

## КОНТРОЛЬ И ФОРМИРОВАНИЕ ПУЧКА ПРОТОНОВ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИЯИ РАН НА МИШЕНИ ИЗОТОПНОГО КОМПЛЕКСА

*С.Е. Брагин, И.А. Васильев, О.М. Володкевич, О.В. Грехов, Ю.В. Киселев, А.Н. Мирзоян,  
В.А. Моисеев, А.В. Фещенко*

*Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия*

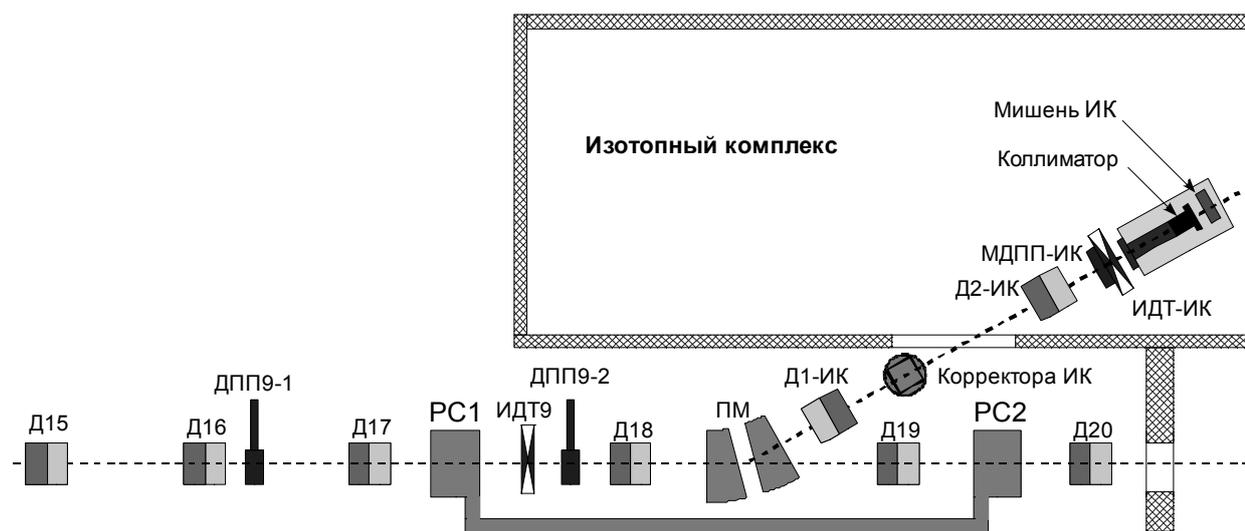
*E-mail: bragin@inr.ru*

В настоящее время на линейном ускорителе ИЯИ РАН используется отвод пучка протонов на измерительно-согласующем участке ЛУ с энергией 160 МэВ для производства различных изотопов в широком диапазоне энергий и параметров пучка на мишени. Приводятся результаты измерений характеристик протонного пучка и его формирования в канале транспортировки изотопного комплекса для получения требуемых параметров пучка на изотопной мишени.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В Институте ядерных исследований РАН создана и успешно эксплуатируется установка по облучению радиоизотопных мишеней протонным пучком линейного ускорителя [1]. Установка, именуемая изотопным комплексом (ИК), используется для получения различных изотопов медицинского и технического назначения: Sr-82, применяемого при позитронно-эмиссионной томографии в кардиологии и диагностике кровеносной системы; Sn-117m для диагностики и терапии костных онкологических заболеваний; Cd-109 для рентгенофлуоресцентного анализа материалов и образцов. Возможно также получение Pd-103, Cu-67, Na-22, Se-72, As-225 и других радиоизотопов. Для производства широкого спектра радиоизотопов необходимо изменять энергию пучка от 100 до 160 МэВ и его интенсивность в

