

## СТАНЦИЯ ВИБРИРУЮЩИХ СТРУН ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО И ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОФИЛЕЙ ПРОТОННОГО ПУЧКА ЦИКЛОТРОНА С18 В ВОЗДУХЕ

М.А. АГИНЯН<sup>1</sup>, А.П. АПРААМЯН<sup>1</sup>, С.Г. АРУТЮНЯН<sup>1</sup>, Г.С. АРУТЮНЯН<sup>1</sup>,  
Э.Г. ЛАЗАРЕВА<sup>1\*</sup>, Л.М. ЛАЗАРЕВ<sup>1</sup>, А.В. МАРГАРЯН<sup>1</sup>, Л.А. ШАГИНЯН<sup>1</sup>,  
Р.К. ДАЛЛАКЯН<sup>1</sup>, А.А. МАНУКЯН<sup>1</sup>, В.Х. ЭЛБАКЯН<sup>1</sup>, Г.А. ОГАНЕСЯН<sup>1</sup>,  
Г.Е. ЭЛБАКЯН<sup>1</sup>, М. CHUNG<sup>2</sup>, D. KWAK<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальная научная лаборатория им. А.И. Алиханяна, Ереван, Армения

<sup>2</sup>Ulsan National Institute of Science and Technology, Ulsan, South Korea

\*e-mail: ella.lazareva@yepphi.am

(Поступила в редакцию 1 сентября 2021 г.)

В работе приведены результаты первых экспериментов по измерению горизонтального и вертикального профилей протонного пучка циклотрона С18 с помощью станции профилирования на базе мониторов вибрирующей струны. Измерения проводились на выходе протонного пучка в воздух из специального вакуумного окна установленного на конце пучкопровода циклотрона. Были произведены измерения профилей для различных значениях тока протонного пучка. Станция показала свою работоспособность в условиях сильных помех, обусловленных экспонированием защитных свинцовых пластин протонным пучком.

### 1. Введение

Циклотрон С18 [1] штатно предназначен для изготовления медицинских изотопов, таких как  $^{18}\text{F}$ ,  $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$  и др. [2]. Циклотрон установлен в ЗАО «Центр по Производству Изотопов» [3]. Для нужд экспериментаторов Ереванского физического института организован вывод пучка в экспериментальный зал. С этой целью оборудован пучкопровод, оканчивающийся вакуумным окном, посредством которого протонный пучок выводится в воздух. Для пользователей выведенного протонного пучка существенна информация о его точном местоположении и распределении частиц пучка в его поперечном сечении. Для измерения горизонтального и вертикального профилей пучка нами была изготовлена станция профилирования пучка, состоящая из двух мониторов вибрирующей струны (МВС), оснащенных линейными приводами на базе шаговых двигателей. Тестовые испытания станции были проведены на лазерных пучках.

Станция была установлена непосредственно за вакуумным окном циклотрона. Произведены сканирования пучка в горизонтальном и вертикальном

направлениях. Обнаружилось существенное воздействие пучка на несущие части мониторов, в частности на свинцовый экран, установленный на фронтальной части монитора для его защиты от радиации при сканировании. Данное воздействие привело к нагреву свинцовой пластины и других деталей мониторов с большой временной задержкой из-за тепловой инерции массивных деталей датчика. Обработкой полученных данных восстановлены горизонтальные и вертикальные профили пучка для различных токов циклотрона.

## 2. Циклотрон С18

Циклотрон С18 Бельгийской фирмы ИВА был установлен в Центре по производству радиоизотопов в 2014 году и запущен в 2019 году. Циклотрон С18 – это протонный ускоритель ( $H^+$ ) с фиксированной энергией пучка 18 МэВ. Максимальная интенсивность пучка 150 мкА. На циклотроне установлены 8 независимых выходов, к которым можно подсоединить 8 различных мишенных модулей или другого оборудования, протонный пучок можно раздвоить (с той же энергией) и выводить параллельно из двух выходов. Отрицательные ионы производятся в центре устройства двумя внутренними источниками. Ионы движутся в магнитном поле и ускоряются в переменном поле высокой частоты на паре дуантов (см. например, работу [4]). На радиусе извлечения ионы, проходя через тонкую углеродную фольгу, лишаются своих электронов [5]. Получающиеся положительные ионы (протоны) изгибаются наружу магнитным полем к выходам. В ИВА был разработан инновационный метод экстракции, который позволяет получать одинаковые размеры и свойства экстрагированного пучка на окне мишени независимо от номера мишени. Это достигается за счет правильной конструкции и формы полюсов магнита [6]. Такая процедура позволяет вывести более 99.9% ускоренного пучка [5].

### 2.1. Вакуумное окно для циклотрона С18

Ядерная физика – одно из перспективных экспериментальных направлений Ереванского физического института [7,8]. Задачи низкоэнергетической ядерной физики на ускорителе ЛУЭ-75 обсуждены, например, в работах [9,10].

Циклотрон С18 также запланирован для использования в экспериментах в области ядерной физики сотрудниками Ереванского физического института (см., например, работы [11–14]), где отмечена возможность производства технеция  $^{99m}Tc$  на протонном пучке циклотрона. С этой целью при проектировании здания циклотрона был предусмотрен экспериментальный зал с пучкопроводом для вывода пучка. В заводской комплектации на конце пучкопровода крепился мишенный модуль для твердых мишеней Nirta Solid Target Module [15,16]. В июне 2020 года в отделе Производства и исследований изотопов Ереванского физического института было разработано и создано вакуумное окно (ВО), которое позволяет выводить протонный пучок в атмосферу. Конструкция ВО создавалась с учетом требований ученых разных отделов института.

