

данный рейс и рассмотрение промежуточных остановок. Это нужно для того, чтобы сопоставить данные с жалобами пассажиров, и выявить, насколько происходит отклонение от маршрута.

Третий этап заключается в назначении ответственного за оптимизацию процесса. А если быть точнее - ответственного в группе, которая будет заниматься данной проблемой. Человек-руководитель над процессом необходим: на его плечах лежит мониторинг, анализ, мероприятия по улучшению.

Действия, направленные на улучшения стали четвертым этапом модели. Существующие жалобы анализируются, после чего намечаются действия, направленные на улучшение. Действия могут быть связаны с созданием нового, более выгодного и удобного маршрута или же с устранением ошибок в текущем.

Пятым и шестым этапами стали запуск нового или «исправленного» маршрута, а так же анализ полученных результатов. В случае повторного выявления «слабых мест» в запущенном маршруте, придется вновь передвинуться на второй этап в модели и повторить процесс еще раз.

Следовательно, оптимизировать работу предприятия нужно, если вы считаете, что по некоторым показателям оно должно работать лучше.

Также оптимизация может помочь, если все работники чётко знают, что им нужно делать, грамотно решают поставленные перед ними задачи и чтобы улучшить производство им достаточно просто вручить более совершенный инструментарий, автоматизировать часть производства.

## **ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ В ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЦИФРОВОЙ РАДИОГРАФИИ**

*Игнатенко К.В., Осипов С.П., Осипов О.С.*

*Томский политехнический университет, г. Томск*

*Научный руководитель: Осипов С.П., к.т.н., ведущий научный*

*сотрудник Российско-китайской научной лаборатории*

*радиационного контроля и досмотра*

### **1 Введение**

Для контроля крупногабаритных объектов методами цифровой радиографии (ЦР) используются источники высокоэнергетического рентгеновского излучения – бетатроны и линейные ускорители электронов [1–3]. С целью обеспечения высокого качества контроля,

которое характеризуется чувствительностью, пространственным разрешением и производительностью, для регистрации рентгеновского излучения применяют линейки, панели или матрицы радиометрических детекторов с малым поперечным размером и, как правило, незначительной толщиной, не обеспечивающей уровня эффективности регистрации, далекого от единицы. Высокоэнергетические фотоны при взаимодействии с материалом единичного сцинтилляционного детектора малого чувствительного объема оставляют в нем незначительную долю энергии [4], большая же часть энергии переносится в соседние детекторы или во внешнее пространство без регистрации. Энергия из сцинтилляционных детекторов переносится высокоэнергетическими вторичными фотонами и вторичными электронами, обладающими высокой проникающей способностью. В работе [5] приведены результаты радиальные зависимости среднего значения и среднего значения квадрата поглощенной энергии зарегистрированного фотона. В указанной работе не учитывается утечка вторичных электронов. В статье [6] частично устраняется упомянутый недостаток. Имеющихся в литературе данных недостаточно для корректного учета диссипации энергии из сцинтилляционных детекторов малого объема, входящих в состав систем ЦР. Решение этой задачи методом натурального эксперимента не представляется возможным в силу того, что задача является многопараметрической. В связи с этим, альтернативы имитационному моделированию не существует.

## **2 Основы алгоритма моделирования регистрации высокоэнергетических фотонов сцинтиллятором**

Метод Монте-Карло применительно к переносу и регистрации гамма- и рентгеновского излучения подробно рассмотрен во множестве работ, например, [7, 8].

На первом этапе необходимо определиться с геометрией расчетов и с исходными данными.

### **2.1 Геометрия расчетов и исходные данные**

Будем рассматривать цилиндрические сцинтилляторы радиусом  $r$  и толщиной  $h$ . Пучок фотонов является точечным, падает по оси пучка.

Материал сцинтиллятора варьируется – NaI, CsI, CdWO<sub>4</sub>. Источник излучения немонотонноэнергетический с энергетическим спектром, описываемым формулой Шиффа. Проверочные расчеты предполагается провести для монотонноэнергетических источников гамма-излучения. Диапазон изменения максимальных энергий рентгеновского излучения

характерен для высокоэнергетической радиографии и рентгеновской вычислительной томографии – от 2 МэВ до 10 МэВ.