диапазоне от 1 до 120 мкА среднего тока. При этом средняя мощность пучка достигает ~19 кВт. От размеров пучка и его сходимости зависят как эффективность наработки изотопов, так и предотвращение возможности повреждения и разрушения мишени в процессе ее облучения высокоинтенсивным пучком. Поэтому формирование заданных параметров пучка на мишени и их контроль являются крайне важными задачами. На Рис.1 показан участок вывода пучка на мишень изотопного комплекса. Поперечное формирование пучка на мишени осуществляется с помощью квадрупольных дублетов на прямом участке ускорителя и двух квадрупольных дублетов Д1-ИК и Д2-ИК в канале транспортировки пучка на мишень. Два поперечных корректора ИК используются для регулирования положения центра тяжести на



**Линейный ускоритель (согласующий участок 160 МэВ)**

*Рис.1. Схема участка вывода пучка на мишень изотопного комплекса:  
Д15, ..., Д20, Д1-ИК, Д2-ИК - квадрупольные дублеты; ПМ – поворотные магниты; ИДТ9,  
ИДТ-ИК – индукционные датчики; МДПП-ИК - многопроволочный профилометр; ДПП9-1,  
ДПП9-2 – проволочные сканеры; РС1, РС2 – секции согласующего резонатора*

мишени, а в случае необходимости и для организации вращения пучка в поперечной плоскости с целью уменьшения тепловой нагрузки на выходное вакуумное окно канала транспортировки и на облучаемую мишень. Контроль поперечных характеристик пучка на прямом участке ускорителя перед поворотным магнитом осуществляется двумя двухкоординатными проволочными сканерами (ДПП9-1 и ДПП9-2), а перед мишенью – двухкоординатным многопроволочным профилометром МДПП-ИК.

## 2. ИЗМЕРЕНИЯ НА УЧАСТКЕ ЛУ

Каждый из датчиков профиля пучка ДПП9-1 и ДПП9-2 представляет собой систему из двух взаимно перпендикулярных проволочек. Датчики функционируют одновременно для двухкоординатного поперечного сканирования пучка. Время сканирования составляет ~ 3 мин. На каждом пространственном шаге сканирования производится многократное измерение сигналов с проволочек вдоль импульса тока пучка, т.е. результатом являются двумерные распределения интенсивности пучка по соответствующей координате (X или Y) и времени (Рис.2).

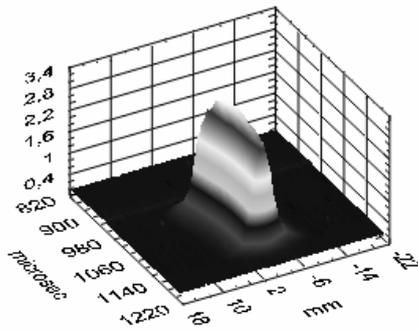


Рис.2. Распределение интенсивности пучка

Пространственный шаг сканирования производится на частоте повторения импульсов тока пучка 1 Гц. Временной шаг измерения задается частотой считывания сигналов с проволочек (1 МГц) внутри каждого импульса тока пучка. Из измеренных распределений интенсивности пучка для обработки может быть выделена произвольная временная область, получены соответствующие интегральные поперечные профили и рассчитаны их характеристики.

Алгоритм восстановления параметров поперечного эмиттанта пучка и его центра тяжести на измерительном участке по поперечным профилям пучка был реализован ранее [2]. Особенностью процедуры

измерения и восстановления параметров пучка при использовании малого числа профилометров является то, что в этом случае для адекватного представления параметров пучка необходимо сделать несколько измерений при варьировании полей в элементах фокусирующей системы, расположенных перед используемыми профилометрами. В нашем случае, при измерении на прямом участке ускорителя профилометрами ДПП9-1 и ДПП9-2 перед поворотом на изотопный комплекс, изменялись градиенты магнитного поля в дублетах Д15, Д16 и Д17 (Рис.3,а). При этом семейство линий среднеквадратического размера пучка, трансформированных в произвольную точку ускорителя, расположенную перед дублетом Д15, дает вполне определенную конфигурацию поперечного эмиттанта пучка (Рис.4).

