

## УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 53.06

### УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ЗАМЕНЫ РАДИОАКТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ В УСТАНОВКАХ ДЛЯ СТЕРИЛИЗАЦИИ НАСЕКОМЫХ

© 2022 г. С. В. Куцаев<sup>a, \*</sup>, R. Agustsson<sup>a</sup>, R. Berry<sup>a</sup>, S. Boucher<sup>a</sup>, А. Ю. Смирнов<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*RadiaBeam Technologies, Santa Monica, CA 90404 USA*

*\*E-mail: kutsaev@radiabeam.com*

Поступила в редакцию 28.06.2021 г.

После доработки 09.07.2021 г.

Принята к публикации 19.07.2021 г.

Радиоизотопы, вплоть до настоящего времени, являются одним из наиболее используемых источников гамма-излучения. Популярность таких источников объясняется компактностью, дешевизной и чистой энергетическим спектром излучения. Тем не менее, современная тенденция, заданная МАГАТЭ, направлена на замену таких источников альтернативными технологиями, в связи с риском аварий, утечек или их нелегального использования. В качестве замены радиоактивных источников можно использовать тормозное излучение, получаемое с помощью ускорителей электронов. Однако для того, чтобы стать адекватной заменой радиоизотопам, ускорители должны иметь сравнимые с ними вес, размеры и стоимость. В данной статье будет продемонстрирован ускоритель, разрабатываемых в компании RadiaBeam для замены таких радиоизотопов как Co-60.

*Ключевые слова:* замена радиоизотопов, линейный ускоритель электронов, малогабаритные ускорители, разделенные ускоряющие структуры

**DOI:** 10.56304/S2079562922010237

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) разработало программу развития ядерных технологий в сфере продовольствия и сельского хозяйства. В области борьбы с насекомыми-вредителями их усилия сосредоточены на разработке комплексной системы борьбы с вредителями с помощью техники стерилизации насекомых (ТСН). Этот метод заключается в выращивании и стерилизации мужских особей насекомых, которые затем выпускаются в естественную среду обитания, чтобы соревноваться с нестерильными самцами за спаривание. В результате спаривания бесплодных самцов и здоровых самок потомство не будет появляться, а общая популяция насекомых будет сокращаться.

В настоящее время ТСН использует гамма-излучатели на основе радиоизотопов для стерилизации насекомых. Однако для дальнейшего распространения техники и уменьшения проблем с безопасностью необходимо разработать источники облучения на основе альтернативных технологий. Такие источники существуют и основаны на применении рентгеновских трубок, однако их применение нецелесообразно выше энергий 200–300 кэВ. В то же время, будущее применение ТСН для борьбы с комарами включает облучение куколок в воде,

что вдвое увеличивает эффективную плотность, по сравнению с облучением сухих куколок, традиционно обрабатываемых для сельскохозяйственных целей, что требует облучением с энергией более 1 МэВ.

Компания RadiaBeam разработала безопасный источник излучения с высокой пропускной способностью для стерилизации насекомых, основанный на новом недорогом линейном ускорителе электронов. Мы выбрали энергию 3 МэВ, чтобы получить спектр тормозного рентгеновского излучения, который близко соответствует характеристикам изотопа Co-60 [1], излучающего гамма-частицы с энергиями 1.17 и 1.33 МэВ. Например, для облучения куколок в воде, глубина 50%-интенсивности составляет 12 см, что позволяет достичь достаточной однородности (отношение максимальной к минимальной дозе ~1.3). Из-за высокой степени преобразования 3 МэВ'ных электронов в рентгеновские лучи (2 сГр/мин/мкА на расстоянии 1 м, на основе моделирования Монте-Карло), потребность в электронном токе будет очень низкой (в среднем 100 мкА).

