

ПОЛУЧЕНИЕ ПОЗИТРОНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ

Аннотация.

Актуальность и цели. Цель работы – разработка физических основ для создания источников позитронов на основе конверсии электронов с энергией 0,1–10 ГэВ в электронно-позитронные ливни в мишени из материалов с большим Z , например, из вольфрам-рениевого сплава ($W_{75}Re_{25}$). Предполагается, что после выхода из мишени позитроны, входящие в состав ливня, будут отделены от электронов и использованы далее для формирования сильноточных пучков позитронов с заданным эмиттансом, что открывает новые возможности для экспериментальных исследований и для решения целого ряда физических и прикладных задач.

Материалы и методы. Работа была выполнена методом математического моделирования с использованием пакетов Geant4 и Comsol4.

Результаты. Были получены зависимости среднего количества позитронов в расчете на один падающий электрон, а также средней энергии и углового распределения позитронов, выходящих из мишени при попадании в нее 10^5 электронов. Получено также пространственное распределение частиц (позитронов, электронов и гамма-квантов) со стороны выхода позитронов из мишени.

Выводы. Полученные результаты позволяют оптимально подобрать начальные параметры пучка электронов, толщину и химический состав мишени для генерации позитронного пучка с заданными параметрами.

Ключевые слова: источники позитронов, электронно-позитронные ливни, позитронные пучки, сильноточные пучки.

V. V. Brekhovskikh, V. V. Gorev

OBTAINMENT OF POSITRONS USING AN ELECTRON JET

Abstract.

Background. The work is aimed at development of physical bases for creation of positron sources on the basis of conversion of electrons with 0,1–10 GeV energy into electron-positron showers in the target made of materials with large Z , for example tungsten-rhenium alloy ($W_{75}Re_{25}$). It is assumed that after exiting the target the positrons, being a part of the shower, would be separated from the electrons and used further for formation of high-current positron jets with given emittance, giving new opportunities for experimental research and for solution of a number of physical and applied problems.

Materials and methods. The study was accomplished using the method of mathematical simulation via Geant4 and Comsol4 packages.

Results. The authors obtained the dependences of average number of positrons per one incident electron, as well as average energy and angular distributions of pos-

itrons exiting the target when it is reached by 10^5 electrons. The researchers also obtained spatial distribution of particles (positrons, electrons and gamma-quantums) from the side of positrons' exit from the target.

Conclusions. The obtained results allow to optimally select the initial parameters of the electron jet, thickness and chemical compound of the target for generation of the positron jet with given parameters.

Key words: positron source, electron-positron showers, positron jets, high-current beams.

Введение

В данный момент используют пучки позитронов с малым током, которые нашли применение в таких прикладных разделах науки и техники, как изучение Ферми поверхностей; дефектоскопия, где использование позитронов позволяет определить начало усталостного разрушения в металлах еще до появления усталостных трещин, в медицине и др.

Возможность генерировать в лабораторных условиях пучки позитронов с энергией частиц от несколько МэВ до нескольких десятков МэВ и большими токами ($>>1$ А) открывает совершенно новые возможности для фундаментальных исследований, в том числе: ударного термоядерного синтеза [1–4], антиматерии, включая понимание физики, лежащей в основе различных астрофизических явлений, таких как черные дыры и вспышки гамма излучения [5, 6], физики плазмы [7, 8], позитронно-электронного конденсата Бозе – Эйнштейна [9–11] и т.д.

Главными проблемами, препятствующими широкому применению и изучению сильноточных пучков позитронов в науке и технике, является высокая стоимость и большие габариты установок, способных генерировать пучки с заданными параметрами, а также отсутствие теоретической и экспериментальной проработки вопроса по теме «сильноточные позитронные пучки».

На сегодня существует два основных способа получения позитронов:

1) рождение электрон-позитронных пар в результате электромагнитного взаимодействия гамма-квантов с кулоновским полем ядра;

2) наработка β^+ -активного изотопа.

