

PACS 61.80

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ПРИ ЭЛЕКТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ НЕОДНОРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

С.П. Гоков, О.А. Демешко, В.И. Касилов, С.С. Кочетов, Л.А. Махненко,  
И.В. Мельницкий, О.А. Шопен

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
61108, Харьков, ул. Академическая 1, Украина

E-mail: [gokov@kipt.kharkov.ua](mailto:gokov@kipt.kharkov.ua)

Поступила в редакцию 7 октября 2009г.

Данная работа является дополнением к проводимым ранее исследованиям по аналитическому сопровождению радиационных технологий, внедряемых на ускорителе ЛУЭ-300. Здесь более детально рассмотрена задача определения поверхностной и глубинной поглощенной дозы при облучении быстрыми электронами неоднородных по плотности объектов. При этом учитываются технические особенности радиационного стенда ускорителя, в том числе не ортогональность пучка и гауссово распределение плотности потока электронов по сечению. Моделирование процесса прохождения электронов через вещество исследуемых объектов и формирование глубинной дозы выполнено с помощью пакета программ PENELOPE, основанных на методе Монте-Карло. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных и показано, что расхождение между поглощенными дозами в наиболее характерных точках исследуемых образцов не превышает ~ 20% при моделировании и ~ 30% при расчете.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** линейный ускоритель, поглощенная доза, электронный пучок, гауссово распределение пучка, радиационный стенд, двухстороннее облучение.

## ABSORBED DOSE DETERMINATION ON ELECTRON IRRADIATION OF INHOMOGENEOUS OBJECTS

S.P. Gokov, O.A. Demeshko, V.I. Kasilov, S.S. Kochetov, L.A. Makhnenko, I.V. Mel'nitsky, O.A. Shopen

National science center "Kharkov institute of physics and technology"

61108 Kharkov, Academician 1 str., Ukraine

The present paper is complementary to our previous investigations on the analytical maintenance of radiation technologies introduced at the accelerator LINAC-300. Here a more detailed consideration is given to the problem of determining the surface/depth doses absorbed during fast electron irradiation of density-nonuniform objects. In this connection, technical peculiarities of the accelerator's radiation test bench are taken into account, including the beam nonorthogonality and the Gaussian distribution of electron flux density in the cross section. The process of electron passage through the object matter under study and the depth dose formation have been simulated by using the packaged programs PENELOPE based on the Monte-Carlo technique. The comparison between calculated and experimental data, performed in the work, has shown that the divergence between the absorbed doses measured at the most characteristic points of the samples under study is not higher than ~ 20% at simulation and ~ 30% in calculations.

**KEY WORDS:** linear accelerator, absorbed dose, electron beam, Gaussian distribution of beam, radiation test bench, bilateral irradiation.

## ВИЗНАЧЕННЯ ПОГЛИНЕНОЇ ДОЗИ ПРИ ЕЛЕКТРОННОМУ ОПРОМІНЕННІ НЕОДНОРІДНИХ ОБ'ЄКТІВ

С.П. Гоков, О.А. Демешко, В.І. Касілов, С.С. Кочетов, Л.А. Махненко, І.В. Мельницький, О.А. Шопен

Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут",

61108, Харків, вул. Академічна 1, Україна

Дана робота є доповненням до проведеного раніше дослідженням з аналітичного супроводу радіаційних технологій, які впроваджуються на прискорювачі ЛУЕ-300. Тут більш детально розглянута задача визначення поверхневої і глибинної поглиненої дози при опроміненні швидкими електронами неоднорідних по щільності об'єктів. При цьому враховуються технічні особливості радіаційного стенда прискорювача, у тому числі не ортогональність пучка і гаусів розподіл щільності потоку електронів по перетині. Моделювання процесу проходження електронів через речовину досліджуваних об'єктів і формування глибинної дози виконано за допомогою пакета програм PENELOPE, заснованих на методі Монте-Карло. Проведено порівняння розрахункових і експериментальних даних і показано, що розбіжність між поглиненими дозами в найбільш характерних крапках зразків, які досліджувались не перевищує ~ 20% при моделюванні і ~ 30% при розрахунку.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** лінійний прискорювач, поглинена доза, електронний пучок, гаусів розподіл пучка, радіаційний стенд, двостороннє опромінення.

