

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ РАДИАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

П.Г.Власенко, В.В.Рожков

*Научно-производственный комплекс “Возобновляемые источники энергии и
ресурсосберегающие технологии” ННЦ ХФТИ,
г. Харьков, Украина, vrozhkov@kipt.kharkov.ua*

Розглянуті техніко-економічні аспекти застосування рентгенівського випромінювання для технологічних цілей, виконано порівняльний аналіз з гамма-установками різноманітного призначення, що діяли в СРСР, по основним технологічним характеристикам. Показана перспективність застосування рентгенівського випромінювання в енергетичному діапазоні 250...400 кеВ для виробничих процесів, які характеризуються невеликою продуктивністю та нерівномірністю (циклічністю) виходу продукції. Наведені технічні характеристики рентгенівського джерела, яке розроблено і випробувано в ННЦ ХФТИ, а також деякі результати біохімічних та мікробіологічних досліджень, які виконані при випробуваннях джерела на експериментальному стенді.

Рассмотрены технико-экономические аспекты применения рентгеновского излучения для технологических целей, выполнен сравнительный анализ с действовавшими в СССР гамма-установками различного назначения по основным технологическим характеристикам. Показана перспективность применения рентгеновского излучения в энергетическом диапазоне 250...400 кэВ для производственных процессов, характеризующихся невысокой производительностью и неравномерностью (циклическостью) выхода продукции. Приведены технические характеристики рентгеновского источника, разработанного и испытанного в ННЦ ХФТИ, а также некоторые результаты биохимических и микробиологических исследований, выполненных при испытании источника на экспериментальном стенде.

In this work technical and economics aspects of X-rays application for the technological purposes are considered, the comparative analysis with various purposes gamma - facilities working in the USSR on the basic technical characteristics is carried out. Perspectivity of 250-400 keV X-rays application for the production processes characterized by low productivity and nonuniformity (cyclicality) of production output. X-ray source designed and tested in NSC KIPT technical characteristics are shown, and some results of the biochemical and microbiological examinations during source testing on the experimental stand are given.

Для решения задач радиационных технологий в настоящее время широко используются как ускорители заряженных частиц [1, 2], так и γ -источники на основе изотопов ^{60}Co и ^{137}Cs [3, 4]. Технические, технологические и экономические аспекты применения этих источников ионизирующих излучений достаточно хорошо изучены [5, 6]. Однако во многих случаях возникает потребность постоянной радиационной обработки широкого ассортимента объектов при сравнительно незначительных объемах обработки. В этих случаях экспедиционно-транспортные расходы по доставке объектов к высокопроизводительным источникам ионизирующих излучений, чаще всего специализированным, могут стать препятствием для осуществления радиационной обработки. Создание же и эксплуатация мало-мощных источников ионизирующих излучений, как известно, повышает удельные затраты радиационной обработки [6]. Этот вывод справедлив как для ускорителей электронов, так и для изотопных γ -установок.

Задачу экономически оправданной обработки небольших массопотоков разнообразных объектов позволяют решить установки, генерирующие тормозное рентгеновское излучение в диапазоне энергий 250...400 кэВ. Этот энергетический диапазон излучения характеризуется достаточной для большинства случаев проникающей способностью (слой половинного ослабления в воде 5...25 см), с одной стороны, и простотой создания мощных электронных пучков для генерации излучения – с другой. В этом энергетическом диапазоне достаточно просто осуществляется вывод излучения в зону обработки объектов.

Анализ мирового опыта создания источников рентгеновского излучения [7-11] выявил возможность улучшения энергетических показателей для использования в процессах обработки различных типов объектов. Технические решения по повышению мощности излучения, выводимого из рентгеновского источника, с целью формирования поля для обработки пищевых продуктов и сравнение по-

лученных характеристик с прототипными установками представлены в [15].

Приведенная здесь же зависимость стоимости лучевой пастеризации рыбы от продолжительности использования установки с различными источниками излучения, создающими одинаковую мощность дозы, позволяет сделать вывод о большей в несколько раз экономической эффективности рентгеновских источников, особенно это проявляется в случаях, когда требуется периодическая работа установки, связанная со спецификой производственных условий. Мощность излучения, выделяющаяся в зоне облучения описанной в работе [15] установки на основе рентгеновского источника с электрической мощностью 500 кВт, составляет 3 кВт, что позволяет обрабатывать продукцию в ящиках 120 x 50 x 25 см с производительностью до 30 ткГр/ч.