Реализация как первого, так и второго способов требует решения ряда технических задач. Одной из таких задач является изучение тепловых процессов в мишенях, второй – формирование и транспортировка пучка позитронов с заданным эмиттансом. В этой работе рассмотрено только рождение электрон-позитронных пар в результате электромагнитного взаимодействия гамма-квантов с кулоновским полем ядра.

1. Моделирование процесса прохождения электронов сквозь мишень

В данной работе было выполнено моделирование процесса получения позитронов с использованием вольфрам-рениевой пластины (мишени), облучаемой пучком электронов. Ионизационные потери каскадного электромагнитного ливня, а также угол разлета вторичных частиц и выход позитронов рассчитывались в программном пакете GEANT4, а дальнейший нагрев мишени рассчитывался с использованием программы Comsol 4.

Процесс моделирования получения позитронов

Рассмотрим установку, которая была смоделирована в ходе математического эксперимента. Моделируемый объем установки заполнен воздухом, ровно посередине моделируемого объема установлена пластина из сплава вольфрама и рения (мишень), толщина которой менялась в ходе экспериментов, слева на мишень падает электронный пучок из ускорителя электронов. Радиус пучка электронов 1 мм (рис. 1).

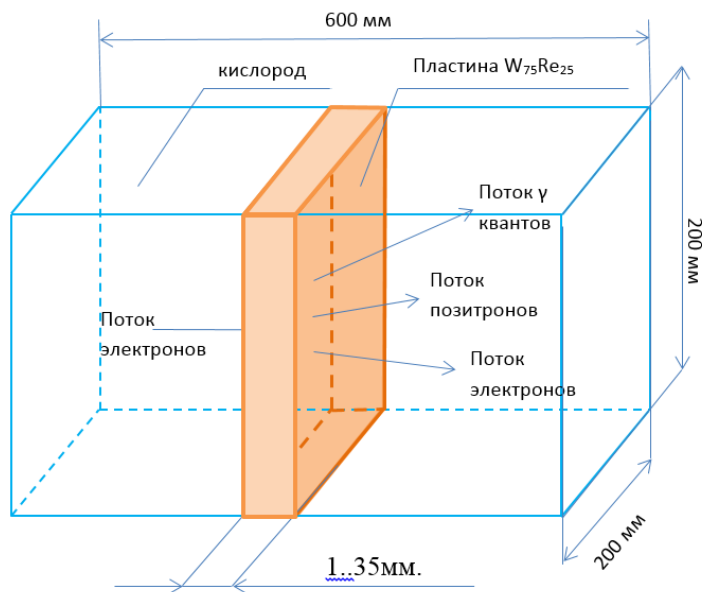


Рис. 1. Схема моделируемой установки

Мишень во всех экспериментах состояла из 75 % вольфрама и 25 % рения. Эксперимент проводился в «боксе» размером 600×200×200 мм. Толщина мишени менялись от 1 до 35 мм.

Мишень облучалась пучком электронов слева. В процессе моделирования энергия пучка изменялась в диапазоне от 0,1 до 10 ГэВ. Немонохроматичность пучка по энергии описывалась нормальным распределением с полушириной 1 КэВ. Пучок облучал мишень по нормали к поверхности, и разброс электронов пучка по углам также описывался нормальным распределением с полушириной 10^{-3} миллирадиана.

Моделирование происходило путем запуска одного электрона с последующим отслеживанием его на всех отрезках траектории, а также всех частиц, которые рождаются во время движения электрона. Данная процедура повторялась 10^5 раз. Для каждого электрона разыгрывались отклонение по энергии и углу от того значения, которое задается изначально в эксперименте.

Результат, полученный в ходе одного «эксперимента», включает в себя результаты обработки для 10^5 запущенных электронов, «эксперименты» отличаются друг от друга начальной энергией электронов и толщиной мишени.