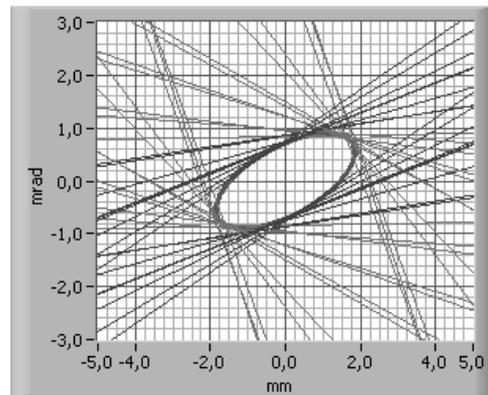


Рис.4. Восстановление эмиттанта в плоскости  $XX'$

Далее определяются параметры поперечного эмиттанта пучка перед входом в поворотный магнит ПМ (см. Рис.1). Эти данные используются для расчета динамики пучка до мишени ИК с целью обеспечения требуемого размера и угловой расходимости. Так, для рубидиевых мишеней при производстве Sr-82, которые являются основными облучаемыми мишенями, нужно получить в плоскости мишени пучок со среднеквадратичными размерами  $x_{rms} \approx y_{rms} \approx 3$  мм и поперечными эмиттантами вблизи кроссоверов. По результатам измерений проводится также коррекция центра тяжести пучка на рассматриваемом участке [2]. На Рис.3,б и 3,в приведены трассировки  $\beta$ -функций и центра тяжести на измерительном участке при введенной коррекции.

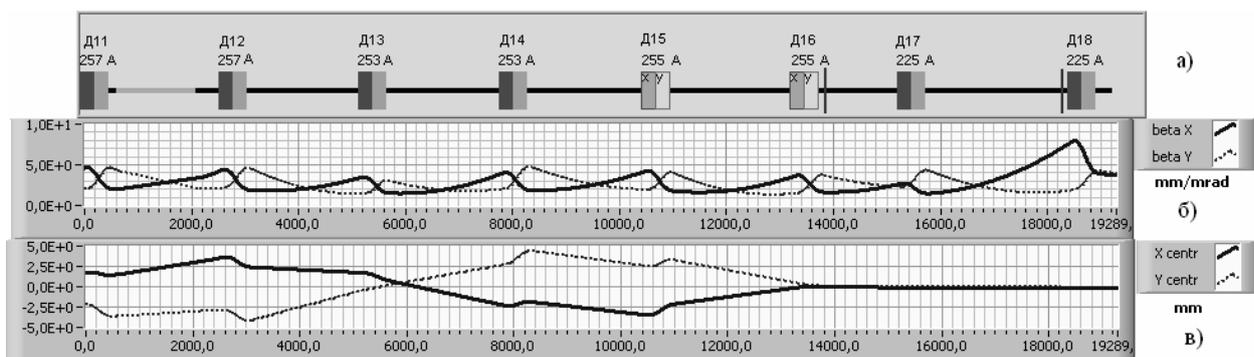


Рис.3. Схема участка измерения перед ПМ (а), трассировка  $\beta$ -функций (б) и центров тяжести пучка (в)

### 3. ИЗМЕРЕНИЯ НА КАНАЛЕ ИК

На канале транспортировки изотопного комплекса в настоящее время задействован только один двухкоординатный многопроволочный профилометр МДПП-ИК, который используется в режиме постоянного контроля поперечного размера и центра тяжести пучка (Рис.5).

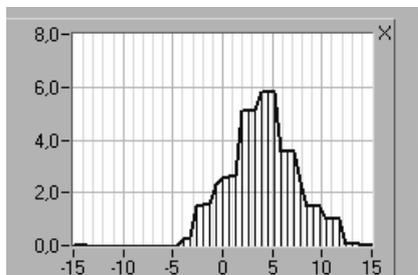


Рис.5. X-профиль на МДПП-ИК

Профилометр расположен на расстоянии 1.85 м после дублета Д2-ИК и 1.8 м до мишени. Серия измерений профилей пучка в канале транспортировки изотопного комплекса проводилась при варьировании тока в линзах дублета Д2-ИК. В настоящее время линзы в дублетах Д1-ИК и Д2-ИК соединены параллельно.