Авторами была изучена возможность повышения мощности выводимого из источника рентгеновского излучения и повышения однородности поля излучения, что создало условия для разработки нового мощного рентгеновского источника для радиационных технологий. Линейный рентгеновский излучатель был получен благодаря применению цилиндрического лучепроницаемого коллектора длиной ~ 800 мм, на который надет лучепроницаемый секционированный соленоид с системой водяного охлаждения. С помощью переключения направления тока в обмотках соленоида достигалось перемещение «магнитной пробки» вдоль оси коллектора, т.е. происходило управление местом энергоснабжения электронного пучка. Этот прием сканирования электронного пучка по внутренней поверхности коллектора позволил обеспечить рассеивание тепловой мощности ~ 80 кВт и получить линейный осесимметричный источник рентгеновского излучения. Появилась возможность создания компактных, если требуется – мобильных, источников излучения, обеспечивающих достаточную производительность радиационно-технологических установок.

Особенно перспективными для радиационных технологий являются импульсные рентгеновские источники с максимальной энергией излучения 250...300 кэВ. Создание мощных импульсных пучков электронов с энергией до 300 кэВ - успешно решаемая техническая задача, когда обеспечивается высокая электрическая прочность устройства при сравнительно небольших габаритах (напряженность поля в импульсной электронной пушке ~100 кВ/см). Следует отметить, что для ряда объектов импульсное воздействие создает дополнительные технологические преимущества, что приводит, в конечном счете, к увеличению эффективности обработки и ее производительности [14].

Коэффициент преобразования мощности электронного пучка в рентгеновское излучение лежит в пределах 1,5...3% для рассматриваемого энергетического диапазона [12], однако, коэффициент использования излучения для этого диапазона энергий удается получить 0,7...0,8 для жидких перемешиваемых объектов, 0,4...0,7 для сыпучих объек-

тов, 0,2...0,3 для блочных объектов, что объясняется известной зависимостью массового коэффициента поглощения от энергии излучения [13].

В разработанных в ХФТИ импульсных рентгеновских источниках при торможении электронного пучка мощностью до ~ 80 кВт возникает рентгеновское излучение мощностью ~ 0,6 кВт, в поле которого можно обеспечить обработку дозой 10 кГр 60 мл жидкости в секунду. Производительность такой установки сравнима с производительностью γ -установок на основе ^{60}Co или ^{137}Cs , что показано в табл.1. Очевидно, что радиационно-технологическая установка с источником рентгеновского излучения снабжена местной биологической защитой и не представляет опасности после выключения питающего напряжения, что выгодно отличает ее от γ -установок с изотопными источниками. Это немедленно сказывается на стоимости установки и, в конечном счете, на экономической эффективности радиационной обработки [16].

Имеется богатый опыт генерирования электронных пучков в серийно выпускаемых устройствах с параметрами, близкими к оптимальным для преобразования энергии пучка в рентгеновское излучение. Разработаны и выпускаются многие элементы и узлы, которые могут лечь в основу серийной промышленной установки. Анализ показателей установки, с разработанным рентгеновским источником, проведенный в соответствии с рекомендациями, изложенными в [6], показывает экономическую целесообразность радиационной обработки дозой 10 кГр объектов, стоимость которых не менее 1 грн. за кг, либо вообще не существенна в денежном выражении (медицинский инструментарий и перевязочный материал, медикаменты, питьевая вода в специальных условиях и др.).

При реализации процессов обработки импульсным рентгеновским излучением объектов производительность процесса увеличивается до 10 раз, а удельная стоимость обработки соответственно уменьшается по сравнению с постоянным во времени излучением. В отличие от изотопных γ -установок мощность и производительность рентгеновского источника легко регулируется, что превращает его в многоцелевой без дополнительных затрат.