Наиболее важные результаты, получаемые в каждом из таких «экспериментов», это:

1. Энергии позитронов (а также электронов и гамма-квантов), выходящих из пластины.
2. Количество позитронов получаемых на один электрон.
3. Углы, под которыми выходят позитроны (а также электроны и гамма-кванты), рожденные в мишени.
4. Максимальный размер «пятна» позитронов (а также электронов и гамма-квантов), на внешней поверхности мишени, оцененный по полуширине.
5. Время, через которое вылетел позитрон (а также электрон или гамма-квант) из мишени.

Результаты, полученные в ходе моделирования

На рис. 2, 3 представлены некоторые результаты, полученные при моделировании, из которых можно понять, как ведут себя разные характеристики пучка позитронов при разных начальных значениях энергии электронов и в зависимости от толщины пластины. Как меняется количество позитронов в мишени в зависимости от начальной энергии электронов и толщины мишени можно понять из рис. 2.

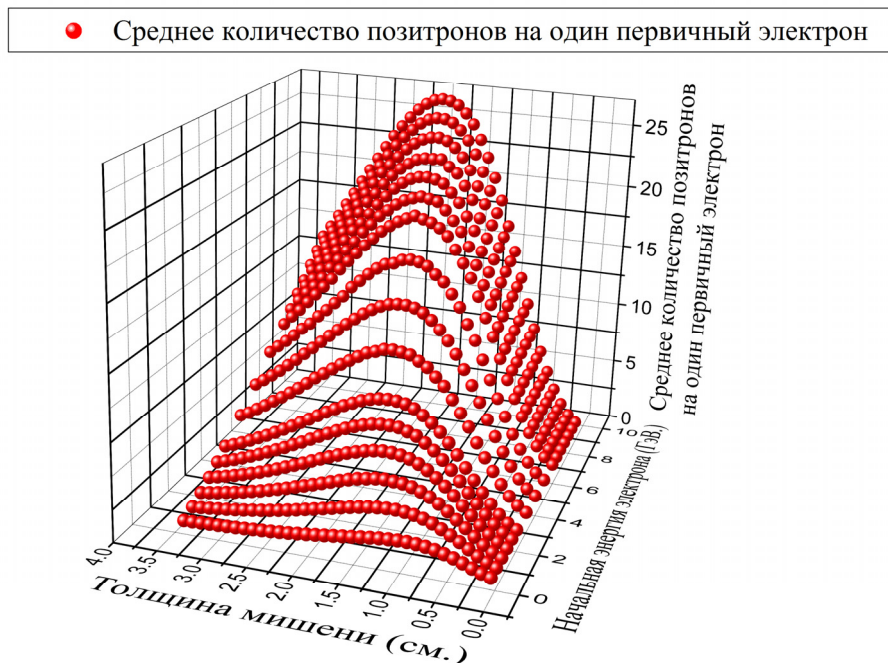


Рис. 2. Динамика изменения среднего количества позитронов на один влетающий электрон в мишени толщиной от 0,1 до 3,5 см в зависимости от начальной энергии электронов (0,1–10 ГэВ)

На рис. 3 представлены изменения средней энергии позитронов в зависимости от начальной энергии электронов и толщины мишени.

Проверка вычислений

Проверка вычислений была проведена путем моделирования результатов, которые были уже известны из Passage Physics Booklet (PPT) [12].