Параметры источника излучения ТСН приведены в табл. 1. Система (рис. 1) сравнима по весу и цене с источником на основе радиоизотопов, и в то же время не имеет проблем с безопасностью

**Таблица 1.** Параметры предлагаемой системы облучения ТСН

Параметр	Значение
Энергия электронов	3 МэВ
Средний ток	100 мкА
Доза в центре контейнера	15 Гр/мин
Однородность дозы	1.3
Объем и размеры контейнера (радиус x высота)	30 л (18 × 30 см)
Размер источника облучения (длина × высота × глубина)	125 × 110 × 75 см
Вес источника облучения	5000 кг

или необходимостью затрат на замену изотопов и соблюдение нормативных требований. Мощность и однородность дозы у ускорителя также значительно выше, чем у существующих источников на основе с рентгеновских трубок.

## 2. УСКОРЯЮЩАЯ СТРУКТУРА

Выбор рабочей частоты был остановлен на X-диапазоне (9.3 ГГц), а не на более распространенном S-диапазоне (3 ГГц), что позволило уменьшить размеры ускорителя, включая источник питания, ускоряющую структуру и систему радиационной защиты. Работа на более высокой частоте также более эффективна с точки зрения расходования СВЧ мощности, поскольку погонное шунто-

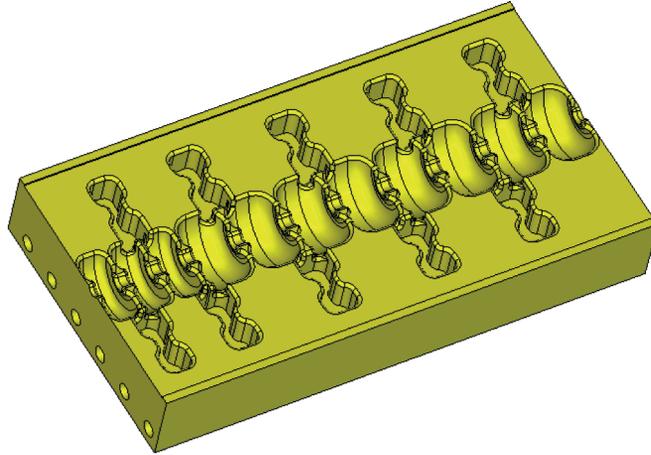
вое сопротивление, определяющее эффективность передачи мощности пучку, масштабируется как  $f^{1/2}$  (для структур с идентичной, но масштабированной геометрией), а рассеиваемая мощность — как  $f^{-1/2}$  [2]. При этом более низкая запасенная энергия позволяет сократить время заполнения резонатора, увеличивая время, в течение которого ВЧ мощность используется для ускорения пучка.

Одним из недостатков высокочастотных линейных ускорителей является более высокая стоимость производства. Однако, недавно был разработан инновационный подход, получивший название “разделенной структуры”, позволяющий изготавливать ускоряющую структуру из двух половинок, вместо большого количества отдельных ячеек [3, 4]. По нашим оценкам, из-за значительного уменьшения количества деталей и, как следствие, уменьшения времени работы оператора станка, стоимость изготовления разделенной структуры составляет менее 10% от стоимости традиционной структуры. Применение метода разделенной структуры также снижает затраты на другие этапы производства, такие как контроль размеров, очистка, пайка и настройка [5]. В целом наши первоначальные исследования показывают, что это нововведение снижает стоимость производства ускоряющей структуры приблизительно в 8 раз [6]. Таким образом, оно является важным фактором снижения стоимости линейных ускорителей для особо чувствительных к стоимости приложений, таких как автономные источники излучения для замены радиоизотопов [7].

На сегодняшний день, компанией RadiaBeam успешно изготовлено несколько линейных ускорителей X-диапазона на энергию 6 МэВ по традиционной схеме [8, 9]. Ускоряющая структура этих ускорителей состоит из 3 группирующих и 16 ускоряющих ячеек с боковой связью, работающих в режиме стоячей волны. Эта конфигурация была



**Рис. 1.** Концептуальный рендеринг системы облучения ТСН на основе линейного ускорителя: внешний вид (слева) и внутреннее содержание (справа).