В ходе проведенных исследований разработан и изготовлен макет мощного рентгеновского источника, принципиально отличающийся от полномасштабной установки только средней мощностью. На макете были экспериментально проверены массово-энергетические соотношения процесса обработки объектов рентгеновским излучением и общие принципы формирования оптимальной формы поля излучения. Была также изготовлена и испытана система перемещения облучаемых объектов в зоне облучения, обеспечивающая вращение объектов вокруг излучателя и вокруг своей оси, чем достигалась максимальная возможная однородность поглощенной дозы. Кроме этого, на макете велись исследования процесса обработки рентгеновским излучением

различных биообъектов с целью повышения их потребительских качеств.

Основные расчетные технические данные рентгеновского технологического источника, полученные на основе результатов испытания макета, представлены в табл. 2.

Основная оценка пострадиационных изменений производилась по изменениям в белковой и липидных компонентах молока.

Облучение образцов производили в диапазоне доз 2...9 кГр. Измеряли титруемую кислотность в градусах Тернера, о состоянии белков судили по содержанию общего белка, дифференциальным спектрам белков в УФ-диапазоне и количеству аминного азота, о состоянии липидов – по коэффициенту погашения при $\lambda = 233$ нм, отражающему содержание в них сопряженных двойных связей.

Выявлена временная зависимость титруемой кислотности, отражающей скорость сквашивания молока. При дозе 2 кГр скорость этого процесса резко замедляется по сравнению с контролем, а при дозе 9 кГр титруемая кислотность не изменяется даже на 6-е сутки. В результате облучения происходит резкое увеличение по сравнению с контролем содержания аминного азота, что может свидетельствовать о разрушении части белков молока. Дифференциальные спектры свидетельствуют о конформационных изменениях белков молока после облучения. Достоверных различий в динамике коэффициента погашения липидов молока между контролем и облученными образцами не обнаружено.

Таблица 1

ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Наименование	Производительность ткГр/ч.	Активность облучателя кКи	Площадь, занимаемая установкой, м ²
1. γ -установка для предпосевного облучения семян РОС-150	$1,5 \cdot 10^{-2}$	24	Передвижная
2. γ -установка для облучения картофеля и других продуктов с целью увеличения сроков хранения	1,0	110	350
3. γ -установка для стерилизации ризоторфина	5,0	800	300
4. Судовая γ -установка для облучения рыбы и рыбопродуктов	0,25	85	4
5. γ -установка для стерилизации медицинской продукции «Пектоза»	0,3	230	--
6. γ -установка для стерилизации перевязочных средств «Парча»	1,0	740	--
7. Установка на основе рентгеновского источника (АЕГ Телефонкен)	30,0	—	80
8. Установка на основе рентгеновского источника (ХФТИ)	2,5	—	25 (передвижная)

Таблица 2

ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА

ПАРАМЕТР	Ед. измерения	Значение
1. Глубина обработки водозэквивалентных объектов	см	10,0
2. Коэффициент неравномерности поглощенной дозы, не более	%	25
3. Производительность	$\frac{T * \kappa \varepsilon}{\tau}$	2,5
4. Максимальная энергия излучения	МэВ	0,28
5. Мощность тормозного излучения	кВт	0,6
6. Режим работы – круглосуточный	ч/год	6000
7. Мощность, потребляемая от сети	кВт	130

Кроме этого, модельные объекты контаминировались микроорганизмами вида E.Coli и St.aureus в количестве $2,5 \times 10^8$ микробных тел/г.

После контаминации производилась обработка объектов рентгеновским излучением в различных дозах. Жидкие молочные продукты и творог обрабатывались в дозах 2, 5, 9 кГр. Сухие молочные продукты обрабатывались в дозах 5, 7, 8, 10 кГр.