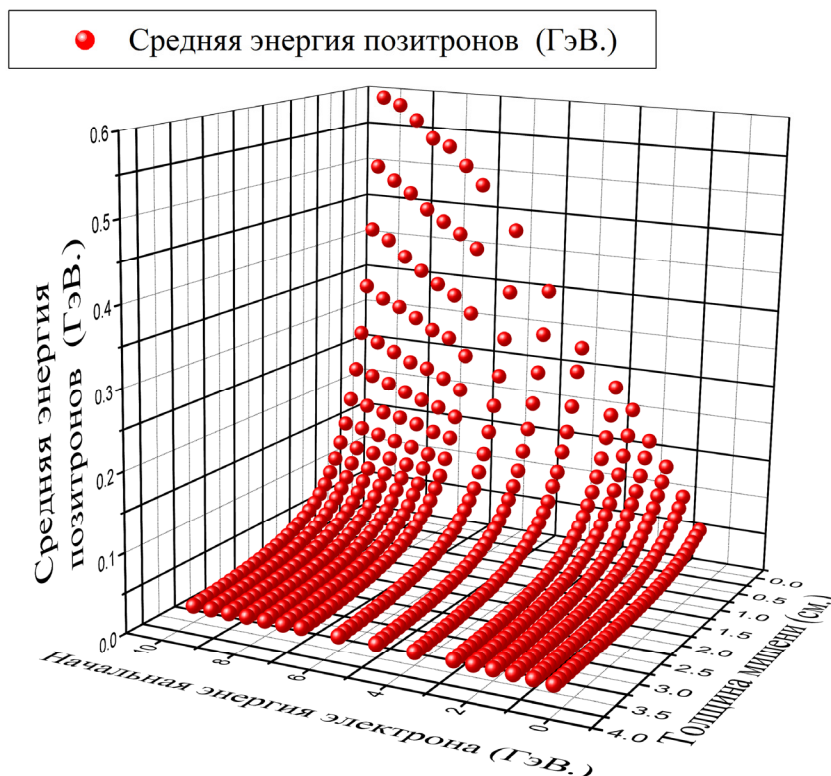


Рис. 3. Динамика изменения средней энергии позитронов в мишени толщиной от 0,1 до 3,5 см в зависимости от начальной энергии электронов (0,1–10 ГэВ)

В Passage Physics Booklet были приведены результаты реального физического эксперимента с облучением железной мишени потоком электронов, в котором измерялась суммарная энергия выходящих частиц (позитронов, электронов и гамма квантов). Начальная энергия потока электронов составляла 30 ГэВ.

Графически сравнение результатов представлено на рис. 4. На основании полученных результатов можно сделать вывод, что построенная модель хорошо моделирует происходящие процессы и ей можно пользоваться.

Также был проведен анализ полученных данных для $W_{75}Re_{25}$ мишени при помощи существующих аналитических зависимостей (рис. 5), описывающих приблизительно количество вторичных электронов в максимуме ливня [13]:

$$\Pi_{\max}^{e^-} = \frac{0,31}{(\ln(E_0 / \varepsilon_0) - 0,37)^{1/2}} \cdot \frac{E_0}{\varepsilon_0}, \quad (1)$$

где E_0 – энергия первичного электрона; ε_0 – критическая энергия вещества (энергия, при которой потери на излучение и потери при столкновении равны).

Формула (1) дает правильную аналитическую зависимость, но сильно завышенное значение числа вторичных частиц, если сравнить с более точными вычислениями, особенно с результатами математического моделирования. Чтобы оценки (1) соответствовали реальным результатам, необходимо их нормировать на 4,3 [13].

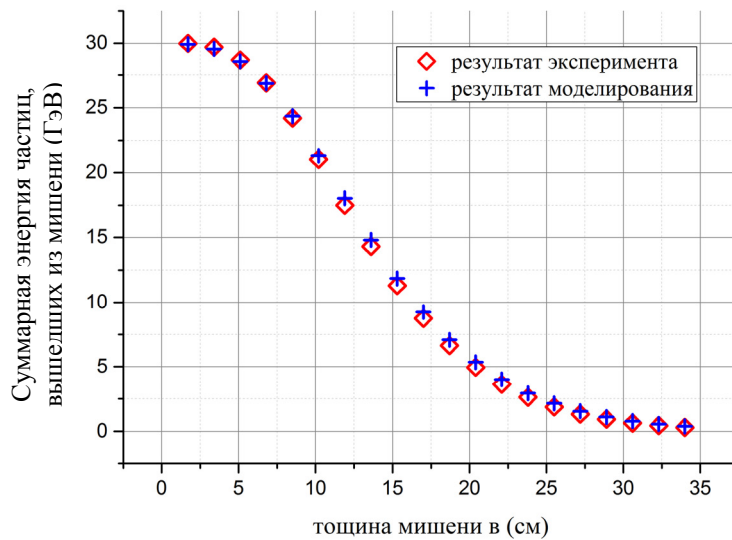


Рис. 4. Сравнение экспериментальных данных [12] с результатом, полученным в ходе моделирования