С целью определения поведения структурных  $\beta$ -функций в канале ИК использовались параметры пучка по результатам измерения на прямом участке ЛУ. На Рис.6 приведены зависимости  $\beta_x$  и  $\beta_y$  на МДПП-ИК в зависимости от тока в линзах дублета Д2-ИК.

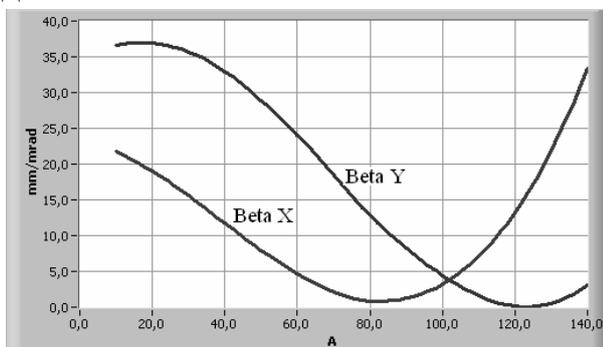


Рис.6.  $\beta$ -функции в плоскости МДПП-ИК

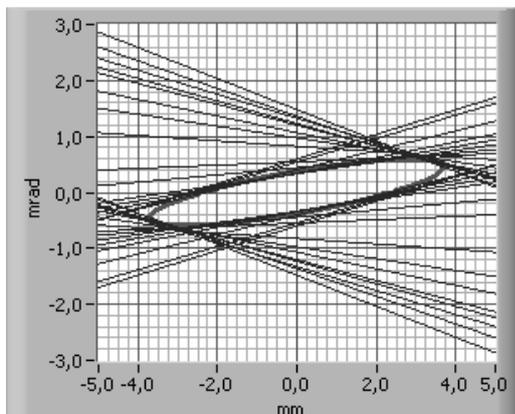


Рис.7. Восстановление эмиттанса в плоскости  $XX'$

Для получения параметров пучка в поперечном фазовом пространстве необходимо серию измерений проводить в окрестности минимумов  $\beta$ -функций. На

Рис.7 приведено восстановление фазового эллипса на расстоянии 6 м перед дублетом Д2-ИК по результатам серии измерений.

Использование разных токов в линзах дублета Д2-ИК, что предполагается реализовать в перспективе, позволит проводить измерения параметров фазового эллипса в вертикальной плоскости при меньших значениях токов (Рис.8).

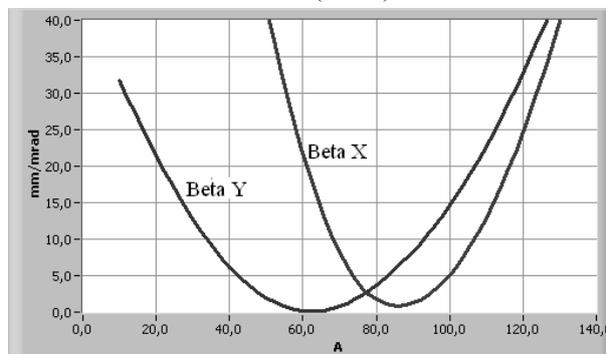


Рис.8.  $\beta$ -функции в плоскости МДПП-ИК в зависимости от тока в первой линзе дублета Д2-ИК. Ток во второй линзе дублета 90 А

### 4. УЧЕТ ДИСПЕРСИИ В КАНАЛЕ ИК

Измерительный участок изотопного комплекса в горизонтальной плоскости имеет дисперсию. На Рис.9 приведен вид дисперсионной функции для базового режима: ток в линзах дублета Д1-ИК 42 А, ток в линзах дублета Д2-ИК 59 А.