Во оснащено входным коллиматором, который также является крепежным элементом к выходному фланцу пучкопровода. Коллиматор с отверстием в 12 мм, охлаждается с помощью воды. Поскольку в системе вакуум  $\sim 10^{-6}$ – $10^{-7}$  мбар, то систему надо отсечь от атмосферного давления. Для этого после коллиматора стоит специальная камера, также со сквозным отверстием в 12 мм, и закрытая с обеих сторон фольгами из нержавеющей стали толщиной в 50 мкм. Между фольгами течёт гелий высокой чистоты для охлаждения. В фольге пучок теряет примерно 1 МэВ энергии, так что на выходе пользователи получают пучок с энергией  $\approx 16$ – $17$  МэВ.

### **3. Станция профилирования протонного пучка**

Станция профилирования протонного пучка циклотрона состоит из двух МВС. В мониторе для горизонтального сканирования вибрирующая струна направлена вертикально, а для вертикального сканирования – горизонтально. Подача мониторов осуществляется при помощи линейных приводов, оснащенных шаговыми двигателями. Компоненты станции подробнее описаны ниже.

#### *3.1. Основные параметры монитора вибрирующей струны*

Принцип действия (МВС) заключается в измерении частоты собственных колебаний струны, которая сильно зависит от натяжения струны. Поток частиц, падающих на струну вызывает перегрев струны, влияющий на ее натяжение [17]. Для возбуждения стабильных колебаний струны на ее собственной частоте (или ее гармониках) используется взаимодействие тока, протекающего через струну, со специально конфигурированным магнитным полем на базе сильных постоянных магнитов с магнитными полюсами. Струна внедрена на вход операционного усилителя, который усиливает э.д.с со струны при ее случайных колебаниях и подает усиленный сигнал на струну при той же фазе. Такая положительная обратная связь приводит к автогенерации собственных колебаний струны, в силу того, что добротность именно таких колебаний максимальна. Схема во многом подобна схемам возбуждения колебаний кварцевого генератора (подробнее см. работу [18] и цитируемую там литературу). Характерные времена отклика струны составляют от долей секунд до нескольких секунд в зависимости от материала струны и размеров датчика. МВС обладают сильной тепловой зависимостью также по отношению к температуре базы, на которой закреплена вибрирующая струна. Однако, такая зависимость обладает гораздо большей инерционностью, что позволяет достаточно просто выделять полезный сигнал со струны.

Обычно для нужд измерения профиля пучка (см., например, работу [19]) нами используются МВС, работающие на второй гармонике с двумя разнесенными участками магнитного поля. Эта конфигурация позволяет высвободить апертуру для сканирования пучка, расположенную в центральной

области струны. Для станции профилирования циклотрона С18 были изготовлены два МВС с новой модификацией магнитного поля, обеспечивающей лучшую плоскостность магнитного поля. Такая плоскостность подавляет возбуждение второй гармоники колебаний струны в плоскости, ортогональной плоскости магнитного зазора и несколько отличающейся от нужной нам гармоники колебаний в плоскости магнитного зазора. Общий вид монитора представлен на рис.1. Для крепления струны использовалась лепестковая система зажима, изготовленная с помощью электроэрозионного станка. В качестве материала струны выбрана термообработанная нержавеющая сталь (марка AISI 316 [20]). Длина струн 56 мм, длина каждого участка магнитного поля вдоль струны 10 мм, апертура датчика 14 мм (см. рис.1б).

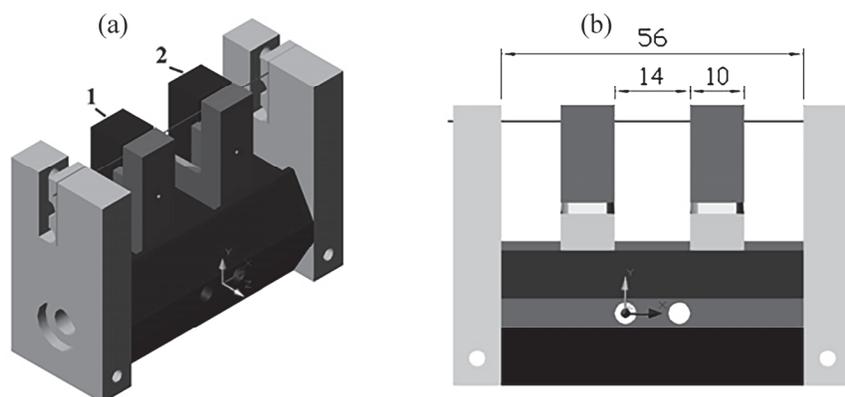


Рис.1. Общий вид МВС: (а) – изометрический вид модели, 1 и 2 – модифицированная система магнитных полюсов, (б) – вид по оси пучка с характерными размерами: апертура монитора 14 мм, диаметр используемых постоянных магнитов 10 мм с толщиной 3 мм.

### 3.2. Сборка станции профилирования

Станция профилирования пучка с двумя МВС собрана на единой платформе. В качестве несущей детали системы подачи мониторов использовалась стальная квадратная труба 100 мм × 100 мм. На горизонтальной и вертикальной поверхностях этой трубы смонтированы механизмы линейных приводов на базе шаговых двигателей, с точностью позиционирования 10 мкм. Приводы оборудованы концевыми переключателями, позволяющие также производить парк-позиционирование МВС. Из предварительных соображений ожидалось, что протонный пучок на выходе из вакуумного окна имеет достаточно большую расходимость. Поскольку мониторы горизонтального и вертикального сканирования разнесены по оси пучка (ось Z), то соответствующие сканирования предполагалось производить поочередно со стороны монитора горизонтального сканирования и далее, после разворота станции профилирования на 180° вокруг вертикальной оси, со стороны монитора вертикального сканирования.