Целью расчетов является оценка среднего значения  $\overline{E_{\Pi}}$  и среднего значения квадрата  $\overline{E_{\Pi}^2}$  поглощенной энергии зарегистрированного фотона с учетом утечки энергии вторичных фотонов и электронов.

## 2.2 Алгоритм моделирования

Алгоритм моделирования переноса и регистрации рентгеновских фотонов состоит из нескольких повторяющихся этапов. На рис. 1 приведена блок – схема расчета методом Монте-Карло среднего значения и среднего значения квадрата поглощенной энергии зарегистрированного фотона. Рассмотрим основные этапы алгоритма.

1. Розыгрыш энергии фотона методом Неймана [8].
2. Расчет точки входа в чувствительный объем.
3. Розыгрыш пробега фотона.
4. Вычисление координат взаимодействия и проверка вылета из сцинтиллятора.
5. Розыгрыш вида взаимодействия.
6. Розыгрыш направления рассеяния и энергии вторичного фотона.
7. Розыгрыш направления движения вторичного электрона.
8. Подсчет энергии, оставленной вторичным электроном в приближении непрерывного замедления.
8. Переход к пункту 3.

## 3 Проверка адекватности имитационной модели

В работе [5] приведены аппроксимации зависимостей  $\overline{E_{\Pi}}(E, r, h)$  и  $\overline{E_{\Pi}^2}(E, r, h)$  для некоторых сцинтилляторов и моноэнергетических источников излучения, также указан подход к оценке максимальных значений  $\overline{E_{\Pi}}$  и  $\overline{E_{\Pi}^2}$  для рентгеновского излучения. Учет вторичных электронов приводит к равенствам  $\overline{E_{\Pi}} = \overline{E_{\Pi}^2} = 0$  при условии  $r=0$  или  $h=0$ .

## Заключение

В работе предложена имитационная модель регистрации высокоэнергетических рентгеновских фотонов, которая может быть использована для расчета параметров систем цифровой радиографии и рентгеновской вычислительной томографии.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания в сфере научной деятельности.*