При выборе методики радиационной обработки различных объектов необходимо учитывать оптимальное соотношение производительности и качества, характеризуемого возможностью формирования радиационного поля, при котором обеспечивалась бы достаточная равномерность распределения поглощенной энергии по всему объему облучаемого объекта. В этом случае математическое моделирование этого процесса дает необходимую информацию для отработки конкретного способа и режимов облучения разных групп объектов, отличающихся габаритами, формой и физическими свойствами. Это особенно важно при проведении двухстороннего облучения, когда незначительные отклонения плотности среды в периферийных частях объекта могут привести к заметным ошибкам формирования дозы в его центральной плоскости. Предварительное моделирование

процесса облучения, подбор объектов по типам и параметрам, диагностика дозовой нагрузки показали, что двухсторонний способ облучения оказывается наиболее рациональным, как с точки зрения достижения необходимой равномерности дозы по глубине объектов, так и высокой производительности.

Цель работы: при помощи моделирования процессов прохождения пучка электронов через объекты различной плотности определить оптимальные условия их облучения на радиационном стенде ускорителя ЛУЭ-300.

### МЕТОДИКА ОБЛУЧЕНИЯ

Согласно применяемой технологии на ЛУЭ-300 [1], в процессе облучения объекты совершают возвратно поступательное движение и многократно под углом  $55^{\circ}$  пересекают пучок электронов. Сеанс облучения представляется двумя циклами с одинаковым количеством проходов объектов в зоне пучка и переворотом вокруг вертикальной оси на  $180^{\circ}$  между циклами. Поверхностная поглощенная доза (доза, поглощенная в тонком приповерхностном слое вещества) определяется скоростью и количеством проходов объектов, а также плотностью падающего потока электронов. В нашем случае пучок имеет гауссов закон распределения плотности по сечению, среднеквадратичный радиус которого определяется начальной энергией электронов, материалом и толщиной выходной фольги и расстоянием до объекта. Эти данные выбираются в зависимости от габаритов объектов по вертикали и допустимого отклонения дозы на краях (обычно, не более 30%).

Остановимся на рассмотрении технологических особенностей обработки основного вида продукции – хирургического шовного материала (нитей кетгута, капрона и шелка), который поставляется на облучение в ампульной или пакетной упаковке. Изделия по типоразмерам нити технологически (нитью в одну сторону) и в одинаковом количестве укладываются в плоские картонные коробки (упаковки), которые затем попарно для ампул и по три штуки для пакетов komponуются в блоки. Наиболее сложными объектами для облучения и дозиметрии являются упаковки кетгута в ампулах, нижняя часть которых  $\sim 1/3$  (при облучении ампулы располагаются вертикально), включающая воздух, стекло, водный раствор спирта и кетгут, имеет существенно более высокую среднюю плотность, нежели верхняя часть, содержащая только воздух и стекло (не считая упаковки).

Количественной характеристикой взаимодействия ускоренных электронов с веществом плотностью  $\rho$ , определяющей поглощенную дозу, является его полная массовая тормозная способность, в которую входят потери энергии  $dE$  в результате столкновений и излучения на пути  $dl$  (ионизационные и радиационные потери). В случае пренебрежения ядерными реакциями, полная массовая тормозная способность вещества представляется только двумя составляющими:

$$\varepsilon_{tot} = \frac{1}{\rho} \left( \frac{dE}{dl} \right)_{tot} = \frac{1}{\rho} \left( \frac{dE}{dl} \right)_{col} + \frac{1}{\rho} \left( \frac{dE}{dl} \right)_{rad}. \quad (1)$$

Существуют достаточно подробные таблицы с описанием характеристик различных веществ и смесей [2]. Эти базовые данные нами были использованы при расчете средней плотности и массовой тормозной способности облучаемых объектов, которые представляют собой более сложную, 4-х компонентную макро-систему. Сечение многорядной упаковки с плотно уложенными ампулами представлено на рис.1.