### *3.3. Система электроники и программное обеспечение*

Преимуществом МВС является то, что в качестве выходного сигнала используется частотный сигнал, генерируемый специально разработанной платой автогенерации, обеспечивающей возбуждение стабильных колебаний струны на ее собственной частоте. Для станции профилирования использовалась выделенная плата автогенерации, изготовленная для датчика DW-VWM, который содержал две струны разнесенные экраном [21]. Эта плата содержит минимальное количество электронных компонент и расположена вблизи монитора. Измерительно/интерфейсная часть электроники при этом выносится в комнату управления и не подвергается воздействию радиации. Частотный характер передаваемого сигнала позволяет использовать для передачи обычные LAN-кабели с длиной до 100 м. В экспериментальной комнате кроме того располагаются два драйвера, обеспечивающих движение шаговых двигателей. Питание установки осуществляется с помощью блока постоянного напряжения  $\pm 12$  В от сети. Для обеспечения защиты перечисленных узлов электроники от радиации и помех электромагнитного поля вся электроника помещена в металлическую коробку. Система электроники мониторов включает также расположенную в комнате управления измерительную плату частоты, содержащую интерфейс связи с компьютером посредством последовательного порта. Плата автогенерации колебаний и измерительная плата частоты соединены друг с другом LAN-кабелем, длина которого в данном эксперименте составляла  $\sim 50$  м. При этом измерительная плата запитывалась постоянным напряжением  $\pm 12$  В со стороны платы автогенерации. Платы автогенерации колебаний и измерения частоты разработаны и изготовлены нами. Управление шаговым двигателем осуществлялось стандартными драйверами и также при помощи LAN-кабеля.

Программное обеспечение разработано на базе VisualBasic 2010. Программа содержит универсальное окно визуализации результатов, а также модули контроля и управления мониторами вибрирующей струны и шаговыми двигателями.

## **4. Эксперименты по измерению профиля протонного пучка циклотрона С18**

Станция профилирования протонного пучка, выведенного в воздух с учетом предполагаемой большой угловой расходимости пучка была установлена на минимально возможном расстоянии от вакуумного окна. Общий вид взаимного расположения мониторов и протонного пучка с угловой расходимостью  $5^\circ$  (предполагаемое значение) показан на рис.2 (мониторы расположены в парковых позициях).

Расстояние между поверхностями 1 и 2 составляет 62 мм, расстояние между струнами МВС1 и МВС2 – 123 мм (вдоль оси пучка). Для защиты всей системы профилирования от конвективных потоков воздуха, а также частично от

радиации, вся системы размещена в металлической коробке с входным и выходными отверстиями для пучка. Кроме того для предотвращения накоплений остаточной радиации на мониторах, последние защищены свинцовыми экранами, обеспечивающими экспонирование протонным пучком только струны.

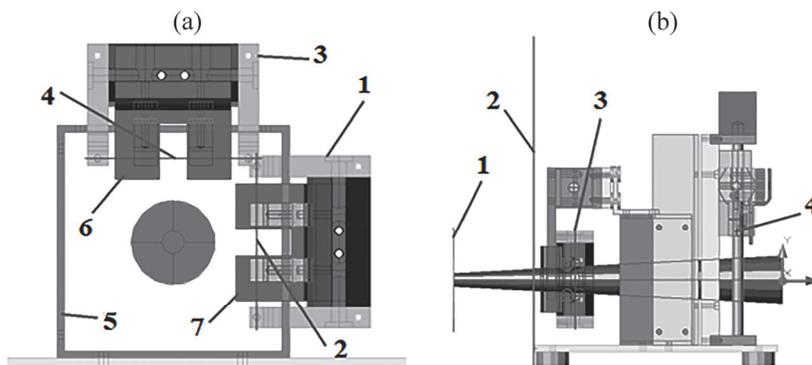


Рис.2. Вид станции профилирования по оси пучка: (а) 1 – МВС1 горизонтального сканирования с вибрирующей струной 2; 3 – МВС2 вертикального сканирования с вибрирующей струной 4; 5 – квадратная труба; 6 – свинцовая защитная пластина. Вид станции сбоку (b): 1 – коллиматор вакуумного окна; 2 – торцевая панель металлической коробки станции; 3 – МВС1; 4 – МВС2.

#### 4.1. Горизонтальное сканирование пучка

В первом эксперименте по горизонтальному сканированию использовались две скорости подачи 0.2 мм/с и 1 мм/с. Ионный ток источника ускорителя был выставлен первоначально на значение 38 мА, что соответствовало току пучка ~0.5–1.5 мкА (по непрямым измерениям). Общий вид экспериментальных данных приведен на рис.3 (зависимость частоты и позиции монитора МВС1 от времени).

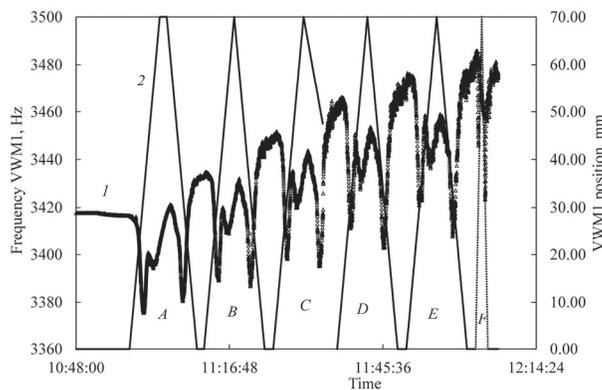


Рис.3. Результаты сканирований пучка с одинаковым током пучка и двумя величинами скорости сканирования (на участках A, B, C, D, E – 0.2 мм/с, на участке F – 1 мм/с.): 1 – частота МВС1, 2 – позиция МВС1, A, B, C, D, E, F – участки последовательных сканирований.

Во время третьего сканирования (С на рис.3) произошел сбой в чтении ответов с шагового двигателя, и монитор приведен в парк-позицию командой Reset без записи информации о положении монитора.