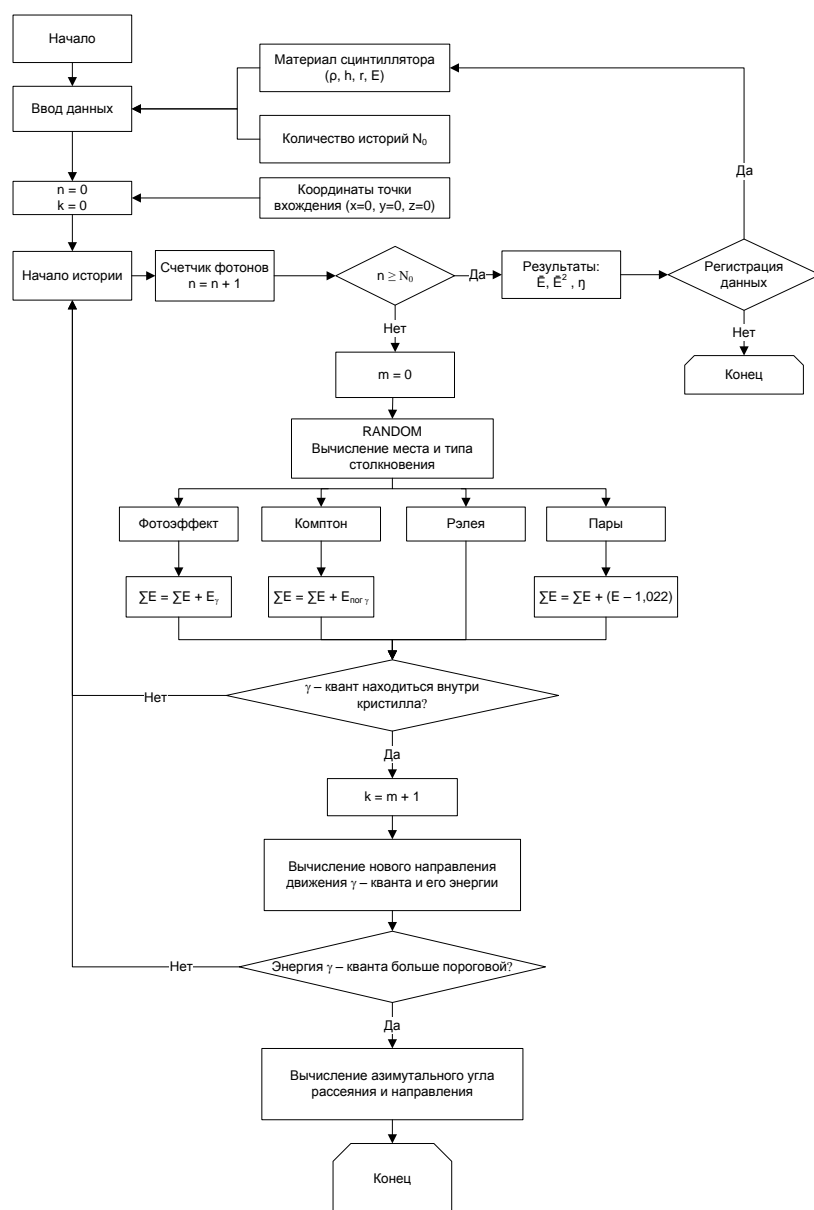


Рис. 2. Блок – схема расчета методом Монте-Карло среднего значения и среднего значения квадрата поглощенной энергии зарегистрированного фотона

### Список информационных источников

1. Ueaska, M., Dobashi, K., Fujiwara, T., Pei, C., Wu, W., Kusano, J., Nakamura, N., Yamamoto, M., Tanabe, E., Ohya, S., Hattori, Yu., Miura, I., Ishida, M., Kimura, Yo. On-site nondestructive inspection by upgraded portable 950 keV/3.95 MeV X-band linac x-ray sources // Journal of Physics

B: Atomic, Molecular and Optical Physics. – 2014. – Vol. 47. – No. 23. – No. paper 234008. – 10 p.

2. Li, Y., Li, Y., Wang, S., Li, S., He, H. The development and evaluation of solid-state detector arrays for high energy X-ray imaging // Nuclear Science Symposium Conference Record, IEEE. – 2003. – Vol. 2. – P. 1374–1377.

3. Chakhlov, S V., Kasyanov, S.V., Kasyanov, V.A., Osipov, S.P., Stein, M.M., Stein, A.M., Xiaoming, S. Betatron application in mobile and relocatable inspection systems for freight transport control // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing. – 2016. – Vol. 671. – No. 1. – No. paper 012024. – 5 p.

4. Касьянов, В.А., Касьянов, С.В., Осипов, С.П. Особенности регистрации высокоэнергетического тормозного излучения в досмотровом контроле // Датчики и системы. – 2006. – № 3. – С. 10–13.

5. Завьялкин, Ф.М., Осипов, С.П. Зависимость среднего значения и флуктуаций поглощенной энергии от радиуса цилиндрического сцинтиллятора // Атомная энергия. – 1985. – 59. – вып. 4. – С. 281–283.

6. Завьялкин, Ф.М., Осипов, С.П. Расчет функций рассеяния линейки сцинтилляционных детекторов // Атомная энергия. – 1986. – Т. 60. – вып. 2 – С. 146–148.

7. Кольчужкин, А.М. Метод «Монте-Карло» в теории переноса излучения. Учебное пособие. – Томск: ТПУ. – 2004. – 104 с.

8. Руководство по радиационной защите для инженеров. Т. I. Перевод с англ. Под ред. Бродера Д.А. – М.: Атомиздат. – 1972. – 424 с.

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕНТГЕНОСКОПИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ**

*Карбина Ю.С.*

*Томский политехнический университет, г. Томск*

*Научный руководитель: Плотникова И.В., к.т.н., доцент кафедры физических методов и приборов контроля качества*

Надежность электронной техники во многом зависит от надежности межблочного монтажа и печатных плат, следовательно, контроль качества печатных плат на всех этапах производства необходим, с помощью различных методов контроля.

*Рентгеноскопический контроль плат* в технологии сборки печатных узлов предназначен в первую очередь для контроля пайки скрытых выводов. Так, например, после пайки компонента BGA просмотреть визуальным методом все шарики припоя не