Для определения средней величины  $\bar{\varepsilon}$  выделим элемент объема объекта в форме прямоугольного параллелепипеда с ребрами,  $a = c = 2r$  и  $b = 2r + r\sqrt{3}(n-1)$ , где  $r$  – радиус ампулы и  $n$  – число рядов ампул в упаковке

( $r\sqrt{3} = h$  – высота равностороннего треугольника  $ABC$  со стороной  $2r$ ). Посредством несложных математических операций, можно получить далее выражения:

$V_i = S_i \cdot 2r$  – для парциального объема  $i$ -го компонента объекта (где  $S_i$  – площадь сечения, занимаемая каждым компонентом, т.е. часть от общей площади сечения элемента объема равного  $b \cdot 2r$ );  $m_i = V_i \cdot \rho_i$  – парциальной массы  $i$ -го компонента;  $M = \sum_1^4 V_i \cdot \rho_i$  – суммарной массы элемента объема по всем четырем компонентам.

При этом выражение средней плотности объекта можно записать в виде:

$$\bar{\rho} = \frac{M}{(2r)^2 b} = \frac{1}{2r} \sum_1^4 \Delta l_i \cdot \rho_i, \quad (2)$$

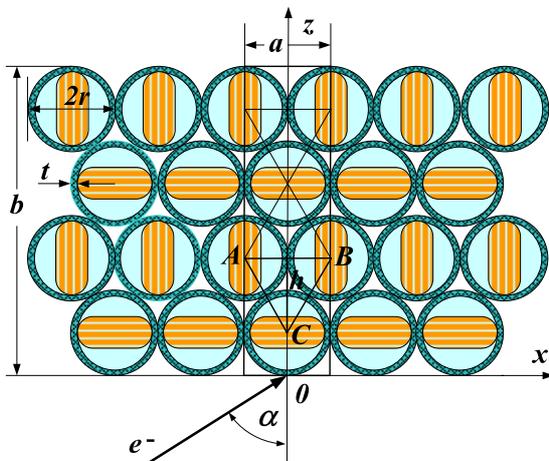


Рис.1. Сечение 4-х рядной упаковки ампул с кетгутом.

$2r = 1,0$  см – внешний диаметр ампулы;

$t = 0,05$  см – толщина стенки ампулы;

$b = 3,6$  см – толщина упаковки.

где  $\Delta l_i = S_i/b$  есть некоторая приведенная толщина слоя  $i$ -го компонента в элементе объема. Иными словами, объект условно представляется четырехслойной структурой с различными физическими свойствами вещества по слоям. В принципе, для определения средней плотности и энергетических потерь, элемент объема по размеру  $a$  может быть выбран любым кратным  $2r$ , поскольку при этом сохраняется соотношение парциальных масс компонентов. Вместе с тем, в любом случае, средняя плотность будет зависеть от общего количества рядов ампул в объекте (за счет влияния асимметрии крайних рядов), и естественно будет возрастать с увеличением их количества.

Если согласно формуле (1) потери энергии электронов в  $i$ -ом слое можно представить, как  $\Delta E_i = \varepsilon_i \cdot \rho_i \cdot \Delta l_i$ , то средняя величина массовой тормозной способности объекта может быть представлена следующим выражением:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{\bar{\rho}} \cdot \frac{1}{2r} \cdot \sum_1^4 \varepsilon_i \cdot \rho_i \cdot \Delta l_i. \quad (3)$$

Величины исходных параметров  $\rho_i$  и  $\varepsilon_i$  отдельных компонентов, взятых из таблиц работы [2], а также средние значения  $\bar{\rho}$  и  $\bar{\varepsilon}$  нижней и верхней частей облучаемого объекта приведены в таблице.