**Рис. 2.** Модель одной половинки разделенной ускоряющей структуры с внешними ячейками связи, состоящей из трех группирующих и восьми ускоряющих ячеек.

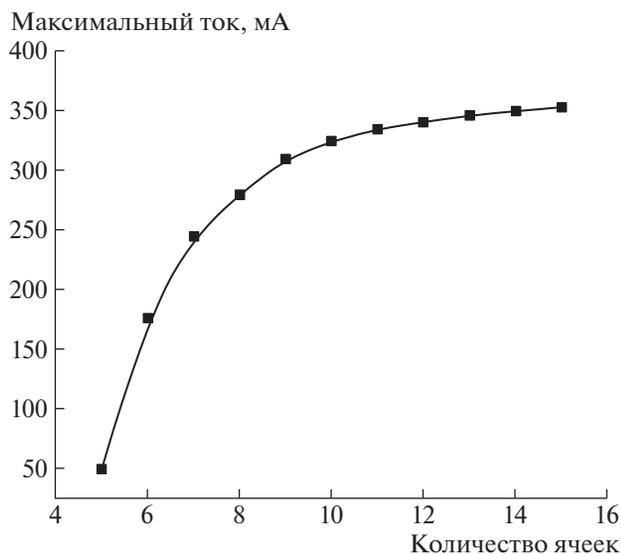
сохранена и для нового ускорителя ТСН, поскольку она обеспечивает хорошие группирующие свойства при сохранении простоты конструкции [10]. Количество регулярных ячеек было сокращено до 8-ми для масштабирования до 3 МэВ. Было рассмотрено несколько типов ускоряющих структур [11, 12] для линейного ускорителя ТСН. По результатам этих исследований была выбрана разделенная структура с внешними ячейками связи, поскольку она обладает всеми преимуществами технологии разделенной структуры и традиционных компенсированных структур [13]. Такая структура, однако, требовала оптимизации формы для обеспечения возможности изготовления. Эта оптимизация включала следующие особенности: прямоугольную ячейку соединения, больший радиус скругления, овальную щель связи и упрощенную форму носиков (рис. 2). Параметры опти-

мизированной разделенной коаксиальной структуры для ускоряющих ячеек с  $\beta = 1$  и группирующих с  $\beta = 0.65$  приведены в табл. 2, из которой видно, что разделенная структура имеет сопоставимые характеристики по сравнению с традиционной структурой [8].

Мы провели серию расчетов с целью оптимизировать количество ускоряющих ячеек в структуре. Более короткие структуры работают на более высоких градиентах и требуют большей мощности, в то время как длинные конструкции более эффективны с точки зрения использования СВЧ мощности, поскольку потери в стенках резонатора определяются как  $P = \frac{W^2}{RL}$ . Предварительные оценки максимального тока в структуре, при питании от магнетрона с мощностью 1.8 МВт, были проведены с помощью аналитической формулы [14]:

**Таблица 2.** Сравнение параметров разделенной структуры с параметрами традиционной структуры

Тип структуры	Разделенная		Традиционная
Радиус апертуры, мм	2	2	2
Фазовая скорость $\beta$	0.65	1.0	1.0
Шунтовое сопротивление, МОм/м	89.4	124.3	142.0
Длина ячейки, см	1.05	1.61	1.61
Связь между ячейками, %	3.3	2.5	2.1
Добротность	6700	9200	9100

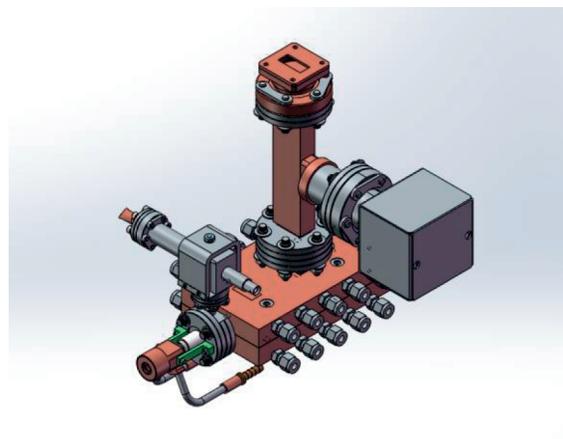


**Рис. 3.** Ток пучка (при энергии 3 МэВ), который может быть достигнут при питании от магнетрона с мощностью 1.6 МВт в зависимости от количества ячеек в структуре.

