$ и общей энергией пучка $\langle \epsilon_C \rangle N_p = 3,97$ Дж для мишени CH_2 .

Таблица 2

Сравнение энергии электронов ϵ_a , вычисленной по формуле (1), и энергии $\langle \epsilon_e \rangle$, полученной при численном моделировании ускорения электронов при помощи PIC-кода PLASMA-3P

I , Вт/см ²	a ,	ϵ_a , МэВ	$\langle \epsilon_e \rangle$ МэВ	$\epsilon_a / \langle \epsilon_e \rangle$
1×10^{22}	85	43	47	0,91
3×10^{22}	147	75	65	1,15
1×10^{23}	270	137	124	1,10

Примечание: I – интенсивность лазерного излучения; $a = \frac{eE}{mc\omega}$ – безразмерная напряженность поля волны; ϵ_a – энергия электронов, оцененная по формуле $\epsilon_a = mc^2 \cdot a$; $\langle \epsilon_e \rangle$ – средняя энергия электронов, полученная в PIC-коде; $\epsilon_a / \langle \epsilon_e \rangle$ – сравнение энергий.

В заключении стоит также добавить, что на основе серии расчетов при облучении мишеней лазерным импульсом с интенсивностью 1×10^{22} Вт/см², для обоих типов мишеней была проведена верификация результатов расчетов, полученных по программе PLASMA-3P с расчетами, проведенными в аналогичной постановке в коде Mandor [9], результаты которых представлены в работе [10]. Данное сравнение представлено на рис. 7 и рис. 8. На рис. 7 показаны энергетические спектры протонов, полученные в расчетах по обеим программам для водородной мишени толщиной 18 мкм и начальной концентрации электронов $n_e = 4,456 \times 10^{21}$ см⁻³ и CH₂ мишеней при интенсивности лазерного импульса 1×10^{22} Вт/см².

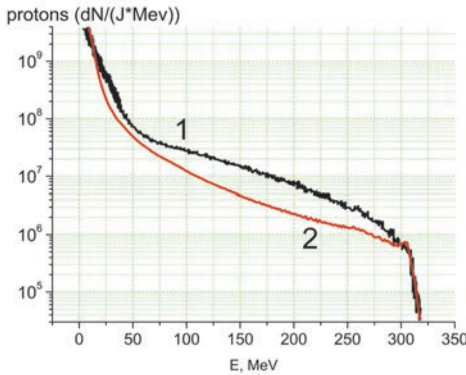


Рис. 7. Расчетные энергетические спектры протонов для водородной мишени: 1 – расчет в коде Mandor; 2 – расчет в коде PLASMA-3P

На рис. 8 показаны энергетические спектры протонов, полученные в расчетах по обеим программам для мишени из углеродной пены – CH₂ толщиной 18 мкм и начальной концентрации электронов $n_e = 4,456 \times 10^{21}$ см⁻³.

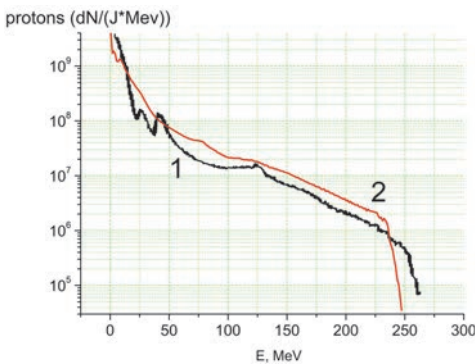


Рис. 8. Расчетные энергетические спектры протонов для мишени из углеродной пены – CH₂: 1 – расчет в коде Mandor; 2 – расчет в коде PLASMA-3P

Как видно из рис. 7 и рис. 8, полученные спектры ускоренных протонов хорошо совпадают друг с другом, что говорит о достоверности результатов, полученных в расчетах по коду PLASMA-3P.