Таблица

Величины  $\rho_i$  и  $\varepsilon_i$  для различных облучаемых компонентов

	воздух	стекло	раствор	кетгут		низ	верх
$\rho_i, \text{г/см}^3$	$1,205 \cdot 10^{-3}$	2,4	0,8	1,15	$\bar{\rho}$	1,088*	0,43
$\varepsilon_{i(\text{tot})}, \text{МэВсм}^2/\text{г}$	2,3953	2,1680	2,3375	2,3105	$\bar{\varepsilon}$	2,2654*	2,1685

\* Энергия электронов – 16 МэВ; заполнение ампул по сечению кетгутом – 50%.

Полученные величины  $\bar{\varepsilon}$  позволяют вычислить распределение поверхностной дозы по высоте объектов по формуле, предложенной в работе [1]

$$D \approx \frac{N \cdot I_0 \cdot \bar{\varepsilon}}{\sqrt{2\pi} \cdot e \cdot \sigma \cdot v \cdot \cos(\alpha)} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right), \quad (4)$$

где  $I_0$  – средний ток пучка электронов;  $N$  – количество односторонних проходов объектов в зоне пучка;  $e$  – заряд электрона;  $\sigma$  – среднеквадратичный радиус пучка, который предполагается постоянным для всей зоны облучения; ошибка, обусловленная не ортогональностью пучка  $\sim 1,5\%$ ;  $v$  – скорость перемещения объектов;  $\alpha$  – угол между осью пучка и нормалью к плоскости перемещения объекта;  $y$  – вертикальная координата (ось  $y$  направлена перпендикулярно плоскости рисунка, перемещение объекта осуществляется в направлении оси  $x$ ). Из выражения (4) следует, что поверхностная доза существенно зависит от угла падения электронов.

### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В работе было проведено моделирование процессов прохождения быстрых электронов через вещество и формирования глубинной дозы при помощи пакета лицензионных программ PENELOPE [3], основанных на методе Монте-Карло. Программа PENSLAB позволяет имитировать электрон - фотонные ливни в сложных материальных структурах (смесях) в виде пластин. При этом учитываются все виды электромагнитных процессов в веществе (упругое и неупругое рассеяние электронов позитронов, тормозное излучение электронами и позитронами, аннигиляция позитронов, когерентное рассеяние, комптоновское рассеяние фотонов, фотоэлектрическое поглощение фотонов, рождение электрон-позитронных пар).

Результаты моделирования, выполненного для разных значений углов падающего потока электронов 0, 15, 30, 45, 55 и 65 градусов при средней энергии 16 МэВ и плотности эквивалентного вещества  $\sim 1,1 \text{ г/см}^3$ , представлены на рис.2. Как видно из этого рисунка, с увеличением угла падения электронов имеет место не только возрастание удельной дозы на поверхности объекта, что согласуется с выражением (4) и является положительным моментом, но и существенное изменение далее характера распределения дозы по глубине. При этом, смещаются к периферии максимумы кривых, обусловленные рождением вторичных частиц, и уменьшается глубина полного поглощения электронов, что естественно приводит к необходимости уменьшения допустимой толщины облучаемых объектов.

Проведем более детальное численное и аналитическое сравнение результатов облучения под углами  $\alpha = 55^\circ$  и  $\alpha = 0$  для конкретных случаев.

