

## РАЗРАБОТКА СТЕНДА ДЛЯ НАРАБОТКИ КОРОТКОЖИВУЩИХ РАДИОИЗОТОПОВ НА ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ ИЯИ РАН

*С.В. Акулиничев, И.А. Васильев, Ю.К. Гаврилов, В.В. Гречко, И.Н. Железов, Ю.Ж. Калинин, В.Л. Матушко, А.Н. Мирзоян, В.А. Моисеев, О.Д. Пронин, П.И. Рейнгардт-Никулин, В.Л. Серов, А.К. Скасырская, В.М. Скоркин, А.В. Фещенко*  
**Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия**  
*E-mail: feschenk@jnr.ru*

Рассматривается возможность наработки короткоживущих радиоизотопов в промежутке между первым и вторым ускоряющими резонаторами начальной части при энергии 20,45 МэВ без вывода пучка. На первом этапе основное внимание сконцентрировано на наработке изотопа фтор-18, используемого для позитронно-эмиссионной томографии. Приводятся результаты расчетов формирования пучка на мишени, термостойкости мишени, активации оборудования, обсуждается конфигурация и конструкция стенда.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время пучок линейного ускорителя ИЯИ РАН используется как для фундаментальных исследований, так и для прикладных целей. Ограничения на использование пучка во многом связаны с невозможностью организации дополнительных участков вывода в существующей структуре ускорителя. Фактически существуют только две возможности вывода: непосредственно выход ускорителя и участок промежуточного вывода пучка, что ограничивает нижнюю границу энергии используемого пучка величиной примерно 90 МэВ.

В то же время существует ряд прикладных задач, где требуется относительно низкая энергия пучка протонов, до 20 МэВ. В принципе, такие энергии получаются на классических циклотронах, однако имеющиеся в России ускорители этого типа не покрывают и малой доли потребностей в пучках таких энергий даже для наработки медицинских радиоизотопов.

На линейном ускорителе ИЯИ РАН имеется возможность создания стенда для наработки короткоживущих радиоизотопов при энергии 20,45 МэВ, установив камеру для облучения в промежутке между первым и вторым ускоряющими резонаторами начальной части с введением облучаемой мишени в пучок в перпендикулярном направлении. Хотя данный стенд может быть использован для наработки широкого спектра изотопов, для начала основные усилия направлены на получение изотопа  $^{18}\text{F}$  с использованием в качестве мишени воды, обогащенной изотопом  $^{18}\text{O}$ . Практически значимая активность, составляющая величину  $\sim 0,5 \dots 2$  Ки, может быть получена при облучении мишени пучком протонов с интенсивностью  $10 \dots 40$  мкА [1-4]. Характерное время облучения составляет один час.

Основной проблемой при облучении водяных мишеней является их перегрев. В нашем случае эта проблема усугубляется тем, что мишень вводится непосредственно в канал ускорителя, где невозможно существенно увеличить размеры пучка. Снижение остроты этой проблемы обеспечивается совместным использованием следующих мер: изменением оптики для увеличения сечения пучка, обеспечени-

ем возвратно-поступательного движения мишени с частотой 1 Гц для увеличения эффективного сечения пучка, а также улучшением охлаждения.

### 2. ФОРМИРОВАНИЕ ПУЧКА

Задачей формирования пучка является получение пучка на мишени большого поперечного сечения. Необходимость обеспечения возвратно-поступательного движения мишени также требует формирования сечения пучка с большим эксцентриситетом.