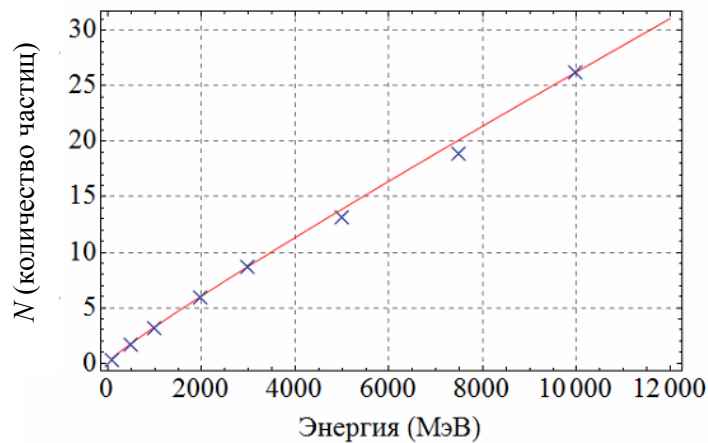


Рис. 5. Сравнение зависимость (1) нормированная на 4,3 (сплошная линия) и расчетных данных полученные при моделировании (×) для количества частиц ливня в мишени ($W_{75}\text{Re}_{25}$)

В свою очередь позиция максимума ливня, отсчитываемая от точки входа электронов в мишень и измеряемая в радиационных длинах, рассчитывается по эмпирической формуле [13]:

$$T_{\max}^{e^-} = 1,01 (\ln(E_0 / \epsilon_0) - 1). \quad (2)$$

Сравнение данных, полученных в ходе моделирования (▲) с эмпирической формулой (2) (сплошная линия), приведены на рис. 6.

Результаты нагрева мишени

В процессе проведения численного эксперимента исследовалась динамика нагрева $W_{75}\text{Re}_{25}$ мишени до температуры плавления, равной 3653 К.

Исследование распространения температурного фронта в нагретой мишени проводилось как в продольном, так и в поперечном направлении. Результаты вычислений представлены на рис. 7.

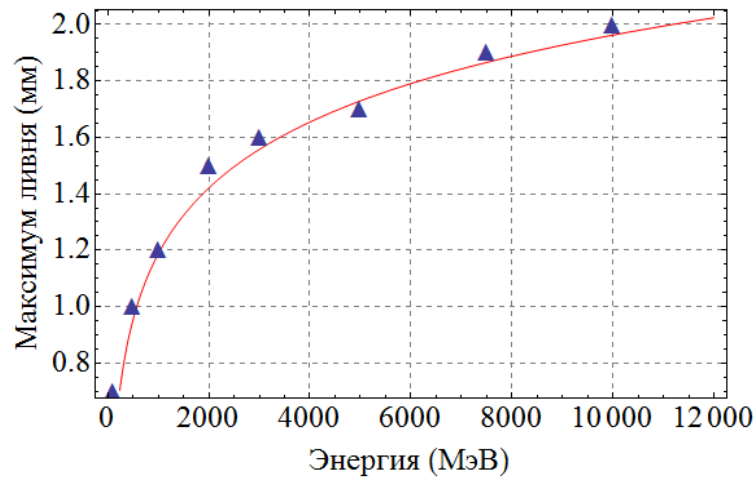


Рис. 6. Сравнение зависимости (2) с расчетными значениями (▲) оптимальной толщины мишени ($W_{75}Re_{25}$)