В качестве примера рассмотрим один из режимов работы ускорителя: энергия электронов  $E=16 \text{ МэВ}$ , средний ток пучка  $I_0=87 \text{ мкА}$ , и далее  $\alpha = 55^\circ$ ,  $\sigma_0 = 6,5 \text{ см}$ ,  $v = 5 \text{ см/сек}$  и  $N = 7$ . Несколько упрощая задачу, расчеты будем выполнять в предположении гауссова распределения плотности потока электронов в сечении на плоскости объекта, но при условии параллельности их траекторий, т.е., при нулевой расходимости. На рис.3а, б

представлены результаты моделирования двухстороннего облучения при оптимальной толщине спаренных в блоке упаковок, т.е. когда при заданной энергии потока электронов и плотности упаковок выполняется равенство величины дозы на боковых сторонах и в центральной плоскости блока. Показаны два возможных варианта облучения.



Рис.2. Зависимость удельной величины линейной дозы от глубины прохождения электронов с энергией 16 МэВ через эквивалентное вещество со средней плотностью  $1,1 \text{ г/см}^3$  для разных углов падения электронного пучка, соответственно кривые: 1 –  $0^\circ$ , 2 –  $15^\circ$ , 3 –  $30^\circ$ , 4 –  $45^\circ$ , 5 –  $55^\circ$  и 6 –  $65^\circ$ .

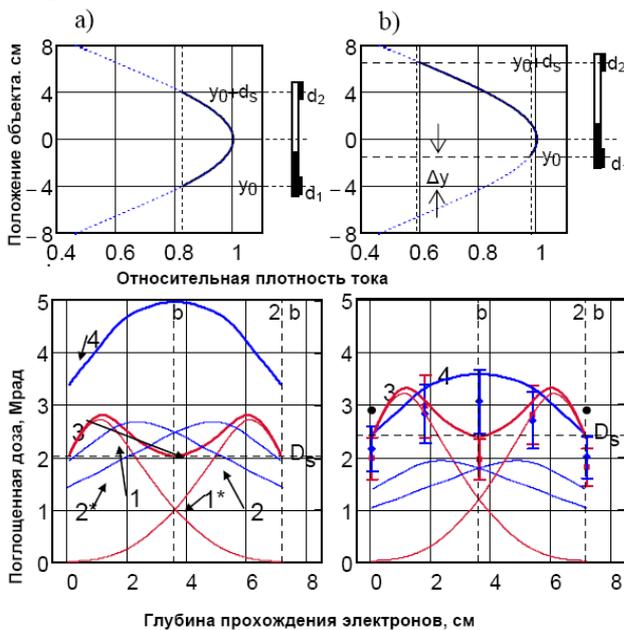


Рис.3а, б Поглощенная доза по глубине блока из 2-х упаковок с оптимальной толщиной.

Кривые 1 и 1\* – дозовые зависимости при облучении нижней части блока ( $1,1 \text{ г/см}^3$ ) с каждой стороны; кривая 3 – суммарная доза. Кривые 2 и 2\* – дозовые зависимости при облучении верхней части блока ( $0,4 \text{ г/см}^3$ ) с каждой стороны; кривая 4 – суммарная доза. Кружочками показаны результаты расчета дозы по формуле (4). Результаты измерений: квадратики – дозиметров  $d_1$ , ромбики – дозиметров  $d_2$ .

ностороннем облучении невозможно. Поэтому при сравнении этих вариантов в случае двухстороннего облучения необходимо уменьшить число односторонних проходов до 6-ти по сравнению с 7-ю при одностороннем облучении, что приводит к возрастанию эффективности до 1,8 раза. Сравнивая результаты определения поверхностной дозы путем моделирования и расчета по формуле (4) видно, что последние на  $\sim 17,4\%$  дают более высокие значения. Это отличие, по-видимому, связано с неоднозначностью определения линейных потерь, которые в первом случае непосредственно вычисляются программой PENSLAB при вводе соответствующего атомного состава молекулы и плотности эквивалентного вещества объекта, во втором – на основе величины массовой тормозной способности  $\bar{E}$ , вычисленной по данным для 4-х компонентов объекта, взятым из таблиц

Первый вариант рис.3а соответствует условию, когда блок упаковок с вертикально установленными ампулами располагается строго симметрично (по вертикали) относительно оси пучка (см. верхнюю часть рис.3а). Из расчета следует, что при оптимальной толщине  $b = 3,6 \text{ см}$  (это соответствует четырем рядам плотно упакованных ампул, см. рис.1) в этом режиме облучения за семь проходов в трех контрольных точках достигается уровень дозы (кривая 3)  $D_s = 1,9 \text{ Мрад}$ .