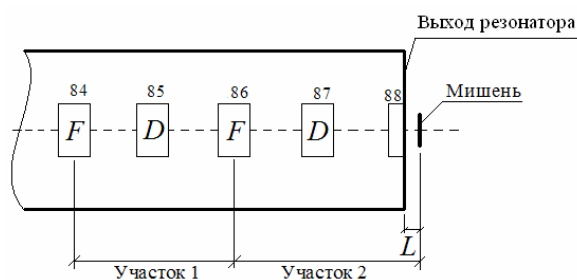


Рис.1. Выходной участок первого резонатора

На Рис.1 схематически показан выходной участок первого резонатора ускорителя. Мишень расположена на расстоянии  $L = 116$  мм от выхода резонатора. Обозначения фокусирующих и дефокусирующих линз относятся к горизонтальной плоскости. Участок 1, включающий квадрупольные линзы трубок дрейфа 84-86 и соответствующие ускоряющие зазоры, используется для нахождения периодического решения поведения огибающих пучка при номинальных градиентах ( $\sim 15,5$  Тл/м). Найденное решение далее используется для моделирования формирования пучка на участке 2, включающем линзы трубок дрейфа 86-87, линзу выходной полутрубки 88, соответствующие ускоряющие зазоры и участок дрейфа до мишени  $L$ . В качестве значений полных нормализованных эмиттансов использовались экспериментальные значения  $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 8\pi$  мм·мрад. При моделировании размеры огибающих ограничивались величиной 12 мм, что при радиусе апертуры 15 мм дает запас 3 мм на смещение центра тяжести.

На Рис.2 показаны линии полного размера пучка по горизонтали и вертикали в зависимости от градиентов  $G_1$  и  $G_2$  линз 87 и 88. Отрицательные значения

$G_2$  обеспечиваются изменением полярности питания.

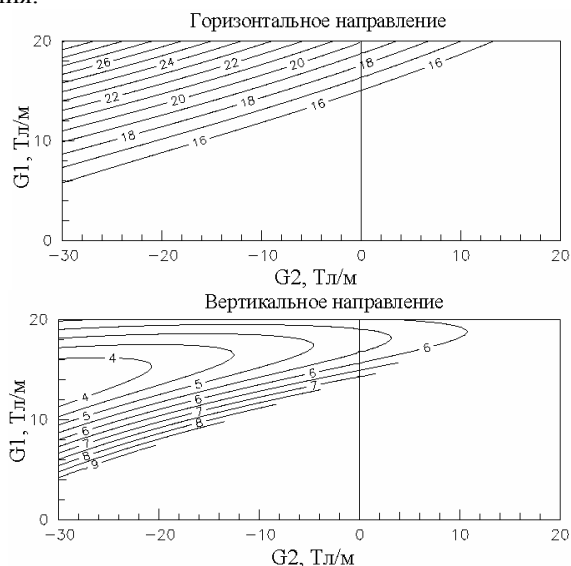


Рис.2. Уровни полного размера пучка (мм) по горизонтальному и вертикальному направлениям

На Рис.3 приведен пример поведения огибающих пучка при  $G_1=16$  Тл/м и  $G_2=-26$  Тл/м, когда форма сечения на мишени имеет большой эксцентриситет ( $24,1 \times 3,5$  мм).

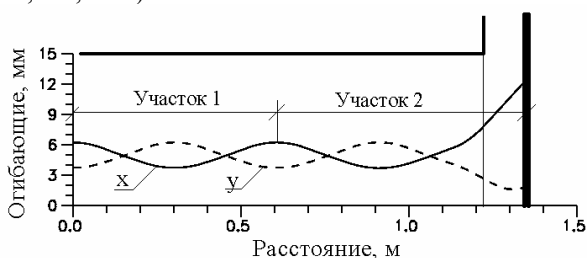


Рис.3. Пример поведения огибающих пучка

### 3. КОНФИГУРАЦИЯ МИШЕННОГО УСТРОЙСТВА. НАГРЕВ МИШЕНИ

Конфигурация мишенного устройства приведена на Рис.4.

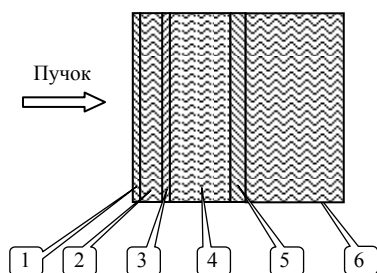


Рис.4. Конфигурация мишенного устройства

Параметры указанных на рисунке элементов, а также энергии протонов приведены в таблице. Облучаемым веществом-мишенью в указанной конфигурации является вода 4 (см. Рис.4), обогащенная изотопом кислорода  $^{18}\text{O}$ .

Материалы элементов мишенного устройства выбраны из соображений механической прочности и уменьшения активации, а также с учетом имеющегося опыта [1-4], а их толщины – для обеспечения оптимального выхода изотопа  $^{18}\text{F}$ . Облучаемая мишень представляет прямоугольник с продольным

размером 2,2 мм и поперечными размерами 30 мм по горизонтали и 24 мм по вертикали.