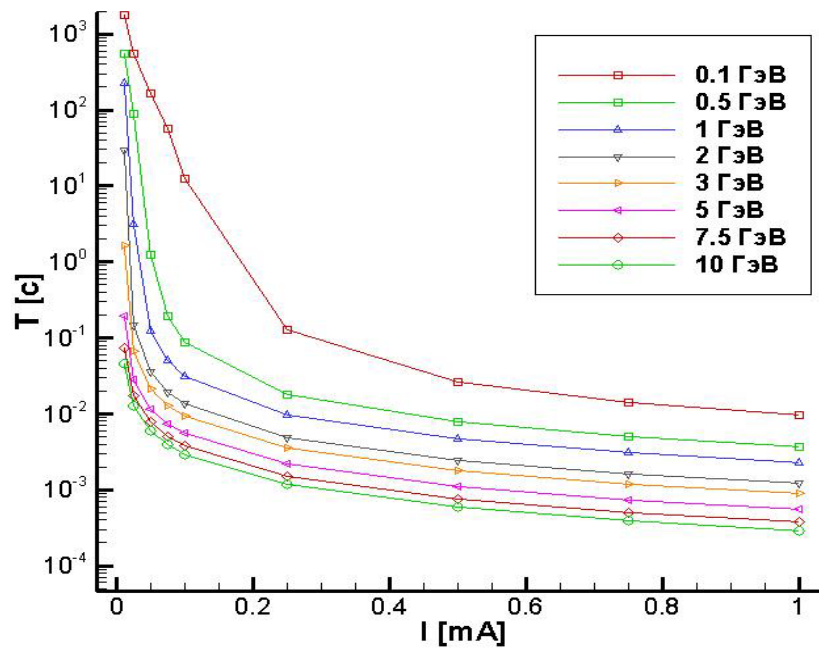


Рис. 7. Результаты моделирования времени нагрева от значения среднего тока при энергиях электронов от 0,1 до 10 ГэВ, толщина мишени 10 мм

При исследовании также рассматривалась зависимость времени нагрева от диаметра входного пучка для электронов с начальной энергией, равной 1 ГэВ, и током в диапазоне от 0,01 до 1 мА. Как показывают расчеты при

входном диаметре электронного пучка 2 мм, диаметр «пятна» позитронов на выходе (для энергии электронов 1 ГэВ толщина мишени 12 мм) составляет 3,21 мм.

Полученные результаты численного моделирования позволяют выявить характерные особенности динамики нагрева мишени при облучении ее пучками электронов. При высокой интенсивности электронного пучка ($I > 0,1$ мА) скорость нагрева $W_{75}Re_{25}$ пластины имеет приблизительно линейную зависимость от энергии пучка и обратно пропорциональна квадрату диаметра пучка. Можно видеть, что время нагрева пластины до критической температуры с уменьшением силы тока в пучке растет нелинейно за счет того, что при высоких значениях интенсивности электронного пучка тепло не успевает рассеяться, и нагрев носит локальный характер, объем которого ограничен только разлетом вторичных частиц.

На рис. 8 приведены результаты вычислений нагрева $W_{75}Re_{25}$ пластины электронным пучком при значениях начальной энергии электронов $E_0 = 1,0$ ГэВ для пучка электронов диаметром 2 мм, при значении среднего тока $I_{cp} = 0,04$ мА.