Вместе с тем, как показано на кривой 4, за счет меньшей средней плотности, поглощенная доза в верхних частях объекта оказывается существенно больше. По сути это не столь важно, так как происходит на стекле и не влияет на качество облучения кетгута. Однако, как показано на рис.3б, в случае второго варианта, если оптимизировать положение объекта и его поднять (или опустить пучок) на величину  $\Delta y = 1,8 \text{ см}$  (см. верхнюю часть рис.3б), то при этом не только выполняется равенство дозы по высоте на обеих частях объекта, но и увеличивается на  $\sim 20\%$  ее уровень на нижней (главной) части объекта  $D_s = 2,3 \text{ Мрад}$ . На рис.3а видно, что для удобства сравнения с экспериментом, расчетные точки выбраны на расстоянии  $\pm 4 \text{ см}$  относительно оси пучка, учитывая положение дозиметров  $d_1$  и  $d_2$ , а не по длине ампул  $10 \text{ см}$ , определяющих высоту блока.

Данные рис.3а, б позволяют оценить преимущество двухстороннего способа облучения вообще, и в нашем случае неоднородных по высоте объектов в частности. Как видно из рис.3а, при облучении блока только с одной стороны (кривая 1), снижение дозы ниже контрольного уровня  $D_s = 1,9 \text{ Мрад}$  наблюдается после  $\sim 2,3 \text{ см}$  пробега электронов. При облучении же объекта с обеих сторон (суммарная кривая 3) доза оказывается больше контрольного уровня на полной глубине блока  $2b = 7,2 \text{ см}$ . Если за эффективность облучения условно принять отношение толщины объектов ко времени их обработки или общему количеству проходов пучка, то в этом случае имеем в  $\sim 1,6$  раза увеличение эффективности. При оптимизации положения объектов па пучке удастся дополнительно поднять уровень дозы до  $2,3 \text{ Мрад}$  (эквивалентно добавлению одного прохода в цикле), что при од-

[2].

Результаты расчета сравнивались с экспериментом. В наиболее характерных точках блока (в сечениях 0,  $b/2$ ,  $b$ ,  $1,5b$  и  $2b$  на уровнях верхнего и нижнего концов ампул) проводились измерения поглощенной дозы с помощью пленочных дозиметров типа СО ПД(Ф)-5/150 и спектрофотометра СФ-46.

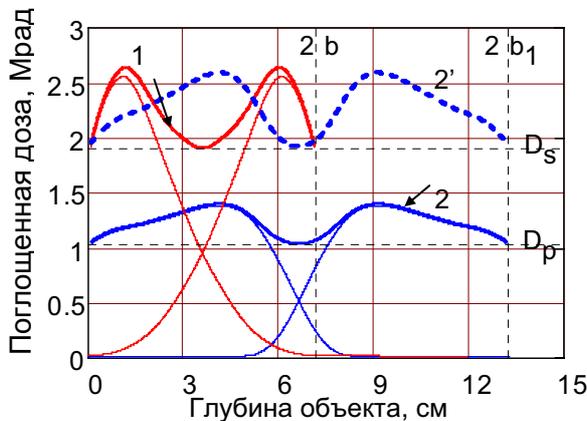


Рис. 4. Сравнение режимов облучения при разных углах падения пучка:

Кривая 1 – под углом  $\alpha = 55^\circ$ ,  $2b = 7,2$  см (~ 8 ампул);  
Кривая 2 – под углом  $\alpha = 0^\circ$ ,  $2b_1 = 13,3$  см (~ 15 ампул).