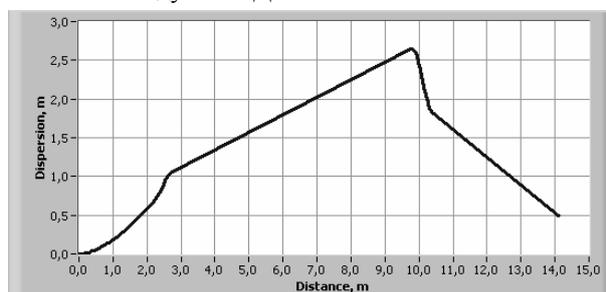


Рис.9. Дисперсионная функция канала ИК

При оптимизации режима проводки пучка на мишень с целью получения необходимых параметров используются расчетные структурные  $\beta$ -функции канала транспортировки ИК, не учитывающие импульсный разброс пучка. В горизонтальной плоскости для корректного сравнения результатов измерений и расчетов необходимо ввести поправки, учитывающие дисперсию. Для коррекции результатов измерений при наличии дисперсии в точке измерителя МДПП-ИК использовались соотношения:

$$\overline{x^2} = \overline{\xi^2} + \Psi^2 \overline{\delta^2}, \quad \overline{x} = \overline{\xi}, \quad (1)$$

где  $\delta = \Delta p / p$  – относительное импульсное отклонение;  $\sqrt{\overline{x^2}}$  – измеренный среднеквадратический размер пучка;  $\sqrt{\overline{\xi^2}}$  – среднеквадратический размер пучка с  $\delta \cong 0$ ;  $\Psi$  – дисперсионная функция в точке измерения, в нашем случае, зависит от тока в дублете Д2-ИК и определяется расчетным путем;

$\bar{x}$  – измеренный центр тяжести пучка;  $\bar{\xi}$  – центр тяжести пучка с  $\delta \cong 0$ .

Соотношения (1) получены в предположениях:

- группы частиц с различными импульсами имеют одинаковые функции распределения по поперечной координате на бездисперсионном участке;
- функция распределения частиц пучка по относительному импульсному отклонению  $\delta$  симметрична.

В случае параболической функции распределения частиц по  $\delta$ :

$$\overline{\delta^2} = \delta_m^2 / 5, \quad (2)$$

где  $\delta_m$  – максимальное значение относительного отклонения частиц по импульсу в пучке.

В качестве сравнительных данных используются: результаты расчетов  $\beta$ -функций и размеров пучка на канале ИК с начальными параметрами фазовых эллипсов перед поворотным магнитом по измерениям на прямом участке ЛУ и измерениям на МДПП-ИК. При этом  $\delta_m$  подбирается таким образом, чтобы величины эмиттансов пучка на участке перед дублетом Д2-ИК и перед поворотным магнитом ПМ были равны. В проведенной серии измерений при предложенной схеме обработки экспериментальных данных было получено  $\delta_m = 0.192\%$ , что хорошо согласуется с более ранними данными продольных фазовых измерений:  $\delta_m = 0.23\%$ .

На Рис.10 представлены зависимости дисперсии в точках измерителя МДПП-ИК и мишени в зависимости от тока в линзах дублета Д2-ИК.

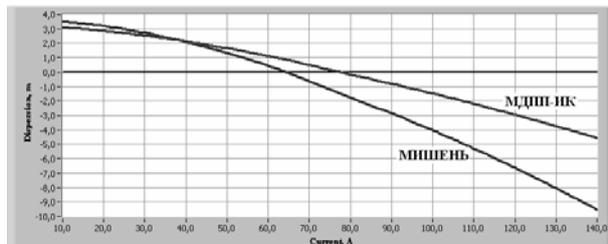


Рис.10. Дисперсии на МДПП-ИК и на мишени

Была выполнена процедура восстановления фазового эллипса (см. Рис.7) для скорректированных данных измерений на МДПП-ИК. Сравнение параметров фазового эллипса для горизонтальной плоскости, полученных с использованием коррекции (1) и без нее в точке, расположенной на расстоянии 6 м до дублета Д2-ИК, приведено в Таблице.