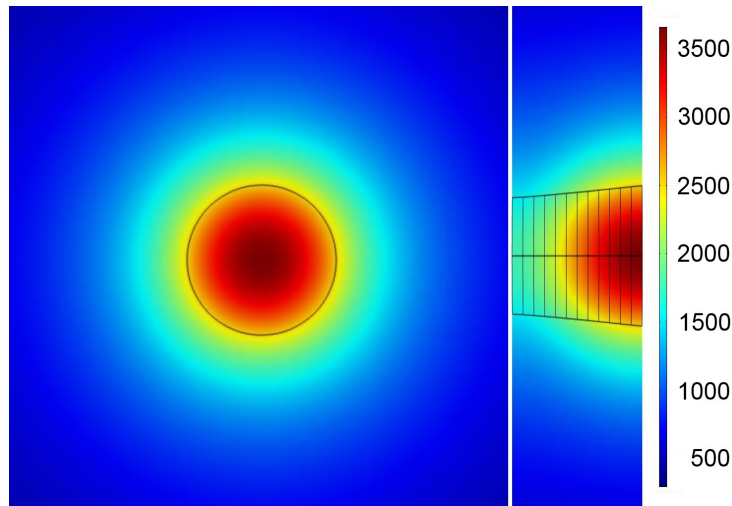


Рис. 8. Сечения температурного фронта в мишени;
 $E_0 = 1,0$ ГэВ, $I_{cp} = 0,04$ мА. Толщина мишени 1,2 см, диаметр пучка 2 мм

Из результатов численного эксперимента можно видеть, что время нагрева пластины нелинейно растет с уменьшением силы тока в электронном пучке за счет увеличения радиуса температурного фронта в мишени. При высоких значениях интенсивности электронного пучка тепло не успевает рассеяться за время нагрева до максимальной температуры (3653 К), и нагрев носит локальный характер, объем которого ограничен только разлетом вторичных частиц.

Заключение

Полученные количественные результаты по рождению позитронов с использованием пакета Geant 4 для расчета ливней позволяют точно определить количество позитронов и эмиттанс пучка позитронов (табл. 1).

Построенная математическая модель позволяет производить расчет времени нагрева пластины при облучении ее пучками электронов. В качестве материала пластины был выбран $W_{75}Re_{25}$. Диапазон энергий электронов в пучке варьировался от 0,1 до 10 ГэВ. Нагрев мишени при высокой интенсивности генерируемых электронных пучков имеет локальный характер и уменьшение энергии электронов в пучке приводит к приблизительно линейному закону убывания времени нагрева вольфрамовой пластины.

Таблица 1

Эмиттанс пучка при толщине мишени 1,2 см

Начальная энергия электронов E (ГэВ)	Средний угол отклонения (рад)	Диаметр пятна частиц на выходе (см)	Эмиттанс (мм·мрад)
0,5	0,543	0,10400	564,8
1,0	0,501	0,08495	425,2
5,0	0,423	0,07082	299,8
10,0	0,398	0,06622	263,2

С целью предотвращения плавления $W_{75}Re_{25}$ мишени для получения амперных позитронных токов можно использовать вращающуюся мишень, выполненную в форме кольца, что до определенных пределов будет способствовать установлению стационарного режима нагрева.

Полученные результаты могут быть использованы для выбора параметров энергии первичных электронов и силы тока пучка при создании стационарных сильноточных источников позитронов.

Список литературы

1. **Горев, В. В.** Об анигиляционном ускорении макро частиц для UTC / В. В. Горев // Доклады академии наук СССР. – 1984. – Т. 274. – С. 68.
2. **Горев, В. В.** Ускорение макрочастиц для управляемого термоядерного синтеза / В. В. Горев // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. – 2008. – № 1. – С. 41.
3. **Gorev, V. V.** Power Positron Beams for HED Physics / V. V. Gorev // 18th IEEE International Pulsed Power Conference (June 19–23, 2011). – USA, Chicago, 2011. – P. 115.
4. **Gorev, V. V.** Power Positron Beams as a new branch of beaming / V. V. Gorev // International Conference Beams 04 (May 25–29, 2014). – USA, Washington, 2014. – P. 69.
5. **Wardle, J.** Electron–positron jets associated with the quasar 3C279 / J. Wardle et al. – London, Nature, 1998. – Vol. 395. – P. 457.
6. **Meszaros, P.** Theories of gamma-ray bursts / P. Meszaros // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. – 2002. – Vol. 40. – P. 137.
7. **Weldon, H. A.** Measuring T_c of the quark-gluon plasma with $e^+ e^-$ pairs / H. A. Weldon // Physical Review Letters. – 1991. – Vol. 66. – P. 293.
8. **Blackman, E. G.** Ohm's law for a relativistic pair plasma / E. G. Blackman and G. B. Field // Physical Review Letters. – 1993. – Vol. 71. – P. 3481.
9. **Platzman, P. M.** Possibilities for Bose condensation of positronium / P. M. Platzman and A. P. Mills // Phys. Rev. B. – 1994. – Vol. 49. – P. 454.
10. **Mills, A. P.** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research / A. P. Mills // Sect. B. – 2002. – Vol. 192. – P. 107.