#### Параметры элементов мишени

№ элемента	Материал	Толщина, мм	Входная энергия, МэВ
1	Титан	0,125	20,45
2	Охлаждающая вода	0,8	19,44
3	Ниобий	0,15	17,15
4	Облучаемая вода	2,2	14,84
5	Ниобий	0,2	3,89
6	Охлаждающая вода		

Основной особенностью приведенной конфигурации является использование водяного охлаждения входного окна 3 облучаемой мишени 4 в отличие от обычно используемого охлаждения потоком гелия, что позволило заметно улучшить теплосъем.

Расчет нагрева мишени проводился для пучка с эллиптическим поперечным сечением и равномерным распределением плотности по сечению. Расчет показал, что при указанных выше токах и размерах пучка температура мишени оказывается неприемлемой. Для уменьшения температуры мишени необходимо уменьшить эффективную плотность пучка, что может быть реализовано путем обеспечения возвратно-поступательного движения мишени. В качестве направления движения выбрано вертикальное направление, исходя из возможностей формирования пучка на мишени. При расчетах нагрева плотность потока протонов полагалась равномерной по эффективному сечению.

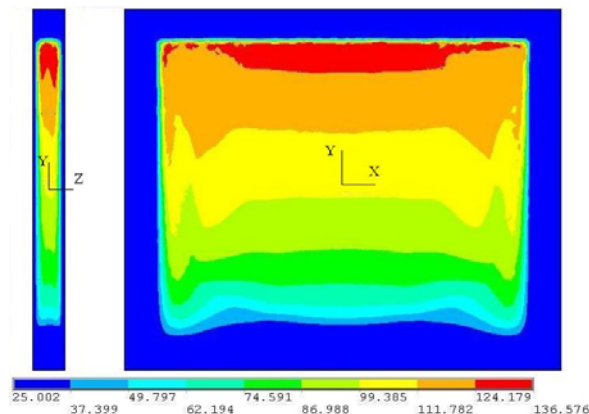


Рис.5. Распределение температуры в мишени

На Рис.5 показано распределение температуры в мишени в плоскости (y,z) при  $x=0$  и плоскости (x,y) при  $z=0$ . Расчет проведен для тока пучка 20 мкА, размерах полуосей эллиптического сечения пучка по горизонтали 12 мм и по вертикали 5 мм и перемещении мишени  $\pm 6$  мм. Видно, что температура воды максимальна в верхней области мишени.

На Рис.6 показана зависимость максимальной температуры в мишени от тока пучка. Следует отметить, что при изменении тока пучка характер распределения температуры качественно не изменяется.

Из приведенных результатов видно, что уже при токе 13 мкА температура достигает 100°C. Работа с более высокими интенсивностями потребует повышения давления в мишени до нескольких атмосфер. Заметим, что механические усилия на фольги 3 и 5 (см. Рис.4) можно уравновесить давлением охлаждающей воды 2 и 6.

Следует отметить, что возвратно-поступательное движение мишенного устройства способствует более интенсивному перемешиванию облучаемой воды, что может улучшить теплосъем с мишени.

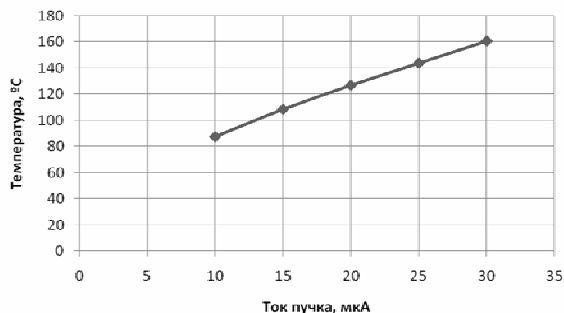


Рис. 6. Зависимость максимальной температуры от тока пучка

#### 4. АКТИВАЦИЯ МИШЕННОГО УСТРОЙСТВА

Проведенный анализ показал, что основную опасность с точки зрения наведенной активности в мишенном устройстве представляет титановая фольга 1 (см. Рис.4). Был выполнен расчет поведения активности образуемых изотопов в процессе облучения и после его окончания с учетом изотопного состава титана. Результаты расчетов для интенсивности пучка протонов 30 мкА и длительности облучения 1 ч представлены на Рис.7.