$$W_0 = \frac{\sqrt{R_s P_i L}}{\frac{I_0}{2} \sqrt{\frac{R_s L}{P_i}} + \sqrt{1 + \frac{I_0^2 R_s L}{4 P_i}}}$$

Здесь  $W_0$  – энергия пучка,  $P_i$  – входная мощность,  $L$  – длина линейного ускорителя,  $R_s$  – шунтовое сопротивление,  $I_0$  – ток нагрузки пучком. Как показано на рис. 3, ускоренный ток быстро растет при увеличении количества ячеек до ~ 10–11, а затем рост имеет незначительный характер, в то время как каждая ячейка добавляет 1.61 см к общей длине, а также несколько увеличивает время изготовления. Кроме того, наш опыт [15] показывает, что эта формула дает завышенную оценку по сравнению с моделированием динамики пучка в *Parmela* [16] и фактически достигнутыми токами [8]. В связи этим, мы решили остановиться на количестве ускоряющих ячеек, равном 11, что, тем не менее, обеспечивает разумную надежность модели.

Структура из 11 ячеек может ускорять пучки с током около 300 мА до энергии 3 МэВ при условии полной доступности ВЧ мощности. С учетом непредвиденных обстоятельств и того, что предпочтительна работа ниже максимальных уровней мощности магнетрона, для продления его срока службы, выбранное количество ячеек, соответствующее длине ускоряющей структуры 17 см, представляется оптимальным.



**Рис. 4.** Инженерная конструкция ускорителя ТСН.

### 3. ИНЖЕНЕРНЫЙ ДИЗАЙН И ПРОТОТИП

Конструкция ускорителя, показанная на рис. 4, состоит из двух половинок разделенной ускоряющей структуры, волноводного ввода мощности с отверстием для откачки, вакуумного окна, приваренной электронной пушки, выходного вакуумного порта для откачки, к которому подключен небольшой ионный насос, а также мишени (конвертора пучка электронов в тормозное излучение). В данной конструкции будет использоваться электронная пушка М592 фирмы L-3, которую мы используем в большинстве наших медицинских и промышленных ускорителей. Система также имеет по пять каналов водяного охлаждения на каждую половину, а также одну линию охлаждения для мишени. Вся система собирается в результате серии операций пайки и сварки.

Окончательная инженерная конструкция системы была обусловлена результатами электромагнитных и тепловых расчетов, при этом особое внимание уделялось простоте сборки, инспекции и тестирования, а также значительным качеством вакуума. Стоит отметить, что для облегчения поиска и устранения неисправностей и замены компонентов в конструкцию прототипа были включены фланцевые компоненты, которые впоследствии будут заменены сварными соединениями для серийных моделей ускорителя. Две половинки ускоряющей структуры юстированы по отношению друг к другу с помощью отверстий для штифтов и соединены посредством вакуумной пайки.

Мы изготовили и протестировали базовый прототип разделенной ускоряющей структуры, аналогичный структуре, разработанной для линейного ускорителя ТСН (рис. 5). Для изготовления девяти-ячеечной структуры нам потребовалось всего 70 ч на обе половинки. Это значительно меньше, чем то, что потребовалось бы на изготовление структуры традиционным методом, заключающимся в изго-



Рис. 5. Фотография прототипа разделенной структуры.