Таблица

| Коррекция                 | $\alpha_x$ | $\beta_x$ | $\epsilon_{n, \text{гориз.}}$<br>мм·мрад |
|---------------------------|------------|-----------|--|
| Без коррекции (для $x$ )  | -0,06      | 3,65      | 0,87                                     |
| С коррекцией (для $\xi$ ) | 0,08       | 3,40      | 0,74                                     |

Расчетные значения среднеквадратического размера пучка  $x_{rms}$  в точке МДПП-ИК при изменении тока в линзах дублета Д2-ИК, полученные в результате

трассировки экспериментально определенных в точке перед ПМ параметров фазового эллипса с последующим использованием коррекции (1), показаны на Рис.11 сплошной линией. Экспериментальные данные отмечены маркерами.

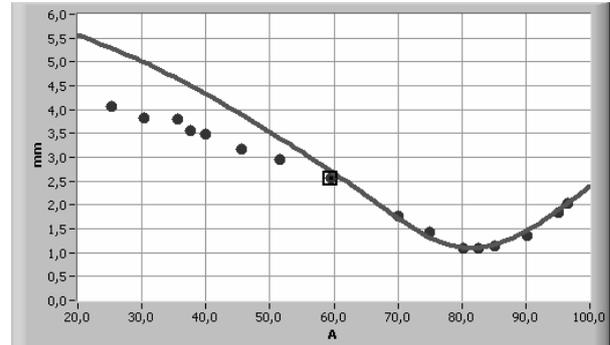


Рис.11.  $x_{rms}$  пучка в точке МДПП-ИК

Квадратом отмечен базовый режим работы на изотопную мишень ИК. Для области рабочих значений токов дублета Д2-ИК наблюдается хорошее совпадение экспериментальных данных с расчетами, выполненными по экспериментальным данным на прямом участке ЛУ. При больших отклонениях от рабочих значений токов дублета Д2-ИК наблюдается значительное (~20%) расхождение результатов, по-видимому, из-за больших значений дисперсии (см. Рис.10) в точке измерений и точности предложенной модели распределения частиц по импульсам в пучке.

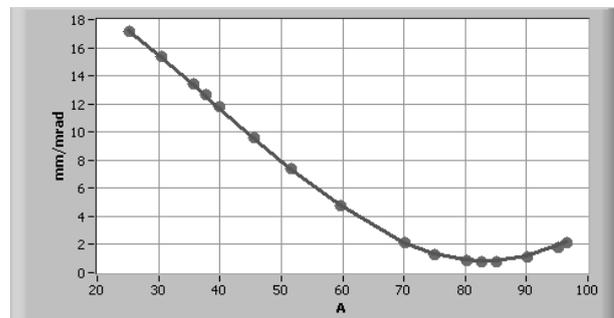


Рис.12. Функция  $\beta_x$  в плоскости МДПП-ИК

На Рис.12 приведены расчеты по трассировке параметров фазового эллипса с коррекцией (см. Таблицу) из точки перед дублетом Д2-ИК в точку измерений МДПП-ИК (маркеры) и параметров фазового эллипса перед ПМ (сплошная линия) в ту же точку в зависимости от тока в дублете Д2-ИК. Совпадение значений  $\beta_x$ , полученных двумя вышеупомянутыми способами, означает, что при оптимизации проводки пучка на мишень могут быть использованы результаты измерений на прямом участке ЛУ с предложенной коррекцией (1) и (2).

На Рис.13 приведен расчетный горизонтальный размер пучка на изотопной мишени по экспериментальным данным перед ПМ с учетом коррекции (1) в зависимости от тока в линзах дублета Д2-ИК.

Квадратом отмечен базовый режим работы на изотопную мишень, вычисленный по параметрам Таблицы с коррекцией (1).