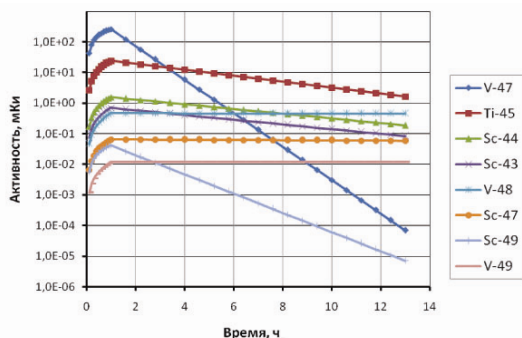


Рис. 7. Поведение активности изотопов

Используя значения гамма-постоянных для образующихся изотопов, можно определить поведение мощности дозы гамма-излучения. Результаты расчета в предположении точечного источника и отсутствия ослабления в конструкционных материалах для отдельных изотопов, а также суммарная мощность дозы приведены на Рис.8. Влияние изотопов  $^{47}\text{Sc}$ ,  $^{49}\text{Sc}$  и  $^{49}\text{V}$  на графике не представлено ввиду его малости.

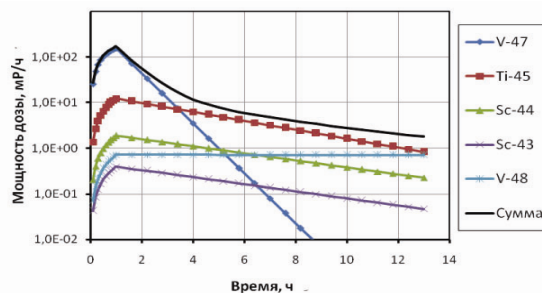


Рис. 8. Мощность дозы на расстоянии 1 м

#### 5. СОСТАВ И КОНФИГУРАЦИЯ ОБЛУЧАТЕЛЬНОЙ КАМЕРЫ

Камера для облучения будет установлена на линейном ускорителе ИЯИ РАН в промежутке между первым и вторым ускоряющими резонаторами с трубками дрейфа (Рис.9).

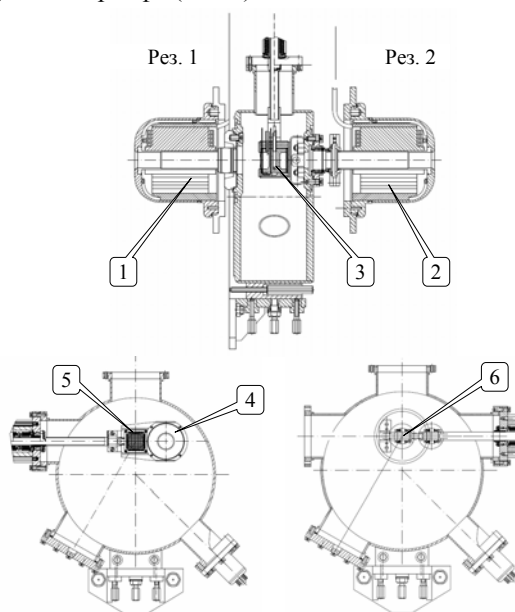


Рис. 9. Камера для облучения. 1 – выходная полтрубка дрейфа резонатора №1; 2 – входная полтрубка дрейфа резонатора №2; 3 – мишенное устройство; 4 – индукционный датчик тока; 5 – многопроволочный датчик профиля; 6 – вакуумный затвор

В камере находится мишенное устройство, вводимое в пучок и перемещаемое во время облучения с помощью привода, индукционный датчик для контроля интенсивности пучка, многопроволочный датчик профиля, необходимый для настройки и формирования пучка и вакуумный затвор, разделяющий по вакууму первый и второй резонаторы. Ввиду ограниченности пространства (продольный размер вакуумной камеры составляет 145 мм) индукционный датчик и датчик профиля устанавливаются на одном общем приводе. В вакуумной камере предусмотрен вакуумный датчик, задействованный в системе блокировок. Также предусмотрен дополнительный порт, который в перспективе планируется использовать для внесения мишенных узлов для наработки других изотопов помимо  $^{18}\text{F}$ .