товлении множества отдельных ячеек, который на данный момент является стандартом для промышленных линейных ускорителей.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Техника стерилизации насекомых — важный метод борьбы с вредителями, однако в настоящее время он осуществляется с помощью опасных источников гамма-излучения на основе радиоизотопов. Для дальнейшего распространения этой техники и уменьшения проблем с безопасностью необходимо разработать альтернативные источники излучения. Хотя такие источники существуют на основе рентгеновских трубок, их применение нецелесообразно выше нескольких сотен килоэлектронвольт. Для адекватной замены изотопов Co-60, требуется пучок электронов, ускоренный до энергии 3 МэВ. Компания RadiaBeam разработала недорогой, компактный, линейный ускоритель, который используется как безопасный источник излучения для ТСН и других приложений. Ускоритель работает в X-частотном диапазоне, позволяющем уменьшить его размер, а также инновационный подход разделённой ускоряющей структуры для снижения затрат на его изготовление.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа была профинансирована Министерством энергетики США, грант № DE- SC0020010.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Steidley K.D., Rosen C.W.* // *Med Phys.* 1990. V. 17(3). P. 474–480.
2. *Каминский В.И., Лалаян М.В., Собенин Н.П.* Ускоряющие структуры. Учебное пособие. 2005. Москва: МИФИ.
3. *Agustsson R., Boucher S., Kutsaev S.* US Patent No. WO2018222839A1. 2018.
4. *Agustsson R., Boucher S., Kutsaev S.* US Patent No. WO2020061204A1 (PCT), 2019.
5. *Kutsaev S.V. et al.* // *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., Sect. B.* 2019. V. 459. P. 179.
6. *Kutsaev S.V.* // *Instrum. Exp. Tech.* 2021. V. 64. P. 641.
7. *Kutsaev S.V.* // *Tech. Phys.* 2021. V. 66. P. 161.
8. *Kutsaev S.V. et al.* // *Radiat. Phys. Chem.* 2021. V. 185. P. 109494.
9. *Woods K. et al.* // *Med. Phys.* 2016. V. 43 (6). P. 3895.
10. *Kutsaev S.V.* // *Eur. Phys. J. Plus.* 2021. V. 136. P. 446.
11. *Kutsaev S.V.* // *Instrum. Exp. Tech.* 2021. V. 64. P. 869.
12. *Каминский В.И., Куцаев С.В.* // *Ядерная физика и инжиниринг.* 2011. Т. 2. С. 154–158.
13. *Lapostolle P., Septier A.L.* *Linear Accelerators.* 1970. Amsterdam: North-Holland Pub. Co.
14. *Sobenin N.P., Zverev B.V.* *Electrodynamical Characteristics of Accelerating Cavities.* 1st. ed. 1999. London: CRC Press.
15. *Kutsaev S.V. et al.* // *AIP Conf. Proc.* 2019. V. 2160. P. 050014.
16. *Young L., Billen J.* // *Proc. 2003 IEEE Particle Accelerator Conference.* 2003. P. 3521–3523.

## Electron Accelerator for Replacement of Radioactive Sources in Insect Sterilization Facilities

S. V. Kutsaev<sup>1</sup>, \*, R. Agustsson<sup>1</sup>, R. Berry<sup>1</sup>, S. Boucher<sup>1</sup>, and A. Yu. Smirnov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*RadiaBeam Technologies, Santa Monica, CA 90404, USA*

*\*e-mail: kutsaev@radiabeam.com*

Received June 28, 2021; revised July 9, 2021; accepted July 19, 2021

**Abstract**—Radioactive isotopes have been until now one of the most frequently used sources of gamma radiation. A broad usage of these sources is explained by their compactness, low price, and clean energy spectrum of radiation. Nevertheless, the modern trend set by the IAEA is to find technologies alternative to such sources owing to the hazard of emergencies, leakage, or illegal usage. Bremsstrahlung generated by electron accelerators can be used for replacement of radioactive sources. However, to efficiently compete with radioisotope sources, accelerators should feature comparable weight, dimensions, and cost. This work presents an accelerator developed by RadiaBeam to replace such radioactive isotopes as Co-60.

*Keywords:* replacement of radioisotopes, linear electron accelerator, compact accelerators, split accelerating devices