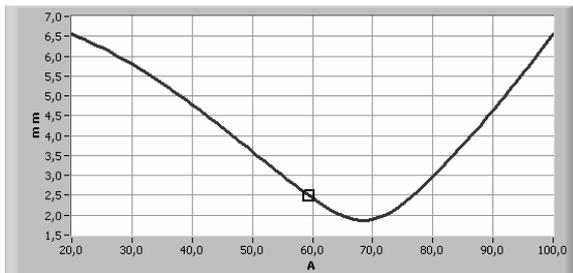


Рис.13. Расчетные значения  $X_{rms}$  пучка на мишени

По результатам проведенных измерений и расчетов параметров пучка можно сделать следующие выводы:

- расчеты, выполненные по измерениям на прямом участке ЛУ до поворотного магнита, удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными на участке ИК и расчетами по ним;
- большее совпадение результатов происходит при меньших значениях дисперсии в исследуемой точке на участке ИК;
- существующий в настоящее время режим питания линз дублета Д2-ИК позволяет уменьшить на ~25% горизонтальный среднеквадратичный размер пучка на изотопной мишени (см. Рис.13).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан пакет программ, позволяющий по результатам обработки экспериментальных данных проводить оценку характерных параметров пучка на мишени изотопного комплекса ИЯИ РАН. Полученные результаты позволяют формировать пучок на радиоизотопных мишенях в широком диапазоне энергий и начальных параметров пучка, а также достаточно оперативно оценивать размеры пучка на мишени и проводить при необходимости их коррекцию. Показано, что раздельное питание линз дублета Д2-ИК расширяет возможности формирования пучка на мишени.

## ЛИТЕРАТУРА

1. B.L. Zhuikov, V.M. Kokhanyuk, N.A. Konyakhin,
2. J. Vincent. Target Irradiation Facility and Targetry Development at 160 MeV Proton Beam of Moscow Linac // *Nucl. Instr. Meth.* 1999, v.A438, p.173.
3. S.E. Bragin, A.V. Feschenko, O.V. Grekhov, et al. An Interactive Procedure of the Transverse Beam Matching and Correction in INR Linac // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"*. 2005, №3(47), p.116-118.

Статья поступила в редакцию 07.09.2009 г.

## PROTON BEAM MONITORING AND FORMING ON THE TARGET OF ISOTOPE COMPLEX AT INR LINAC

*S.E. Bragin, I.A. Vasilyev, O.M. Volodkevich, O.V. Grekhov, Yu.V. Kiselev, A.N. Mirzozjan, V.A. Moiseev, A.V. Feschenko*

Special beam extraction channel is used at INR linac for isotope production. It starts from 160 MeV measuring and matching area of accelerator. This choice of beam extraction enables to direct to the target of isotope complex a proton beam of wide energy range up to 160 MeV. It is important for production of different types of nuclides. The measuring results of proton beam behavior in this region are presented. Required beam forming in 160 MeV measuring and matching area of accelerator and in beam extraction channel is discussed.

## КОНТРОЛЬ І ФОРМУВАННЯ ПУЧКА ПРОТОНІВ ЛІНІЙНОГО ПРИСКОРЮВАЧА ІЯД РАН НА МІШЕНІ ІЗОТОПНОГО КОМПЛЕКСУ

*С.Є. Брагін, І.А. Васильєв, О.М. Володкевич, О.В. Грехов, Ю.В. Кисельов, А.Н. Мірзоян, В.А. Моїсєєв, А.В. Фещенко*

У цей час на лінійному прискорювачі ІЯД РАН використовується відвід пучка протонів на вимірювально-погоджувальній ділянці ЛП з енергією 160 MeV для виробництва різних ізотів у широкому діапазоні енергій і параметрів пучка на мішені. Приводяться результати вимірів характеристик протонного пучка і його формування в каналі транспортування ізотного комплексу для одержання необхідних параметрів пучка на ізоотпній мішені.