11. **Liang, E. P.** Laser cooling of positronium / E. P. Liang and C.D. Dermer // *Opt. Commun.* – 1988. – Vol. 65. – P. 419.
12. **Nakamura, K.** Particle physics booklet / K. Nakamura et al. – Geneva, CERN Scientific Information Service, 2012. – Vol. 30.5. – P. 310.
13. **Кулаков, А. А.** Разработка позитронного источника на основе линейных ускорителей / А. А. Кулаков, П. В. Мартышкин. – Новосибирск : Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера ; ИЯФ 99-26, 1999. – 41 с. [препринт].

References

1. Gorev V. V. *Doklady akademii nauk SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences]. 1984, vol. 274, p. 68.
2. Gorev V. V. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Termoyadernyy sintez* [Problems of nuclear science and technology. Series: Thermonuclear fusion]. 2008, no. 1, p. 41.
3. Gorev V. V. *18th IEEE International Pulsed Power Conference (June 19–23, 2011)*. USA, Chicago, 2011, p. 115.
4. Gorev V. V. *International Conference Beams 04 (May 25–29, 2014)*. USA, Washington, 2014, p. 69.
5. Wardle J. et al. *Electron–positron jets associated with the quasar 3C279*. London, Nature, 1998, vol. 395, p. 457.
6. Meszaros P. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. 2002, vol. 40, p. 137.
7. Weldon H. A. *Physical Review Letters*. 1991, vol. 66, p. 293.
8. Blackman E. G. and Field G. B. *Physical Review Letters*. 1993, vol. 71, p. 3481.
9. Platzman P. M. and Mills A. P. *Phys. Rev. B*. 1994, vol. 49, p. 454.
10. Mills A. P. *Sect. B*. 2002, vol. 192, p. 107.
11. Liang E. P. and Dermer C. D. *Opt. Commun.* 1988, vol. 65, p. 419.
12. Nakamura K. et al. *Particle physics booklet*. Geneva, CERN Scientific Information Service, 2012, vol. 30.5, p. 310.
13. Kulakov A. A., Martyshev P. V. *Razrabotka pozitronnogo istochnika na osnove lineynykh uskoriteley* [Development of a positron source on the basis of linear accelerators]. Novosibirsk: Institut yadernoy fiziki im. G. I. Budkera; IYaF 99-26, 1999, 41 p. [preprint].

Бреховских Владимир Валерьевич
аспирант, Национальный
исследовательский центр
«Курчатовский институт» (Россия,
г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1)
E-mail: brboba@mail.ru

Brekhovskikh Vladimir Valer'evich
Postgraduate student, National research
center “Kurchatovsky institute”
(1 Academica Kurchatova square,
Moscow, Russia)

Горев Владимир Васильевич
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник,
Национальный исследовательский
центр «Курчатовский институт»
(Россия, г. Москва, пл. Академика
Курчатова, 1)
E-mail: vg.kiae@gmail.co

Gorev Vladimir Vasil'evich
Doctor of physical and mathematical
sciences, leading researcher, National
research center “Kurchatovsky institute”
(1 Academica Kurchatova square,
Moscow, Russia)

УДК 533.9.08

Бреховских, В. В.

Получение позитронов с использованием пучка электронов /
В. В. Бреховских, В. В. Горев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2014. – № 3 (31). – С. 134–144.