На рис.3 виден дрейф частоты монитора после включения пучка, связанный с существенным прогревом корпуса монитора/защитного свинцового экрана (см. ниже). Видно, что структура частотного сигнала МВС1 в общих чертах одинакова для медленных сканирований. Начальная частота при соприкосновении с пучком из-за прогрева начинает достаточно резко падать, однако, при выходе из пучка (на рис.3 это минимумы падения частоты) на частотной кривой наблюдался пик, характеризующий определенные тепловые процессы в струне, которые на обратном ходе сканирования проявлялись в виде перегиба на склоне.

Отметим, что наблюдалась также сильная корреляция между частотами обоих мониторов (МВС2 все время находился в парк-позиции), причем с положением МВС1 коррелирует также шумность частоты второго монитора (см. рис.4).

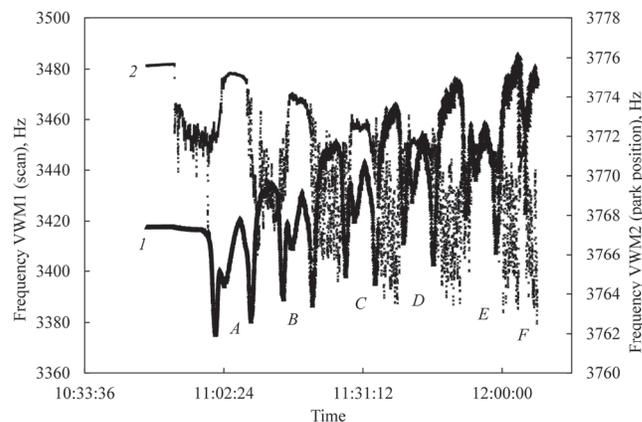


Рис.4. Корреляция между показаниями мониторов МВС1 и МВС2: 1 – частота МВС1, 2 – частота МВС2, участки A, B, C, D, E, F – последовательные сканирования.

Такая корреляция может быть объяснена протеканием тепловых процессов с гораздо большим временем запаздывания, по сравнению с характерным временем отклика струны, которое для данного монитора составляет  $\approx 0.46$  с (расчетное время).

После экспериментов по горизонтальному сканированию пучка, которые включали также повышение тока ионного источника до 120 мА, станция профилирования подверглась визуальному осмотру и обнаружилось, что свинцовый экран, защищающий магнитные компоненты и базу МВС1, действительно подвергался сильному тепловому воздействию и на кромке входа экрана в пучок даже проплавился с образованием каверны (см. далее рис.11). Ясно, что это воздействие с запаздыванием передавалось на базу датчика и приводило к наблюдаемым дрейфам частоты МВС1.

Рассмотрим подробнее процесс сканирования в первой части эксперимента (см. рис.5, диапазон по времени 10:48:00-11:11:00), в котором объясним структуру частотного сигнала МВС1.

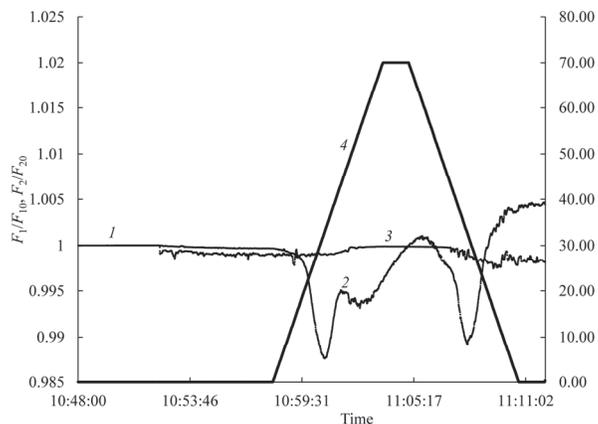


Рис.5. Зависимость относительных частот МВС1 и МВС2 и позиции первого монитора от времени (ток ионного источника 38 мА, ток пучка 0.5–1.5 мкА): 1 – участок частоты до включения высокой частоты (ВЧ) с низким уровнем шума (на этом участке сигналы МВС1 и МВС2 совпадают), 2 – характерный пик при наезде свинцового экрана на пучок, 3 – участок подавления шума частоты второго монитора при полном экспонировании пучка на свинцовую пластину, 4 – позиция МВС1.

До включения высокой частоты (11:50) шум сигналов с обоих мониторов составлял величину  $\approx 0.01$  Гц (функция Average Deviation программы Excel соответственно 0.0094 Гц и 0.011 Гц для первого и второго мониторов) (см. 1 на рис.5). Включение ВЧ существенно увеличило шумность обоих мониторов, причем если для первого только до 0.12 Гц, то для второго – до 1.3 Гц. Отсюда следует, что на выходе циклотрона образуется пучок и без запуска ионного источника (за счет ускорения остаточных Н<sup>-</sup>). Процесс сканирования начался в 10:58:00. Из рис.5 видно, что при выходе из пучка на прямом ходе сканирования происходила перестройка частоты как первого (сканирующего монитора), так и второго мониторов. Характерная позиция сканирующего монитора при этом составляла  $\approx 41$  мм и соответствовала началу процесса пересечения пучка с кромкой защитного свинцового экрана. Теплоотвод передаваемой со стороны пучка мощности на кромке был мал, и кромка начинала плавиться. При этом шумность частотного сигнала МВС2 сильно упала и составила только 0.015 Гц (монитор МВС1 при этом находился в положении 70 мм, участок 3 на рис.5).

Во втором сеансе эксперимента было произведено два сканирования при токе ионного источника 60 мА и 100 мА. Далее монитор был выведен на позицию 30 мм (значение, соответствующее максимальному воздействию пучка на частоту струны), при котором значение ионного тока менялось ступенчато по следующим значениям тока ионного источника: 40 мА, 50 мА, 60 мА, 70 мА, 80 мА, 90 мА, 100 мА, 110 мА, 120 мА. В конце этой серии значений МВС1 был выведен на парк-позицию и было произведено полное сканирование на глубину 70 мм при значении ионного тока 120 мА (см рис.6).