При помощи разработанного во ВНИИЭФ параллельного полностью релятивистского кода PLASMA-3P (3D3P), основанного на методе «частиц в ячейках», проведено численное моделирование ускорения протонов и электронов при облучении малоплотных мишеней с начальной концентрацией электронов $n_e = 4,456 \times 10^{21}$ см⁻³ фемтосекундным лазерным излучением интенсивности 10^{22} – 10^{23} Вт/см². Было показано, что при данных параметрах лазерного импульса, плазмы протоны и ионы углерода плазмы ускоряются в режиме TNSA. Были получены энергетические спектры ускоренных частиц, построены зависимости максимальной энергии ускоренных протонов от интенсивности лазерного излучения. Согласно трехмерным расчетам для водородной мишени эффективность формирования спектра в области энергий 250 МэВ (терапевтические энергии) достигает значений $d^2N_p/dE_p dE_{las} = (1-2)10^6$ шт./ (МэВ·Дж) при интенсивности лазерного излучения 10^{22} – 10^{23} Вт/см², при этом максимальная энергия протонов составляет 320, 460 и 700 МэВ для интенсивностей лазерного импульса 1×10^{22} Вт/см², 3×10^{22} Вт/см² и 1×10^{23} Вт/см² соответственно.

Проведенные двумерные расчеты показали, что они существенно в ~1,5 раза превышают максимальные энергии и количество протонов, по сравнению с трехмерными расчетами, проведенными в той же постановке.

Трехмерные расчеты, проведенные с мишенью из малоплотной углеродной пены (CH₂), показали, что итоговая энергия протонов снижается примерно на 30 % относительно расчета с чисто водородной мишенью, общее количество ускоренных протонов снижается при этом в 2–3 раза.

Работа выполнена в рамках научной программы Национального центра физики и математики по направлению «Физика высоких плотностей энергии».

Список литературы

1. Быченков В. Ю., Брантов А. В., Говрас Е. А. Лазерное ускорение ионов: новые результаты, перспективы применения // УФН. 2015. Т. 185, № 1. С. 77.
2. Костюков И. Ю., Пухов А. М. Плазменные методы ускорения электронов: современное состояние и перспективы // УФН. 2015. Т. 185, № 1. С. 89–96.
3. Максимчук А., Флиппо К., Краузе Х. Генерация высокоэнергичных ионов короткими лазерными импульсами // Физика плазмы. 2004. Т. 30, № 6. С. 514–540.
4. Сафронов К. В., Вихляев Д. А., Владимиров А. Г. Экспериментальное исследование ускорения протонов из тонких фольг, облучаемых ультраинтенсивным высококонтрастным лазерным импульсом. // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 88. Вып. 11. С. 830–833.

5. Exawatt Center for Extreme Light Studies [Электронный ресурс]: [веб-сайт]. – Эл. дан. URL: <https://xcels.iapras.ru/> (дата обращения: 17.05.2022).

6. Willingale L., Nagel S. R., Thomas A.G.R., et al. Characterization of High-Intensity Laser Propagation in the Relativistic Transparent Regime through Measurements of Energetic Proton Beams. // *Phys. Rev. Lett.* 2009. Vol. 102.

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. Беляев В. С., Крайнов В. П., Лисица В. С., Матафонов А. П. Генерация быстрых заряженных

частиц и сверхсильных магнитных полей при взаимодействии сверхкоротких интенсивных лазерных импульсов с твердотельными мишенями // *УФН.* 2008. Т. 178, № 8. С. 823.

9. Romanov D. V., Bychenkov V. Yu., Rozmus W. et. al. Self-Organization of a Plasma due to 3D Evolution of the Weibel Instability // *Phys. Rev. Lett.* 2004. Vol. 93, N 21.

10. Торшин Д. В., Лыков В. А. Трехмерное моделирование генерации пучков 200-МэВ протонов при взаимодействии излучения петаваттного лазера с малоплотными мишенями // Пятая всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям // Сборник докладов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2011. С. 356–361.