При обработке в дозе 2 кГр наблюдается снижение уровня обсемененности на 3-4 порядка в жидких объектах и твороге. Для дозы 5 кГр снижение обсемененности составляет 5...6 порядков для жидких объектов и 4...5 порядков для сухих. При дозе 7 кГр снижение обсемененности составляет 5 порядков для сухих продуктов, а при дозах 8 и 10 кГр контаминанты не обнаруживаются. Для жидких продуктов контаминирующие микроорганизмы не обнаруживаются при дозе 9 кГр. Коэффициент использования излучения при проведении исследований составлял ~ 0,25, в результате чего расчетная производительность при обработке дозой 1 кГр составляет ~ 2,5 т/ч. При обработке жидких перемешиваемых объектов с коэффициентом использования излучения ~ 0,8 производительность повышается до 8 м³ жидкости в час. При создании специализированной установки для обработки однотипных объектов возможно повышение коэффициента использования излучения в результате оптимизации соотношения формы поля излучения и формы и размеров облучаемых объектов. При сравнении γ -установки для облучения пищевых продуктов РПП-150, производительность которой составляет 1 т/кГр/ч, с рентгеновской установкой производительностью 2,5 т/кГр/ч, обращает на себя внимание несравненно больший объем капитальных затрат и те технические трудности, которые возникают при транспортировке, монтаже, обслуживании и утилизации отработавших источников излучения, что, в конечном счете, отражается на стоимости облучения продукции. Преимущество по простоте обслуживания по сравнению с рентгеновским источником γ -установка не имеет, однако является более опасной. На основании приведенного сравнения технических характеристик γ -установок и рентгеновских источников можно сделать вывод о том, что в условиях небольших массопотоков с периодическим циклом работы радиационно-технологические установки на основе рентгеновских источников обладают рядом преимуществ: более низкая стоимость обработки; возможность включения в существующие технологические линии; большая безопасность.

Исследования по разработке и созданию технологических рентгеновских источников, выполненные в ХФТИ, были направлены на повышение экономичности, улучшение качества облучения, снижение их стоимости. Пути повышения экономично-

сти являются повышение эффективности преобразования и использования рентгеновского излучения, снижение потребления энергии в результате прогрессивных приемов формирования и управления пучком электронов. Качество облучения предполагается повышать путем оптимизации траектории движения облучаемых объектов в поле излучения, размеров и формы кассет для облучения конкретных объектов. Разработанный и испытанный источник излучения и установка на его основе могут служить прототипом промышленной установки для включения в технологические процессы производства продукции, которые характеризуются производительностью ~ 1...2 т в сутки и неравномерностью (циклическостью) выхода продукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Доклады I-VI Всесоюзного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве. М.: «ЦНИИ Атоминформ».
2. Е.А. Абрамян. Промышленные ускорители электронов. М.: «Энергоатом», 1986.
3. Е.С. Перцовский, Э.В. Сахаров, В.А. Долинин. Применение радионуклидов и излучений в пищевой промышленности. М.: «Атомиздат», 1980.
4. Н.Г. Коньков Радиационная технология и оборудование. // «Вопросы атомной науки и техники». Серия: «Радиационная техника». М.: «Энергоатомиздат», 1985, вып. 2 (30), с. 29-46.
5. А.С. Штань Радиационная техника. Современное состояние и тенденция развития. // «Вопросы атомной науки и техники». Серия «Радиационная техника». М.: «Энергоатомиздат», 1985, вып. 2 (30), с. 3-12.
6. Ю.Д. Козлов, К.И. Никулин, Ю.С. Титков. Расчет параметров и конструирование радиационно-химических установок с ускорителями электронов. М.: Атомиздат, 1976.
7. А.с. СССР № 968866 ОИПОТЗ № 39, 1982.
8. А.с. СССР № 1051616 А ОИПОТЗ № 40, 1983.
9. А.с. СССР № 1141476 А ОИ 7, 1985.
10. Europäische patentanmeldung № 0 104 515 A2.
11. United States Patent № 0 336 476
12. В.К. Шмелев Рентгеновские аппараты. М.: Энергия, 1973.
13. Farrell I.P. *Radiat Phys. and Chemistry*. 1979, v.14, p.377-387.
14. Материалы VI Всесоюзного совещания по микродозиметрии. Канев, 1989, М., 1989.
15. Атомная техника за рубежом, М: Атомиздат, № 7, 1969. с. 39,
16. K. Votsumoto, H. Sunaga, S. Tanaka Progress in radiation. proceeding // *Radiation Phys. and Chem.* 1988, v.31, p.363-368.