Как и в первом сеансе выберем для анализа начало эксперимента (см. рис.7), так как в течение последующих сканирований, как отмечалось выше, происходил

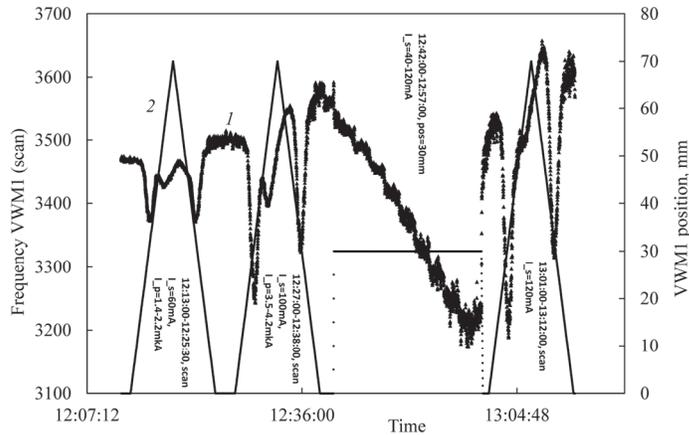


Рис.6. Результаты горизонтального сканирования во втором сеансе эксперимента. Зависимость частоты и положения МВС1 от времени. 1 – частота МВС1, 2 – позиция МВС1.

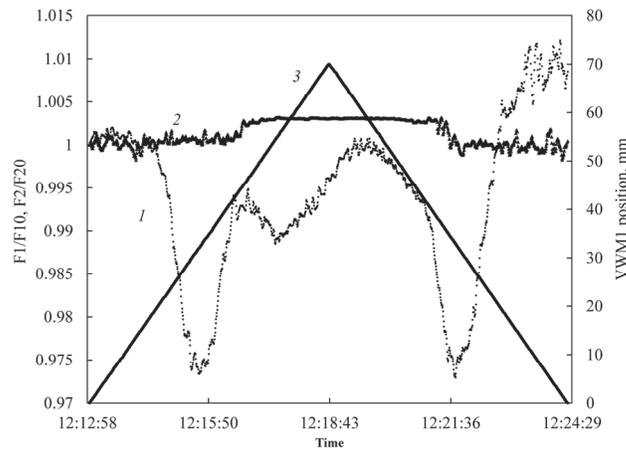


Рис.7. Зависимость относительных частот МВС1 и МВС2, а также позиции первого монитора от времени в начале второго сеанса эксперимента по горизонтальному сканированию (ток ионного источника 60 мА, ток пучка ориентировочно 1.4–2.2 мкА). 1 – сигнал МВС1, сигнал МВС2, 2 – позиция МВС1.

наезд пучка на свинцовый экран и перегрев корпуса датчика, сопровождающийся дрейфом частоты.

Как и на рис.5 здесь наблюдается уменьшение шумности частотного сигнала МВС2 при глубине сканирования МВС1, больше 40 мм.

Для восстановления горизонтального профиля пучка мы выберем именно это сканирование, так как длительное облучение защитной свинцовой пластины МВС1 здесь только началось и тепловой дрейф частоты еще умеренный. На рис.8 представлены зависимости частот МВС1 и МВС2.

Для восстановления профиля пучка были выбраны точки, соответствующие началу прямого сканирования и сканирование пучка до позиции МВС1 42 мм, а

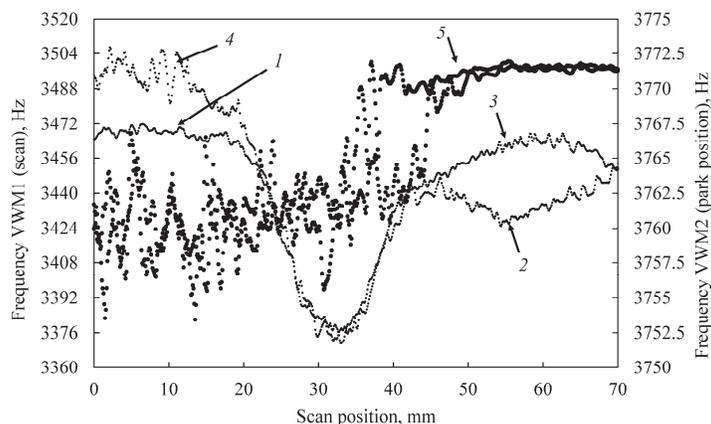


Рис.8. Зависимости частот МВС1 и МВС2 от положения МВС1 (ток ионного источника 60 мА, ток пучка  $\approx 1.4\text{--}2.2$  мкА). Стрелками указаны: 1 – начало прямого сканирования (в сторону увеличивающихся значений положений МВС1), 2 – поведение частоты после наезда МВС1 на кромку свинцовой пластины, 3, 4 – поведение частоты при обратном сканировании, 5 – частота МВС2.

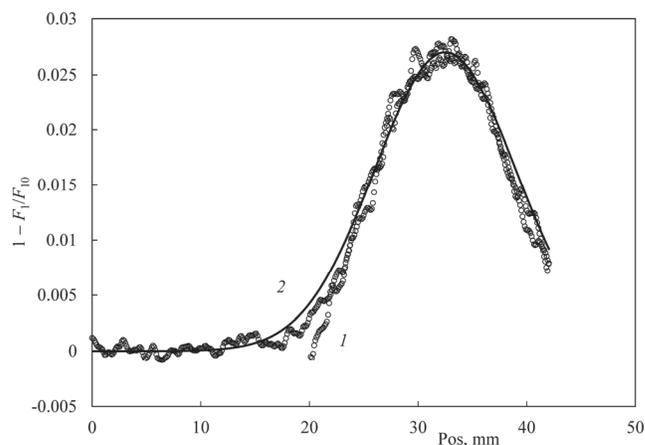


Рис.9. Восстановление горизонтального профиля пучка для энергии источника тока 60 мА. 1 (кружочки) – экспериментальные данные в пределах времени 12:13:00-12:25:00, 2 (сплошная линия) – фитирование гауссовой кривой.