Относительная погрешность измерений  $\pm 20\%$ . Результаты измерений показаны на рис.3б. Максимальное расхождение расчетных и экспериментальных данных не превышает 30 %. Наилучшим образом результаты измерений согласуются с результатами моделирования.

Для сравнения на рис.4 в режиме работы ускорителя ( $E = 16$  МэВ,  $I = 73$  мкА) при  $N=6$ ,  $\sigma = 6$  см кривыми 1 и 2 представлены два варианта облучения объектов под углами  $\alpha = 55^\circ$  и  $\alpha = 0^\circ$ . Как следует из анализа данных этого рисунка, с переходом на облучение объектов под прямым углом приблизительно в 1,8 раза уменьшается поверхностная доза  $D_s/D_p \approx 1,8$ . По формуле (4) это отношение равно  $1/\cos(\alpha) = 1,74$ , расхождение  $\sim 3\%$ .

Очевидно, для того чтобы уравнивать дозы при одинаковой скорости перемещения объектов необходимо соответственно в  $D_s/D_p$  раз увеличить количество их проходов в зоне пучка, что отражено на кривой 2.

Сравнение эффективности этих вариантов облучения можно провести по соотношению  $2b \cdot D_s / 2b_1 \cdot D_p \approx 0,98$ .

Принимая во внимание, что изменение дозы по глубине практически одинаково и составляет  $\sim 35\%$ , можно считать оба варианта облучения технологически равноценными. Вместе с тем, облучение под углом  $\alpha = 0$  может оказаться все же более предпочтительным при обработке больших коммерческих партий за счет сокращения в  $\sim 1,8$  раза общего количества и времени проведения перезагрузок устройства для перемещения объектов

## ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

Данные расчета поверхностной поглощенной дозы по формуле (4) из работы [1] на 20% по абсолютной величине больше данных моделирования с помощью программы PENSLAB. Различие между относительными изменениями дозы при изменении угла облучения объектов от  $55^\circ$  до  $0^\circ$  составляет  $\sim 3\%$ .

Эффективность двухстороннего способа облучения при условии сохранения уровня поверхностной дозы на всей глубине объекта в любом случае в  $\sim 1,6$  раза больше чем одностороннего облучения.

При двухстороннем облучении гауссовым пучком кетгута в ампулах, объектов с существенным различием плотности по высоте, возможно переоблучение менее плотной части объектов. Однако за счет оптимизации их положения относительно оси пучка удастся уменьшить эти различия по дозе и на  $\sim 20\%$  увеличить эффективность процесса облучения конкретно нижней части с кетгутом.

Варианты облучения на ортогональном пучке и под углом  $55^\circ$  по основному процессу практически равноценны. Однако в первом случае в  $\sim 1,8$  раза сокращается количество и время выполнения вспомогательных операций (перезагрузки), что может иметь значение при больших коммерческих партиях.

Расхождение между расчетными данными и результатами измерений в наиболее характерных точках объекта не превышает 30%. Меньшее расхождение имеет место с данными моделирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.С. Балагура, Л.А. Махненко, П.М.Рябка К вопросу о внедрении радиационных технологий на ЛУЭ-300 // ВАИТ.- Серия: Ядерно-физические исследования (33).-1999.- № 1.- С.52-53.
2. Доклад 35 МКРЕ Радиационная дозиметрия: электронные пучки с энергиями от 1 до 50 МэВ.- Москва: Энергоатомиздат.- 1988.- С. 74-78.
3. F. Salvat, J.M. Fernández-Varea and J. Sempau PENELOPE - A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport.- OECD Nuclear Energy Agency.- Workshop Proceedings Issy - les-Moulineaux.- France 5-7 November.- 2001.