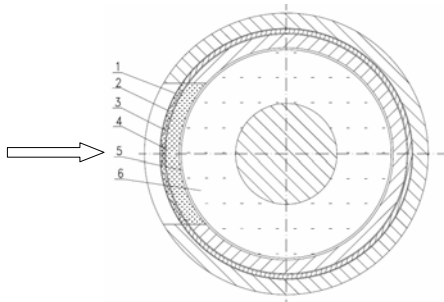


Рис.10. Мишенное устройство  
(обозначения согласно Рис.4)

Для повышения механической прочности фольги 1, 3 и 5 мишенного устройства (Рис.10) выполнены в виде цилиндрических оболочек. Заполнение пространства между фольгами 3 и 5 облучаемой водой осуществляется по капилляру с внутренним диаметром 0,5 мм. Удаляется облученная вода пневматически.

В заключение авторы выражают благодарность сотрудникам НИИЯФ СПбГТУ В.Н. Ломасову и А.В. Моторному, а также сотруднице ЦНИРРИ М.И. Мостовой за полезные консультации.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту РФФИ 08-02-01226.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В.Н. Hong, et al. Double-grid [ $^{18}\text{O}$ ] water target for high yield of [ $^{18}\text{F}$ ] fluoride production on KAMAS-13 // *NIM*. 2005, В 241, p.732-734.
2. A.D. Roberts, L.C. Daniel, R.J. Nickles. A high power target for the production of [ $^{18}\text{F}$ ] fluoride // *NIM*. 1995, В 99, p.797-799.
3. R.W. Hamm, G.D. Robinson. Production Test Results from Pulsar Linac Targets // *Proc. of the Ninth Int. Workshop on Targetry and Target Chemistry*. Turku, Finland, May 23-25, 2002, p.3-7.
4. <http://trshare.triumf.ca/~buckley/wttc/index.html>
5. Н.Г. Гусев, П.П. Дмитриев. *Квантовое излучение радиоактивных нуклидов*. Справочник. М.: «Энергоатомиздат», 1982.

Статья поступила в редакцию 07.09.2009 г.

#### DEVELOPMENT OF AN EXPERIMENTAL INSTALLATION FOR SHORT-LIVED ISOTOPES PRODUCTION IN INR LINAC

*S. Akulinichev, I. Vasiliev, Yu. Gavrilov, V. Grechko, I. Zhelezov, Yu. Kalinin, V. Matushko, A. Mirzozjan, V. Moiseev, O. Pronin, P. Reinhardt-Nikoulin, V. Serov, A. Skasyrskaya, V. Skorkin, A. Feshchenko*

A possibility of short-lived isotopes production in inter-tank section between the first and the second drift tube tanks (20.45 MeV) in INR linac is considered. At the initial stage the main efforts are concentrated on production of fluorine-18 used for positron emission tomography. The results of beam forming calculations, target heating calculations, equipment activation calculations as well as installation configuration and design are presented.

#### РОЗРОБКА СТЕНДА ДЛЯ НАРОБІТКУ КОРОТКОЖИВУЧИХ РАДІОІЗОТОПІВ НА ЛІНІЙНОМУ ПРИСКОРЮВАЧІ ІЯД РАН

*С.В. Акуліничев, І.А. Васильєв, Ю.К. Гаврилов, В.В. Гречко, І.Н. Желєзов, Ю.Ж. Калінін, В.Л. Матушко, А.Н. Мірзоян, В.А. Моїсєєв, О.Д. Пронін, П.І. Рейнгардт-Нікулін, В.Л. Серов, А.К. Скасирська, В.М. Скоркін, А.В. Фещенко*

Розглядається можливість наробітку короткоживучих радіоізоотопів у проміжку між першим і другим прискорювальними резонаторами початкової частини при енергії 20,45 MeV без виведення пучка. На першому етапі основна увага сконцентрована на наробітку ізотопу фтор-18, що використовується для позитронно-емісійної томографії. Приводяться результати розрахунків формування пучка на мішені, термостійкості мішені, активації устаткування, обговорюється конфігурація і конструкція стенда.