также точки обратного сканирования от позиции 42 мм до 20 мм. По этим экспериментальным точкам было произведено фитирование гауссовой кривой (см. рис.9).

Характерные параметры гауссовского профиля: центр кривой 32.5 мм, среднеквадратичное отклонение 6.5 мм.

#### 4.2. Вертикальное сканирование пучка

Вертикальное сканирование производилось через три недели после горизонтального, так как по сценарию эксперимента станция профилирования разворачивалась на  $180^\circ$  вокруг вертикальной оси, так чтобы на пучок выставлялся

МВС2 и сканирование производилось по тому же сечению, что и горизонтальное сканирование (плоскость сечения на расстоянии 62 мм от поверхности вакуумного окна). Для этого потребовалось выждать, пока радиационный фон станции профилирования выйдет на допустимый уровень. Общий вид экспериментальных данных приведен на рис.10 (зависимость частоты и позиции монитора МВС2 от времени). Всего было произведено пять сканирований на полную глубину 70 мм при различных токах протонного пучка. Поскольку ток пучка измерялся косвенно и неточно, приведем соответствующие значения ионного источника пучка: 90 мА, 100 мА, 110 мА, 70 мА, 120 мА.

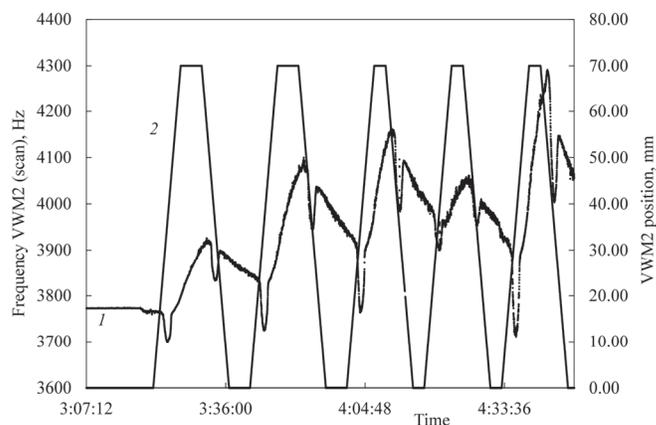


Рис.10. Общий вид данных по вертикальному профилированию пучка: зависимость частоты МВС2 и положения монитора от времени. 1 – ток ионного пучка 90 мА, 2 – 100 мА, 3 – 110 мА, 4 – 70 мА, 5 – 120 мА.

Как было выяснено из экспериментов по горизонтальному сканированию, монитор в процессе подвергается значительному тепловому воздействию. На рис.11 представлен МВС2 после окончания серии сканирований (снимок был сделан через две недели после окончания эксперимента).

Видно, что также как и для горизонтального сканирования, при больших

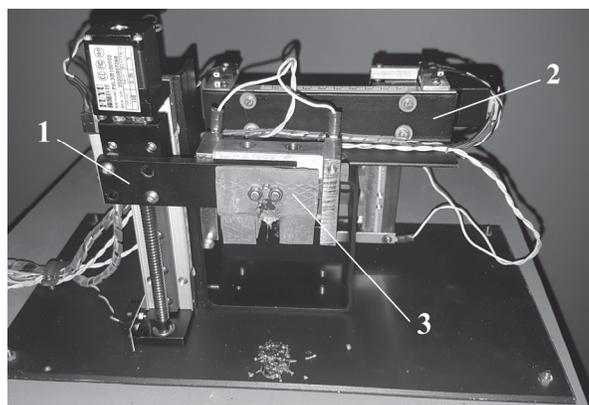


Рис.11. Вид монитора вертикального сканирования после окончания эксперимента: 1 – (на переднем плане) монитор вертикального сканирования, 2 – (на заднем плане) монитор горизонтального сканирования, 3 – проплавленный защитный экран МВС2.

смещениях монитора происходит значительная теплопередача со стороны протонного пучка на защитную свинцовую пластину, вплоть до ее проплавления. На каком из сканирований это произошло, к сожалению, по результатам эксперимента не видно. Видно, однако, что датчик во всех случаях сохранял работоспособность как на сканировании вниз (движение из парк-позиции), так и при движении вверх (возвращение на парк-позицию). Тем не менее, из-за сильного теплового дрейфа после наезда свинцовой пластиной на пучок, для восстановления профиля пучка предпочтительно пользоваться данными только при сканировании вниз до значения 24–25 мм.

На рис.12 приведены соответствующие профили пучка в этом диапазоне для значений тока ионного источника: 90 мА, 100 мА, 110 мА, 120 мА. В качестве

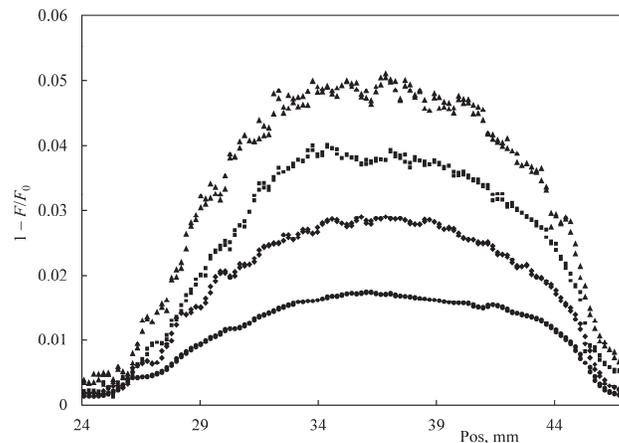


Рис.12. Вертикальные профили пучка для различных значений тока пучка. Снизу-вверх ток ионного источника соответствует значениям: 90 мА, 100 мА, 110 мА, 120 мА.

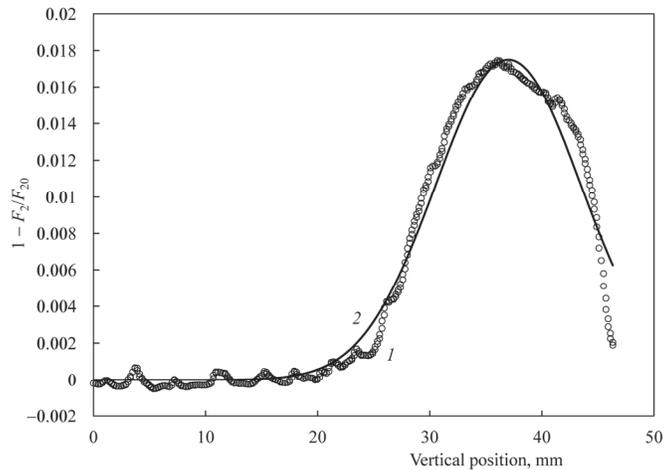


Рис.13. Восстановление вертикального профиля пучка для энергии источника тока 90 мА. 1 (кружочки) – экспериментальные данные в пределах времени 15:21:01–15:26:41, 2 (сплошная линия) – фитирование гауссовой кривой.

информации о профиле пучка использовалась функция  $1 - F_2 / F_{20}$ , где  $F_2$  – текущая измеряемая частота МВС2,  $F_{20}$  – значение частоты на позиции 20 мм (до входа струны в пучок).

Как видно пучок далек от гауссовского распределения при всех значениях тока пучка. Тем не менее приведём фитирование экспериментальных точек гауссовой кривой (см. рис.13).

Характерные параметры гауссовского профиля: центр кривой 37 мм, среднеквадратичное отклонение 6.5 мм.

## 5. Заключение

Проведенные в работе эксперименты показали работоспособность всех узлов станции профилирования, включающие двухканальную плату автогенерации колебаний, систему линейных приводов мониторов горизонтального и вертикального сканирования. Связь между экспериментальной комнатой и комнатой управления также функционировала удовлетворительно. Плата измерения частоты и интерфейса с компьютером обеспечили надежную связь с мониторами и шаговыми двигателями линейных приводов. Оба монитора показали работоспособность в достаточно тяжелых условиях сильного перегрева защитных свинцовых пластин. Колебания струны обоих мониторов не срывались для всех значений тока протонного пучка. Все это дало возможность впервые произвести измерения горизонтального и вертикального профилей протонного пучка циклотрона С18 на выходе из вакуумного окна.

Обнаружились и недостатки станции профилирования. В первую очередь это касается мониторов, у которых была недостаточная апертура и короткие клипсы, зажимающие струну. Защитные свинцовые пластины были вырезаны на недостаточную глубину вдоль оси сканирования. Все это привело к их экспонированию протонным пучком и возникновению помех, вызванных сильным тепловыделением. Была замечена также проблема синхронизации измерений частоты с сигналами положения монитора при сканировании, обусловленная использованием сигналов компьютерного времени. Для медленных сканирований эта проблема несущественна, но может приводить к неточностям при быстрых сканированиях.

Для оснащения циклотрона С18 штатной станцией профилирования следует использовать мониторы с увеличенной апертурой (представляется, что 20 мм будет достаточно). Клипсы зажимов струны следует удлинить, обеспечив свободный выход пучка в область между струной и базой монитора. Использование защитных свинцовых пластин было целесообразно, однако, правильнее сделать вырез в пластине строго по контуру проекции базы и магнитной системы монитора. Удобнее использовать при этом плоские пластины и предусмотреть крепление пластины на базе монитора винтами, расположенными по возможности дальше от оси сканирования. При проведении сканирования целесообразно не

проводить сканирование на фиксированную максимальную глубину, а использовать обратную связь по падению частоты мониторов и прекращать движение по выходу струны из пучка. Целесообразно также сократить расстояние между сечениями горизонтального и вертикального сканирований, а с использованием линейных приводов с достаточным диапазоном движения эти плоскости совместить. При проведении сканирований следует запускать систему измерения полного тока пучка, что даст возможность получать профили пучка в абсолютных единицах плотности тока вдоль оси сканирования. В новой модификации электроники целесообразно предусмотреть плату управления и регистрирования сигналов частоты и шаговых двигателей с собственным таймером.

Авторы выражают искреннее благодарности **А. Аветисяну** за поддержку работы на начальном этапе.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета по науке РА в рамках научного проекта 20APP-2G001.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. <https://www.iba-radiopharmasolutions.com/cyclotrons>
2. <https://www.iba-radiopharmasolutions.com/radioisotopes>
3. <https://www.petct-armenia.am/>
4. **G.A. Karamysheva, O.V. Karamyshev, S.A. Kostromin, N.A. Morozov, E.V. Samsonov, E.M. Syresin, G.D. Shirkov, S.G. Shirko.** Technical Physics, **57**(1), 106, (2012).
5. **L. Jasna,** PRST, AB, **4**, 123501 (2001).
6. **W. Kleeven, E. Forton, E. Kral, B. Nactergal, V. Nuttens, J. Van de Walle, S. Zarembo.** IBA, Louvain-la-Neuve, Belgium, Proceedings of Cyclotrons, Zurich, Switzerland, 2016.
7. **Р.О. Авакян, А.Э. Аветисян, И.А. Керобян, С.П. Тароян,** Известия НАН Армении, Физика, **44**, 380 (2009).
8. **К.Ш. Агабабян, Н.А. Демехина,** О возможности получения  $^{123}\text{J}$  для радиоизотопной диагностики на линейном ускорителе электронов в ЕрФИ, Препринт ЕФИ-823(50)-**85**, (1985).
9. **А. Сирунян, А. Акопян, Г. Айвазян, А. Бабаян, Г. Варданян, Г. Зограбян, К. Давтян, Г. Торосян, А. Папян,** Известия НАН Армении, Физика, **53**, 363 (2018).
10. **А.М. Сирунян.** Развитие экспериментальных методов и исследования по ядерной физике на инжекторе ЕрФИ и элементарных частиц в международных центрах (CERN-LHC, DESY-H1, JINR), <http://www.ru.convdocs.org/docs/index-235948.html>
11. **I. Kerobyan, H. Marukyan,** J. Contemp. Phys., **55**, 8 (2020).
12. Cyclotron Based Production of Tc-99m. Iaea Radioisotopes and Radiopharmaceuticals Reports, no. 2, International Atomic Energy Agency, Vienna, 9-14 (2017).
13. **A. Avetisyan et al.,** EPJ Web of Conferences, **93**, 08001 (2015).
14. **A. Avetisyan, R. Sargsyan, A. Melkonyan, M. Mkrtchyan et al.,** IJESIT **4**(3), 37 (2015).
15. <https://www.iba-radiopharmasolutions.com/cyclotrons-equipment>
16. <https://www.elexcomm.com/product/539d84643beb6ec14b00000d>

17. S.G. Arutunian, M.R. Mailian, K. Wittenburg, NIM A, 572, 1022 (2007).
18. S.G. Arutunian, A.V. Margaryan, G.S. Harutyunyan, E.G. Lazareva, M. Chung, D. Kwak, D.S. Gyulamiryan, JINST, 16, 1 (2021).
19. M.A. Aginian, S.G. Arutunian, D. Choe, M. Chung, G.S. Harutyunyan, S.-Y. Kim, E.G. Lazareva, A.V. Margaryan, J. Contemp. Phys., 52, 110 (2017).
20. <http://www.goodfellow.com/catalogue/GFCatalogue.php?Language=E>
21. M. Chung, S.G. Arutunian, G.S. Harutyunyan, D. Kwak, E.G. Lazareva, A.V. Margaryan, M.A. Tumanyan. 8th International Beam Instrumentation Conference, IBIC2019, Malmo, Sweden, Malmo, Sweden, 368-370 (2019).

ՏԱՏԱՆՎՈՂ ԼԱՐԵՐԻ ԿԱՅԱՆ C18 ՑԻԿԼՈՏՐՈՆԻ ՊՐՈՏՈՆԱՅԻՆ ՓՆՋԻ  
 ՀՈՐԻԶՈՆԱԿԱՆ ԵՎ ՈՒՂՂԱՀԱՅԱՑ ՊՐՈՖԻԼՆԵՐԸ  
 ՕՂՈՒՄ ՉԱՓԵԼՈՒ ՀԱՄԱՐ

Մ.Ա. ԱՂԻՆՅԱՆ, Ա.Պ. ԱՊՐԱՀԱՄՅԱՆ, Ս.Գ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ,  
 Գ.Ս. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Է.Գ. ԼԱԶԱՐԵՎԱ, Լ.Մ. ԼԱԶԱՐԵՎ, Ա.Վ. ՄԱՐԳԱՐՅԱՆ,  
 Լ.Ա. ՇԱՀԻՆՅԱՆ, Ռ.Կ. ԴԱԼԼԱՔՅԱՆ, Ա.Ա. ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ, Վ.Խ. ԷԼԲԱԿՅԱՆ,  
 Գ.Ա. ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ, Գ.Ե. ԷԼԲԱԿՅԱՆ, M. CHUNG, D. KWAK

Հոդվածը ներկայացնում է C18 ցիկլոտրոնի պրոտոնային փնջի հորիզոնական և ուղղահայաց պրոֆիլների չափման առաջին փորձերի արդյունքները՝ օգտագործելով պրոֆիլային կայան, որը հիմնված է տատանվող լարի մոնիտորների վրա: Չափումները կատարվել են ցիկլոտրոնի փնջատարի ելքին տեղադրված հատուկ վակուումային պատուհանից պրոտոնային փնջի օդ դուրս գալու ժամանակ: Պրոֆիլները չափվել են պրոտոնի փնջի հոսանքի տարբեր արժեքների համար: Կայանը ցույց է տվել իր արդյունավետությունը ուժեղ խոտորումների առկայությամբ, որոնք առաջանում էին պրոտոնային փնջի պաշտպանիչ կապարի թիթեղների վրա ընկնելու պայմաններում:

VIBRATING WIRE STATION FOR HORIZONTAL AND VERTICAL  
 PROFILING OF PROTON BEAM OF CYCLOTRON C18 IN AIR

M.A. AGINIAN, A.P. APRAHAMYAN, S.G. ARUTUNIAN, G.S. HARUTYUNYAN,  
 E.G. LAZAREVA, L.M. LAZAREV, A.V. MARGARYAN, L.A. SHAHINYAN,  
 R.K. DALLAKYAN, A.A. MANUKYAN, V.K. ELBAKYAN,  
 G.A. HOVHANNISYAN, G.E. ELBAKYAN M. CHUNG, D. KWAK

The paper presents the results of the first experiments on measuring the horizontal and vertical profiles of the proton beam of the C18 cyclotron using a profiling station based on vibrating wire monitors. The measurements were performed at the proton beam exit into the air from a special vacuum window located at the end of the cyclotron beamguide. The profiles were measured for different values of proton beam current. The station showed its operability under the conditions of strong disturbances caused by the exposure of protective lead plates to the proton beam.