

## КОМПАКТНЫЙ ЦИКЛОТРОН CV-28 И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

*А.М. Егоров, А.Г. Лымарь, И.М. Неклюдов, Ю.Т. Петрусенко*  
*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
 Харьков, Украина*

Описан проект многоцелевого исследовательского комплекса, создаваемого на основе циклотрона CV-28, переданного в 2006 году Юлихским научным центром (Юлих, Германия) ННЦ ХФТИ. Приведены конфигурация и параметры основных систем комплекса, характеристики ускоряемых ионных пучков и программы их использования для проведения исследований радиационной стойкости и физико-механических свойств конструкционных материалов активной зоны ядерных реакторов. Приведены также программы развития и использования технологий производства радионуклидов для медицинских целей.

### ЦИКЛОТРОН CV-28

Компактный, изохронный циклотрон CV-28, поставленный фирмой Cyclotron Corporation (США) Юлихскому научному центру (Юлих, Германия), позволяет в непрерывном режиме генерировать пучки легких ионов  $H^+$ ,  $^2H^+$ ,  $^3He^{++}$ ,  $He^{++}$  с возможностью регулировки их энергии на выходе в достаточно широких пределах [1].

Номинальные характеристики циклотрона CV-28 [2] приведены в Таблице.

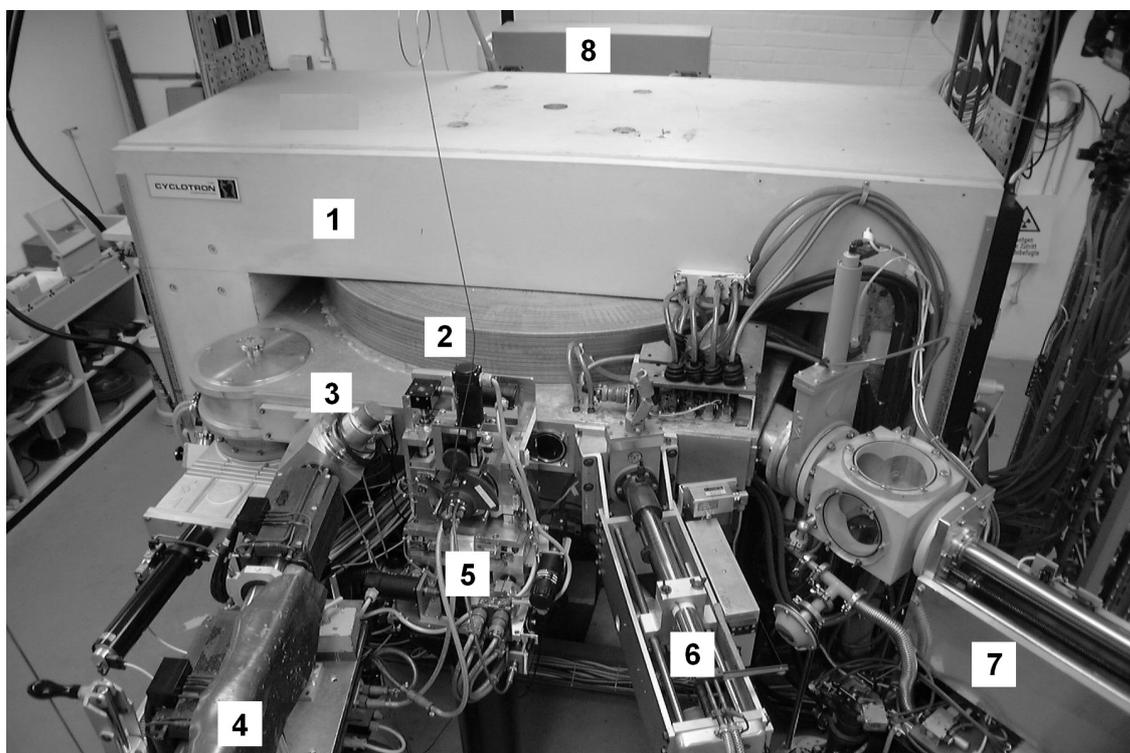
Следует отметить, что приведенные выше достоинства данного циклотрона подкреплены тем, что его перенастройка на получение ионов с другим значением энергии, либо на ускорение ионов другого

сорта может производиться не единожды за смену, т.е. достаточно оперативно.

*Характеристики циклотрона CV-28*

Ускоряемые частицы	Энергии ускоренных частиц (МэВ)	Ток на наружной мишени (МкА)	Ток на внутренней мишени (МкА)
$H^+$	2...24	40...60	200
$^2H^+$	4...14	50...100	300
$^3He^{++}$	6...36	5...50	135
$He^{++}$	8...28	6...40	90

Вид циклотрона CV-28 со стороны выхода ускоренного пучка приведен на Рис.1.



*Рис.1. Вид циклотрона CV-28 со стороны выхода ускоренного пучка.*

*1 – Магнитопровод электромагнита; 2 – Верхний соленоид электромагнита;*

*3 – Камера ускорения ионов; 4 – Ионопровод выведенного ионного пучка;*

*5 – Система юстировки и электропитания источника ионов;*

*6 – Система контроля положения ускоряемого пучка; 7 – Блок управления внутренней мишенью;*

*8 – ВЧ-генератор*

На Рис.2 схематически показаны элементы циклотрона, расположенные внутри камеры ускорения.

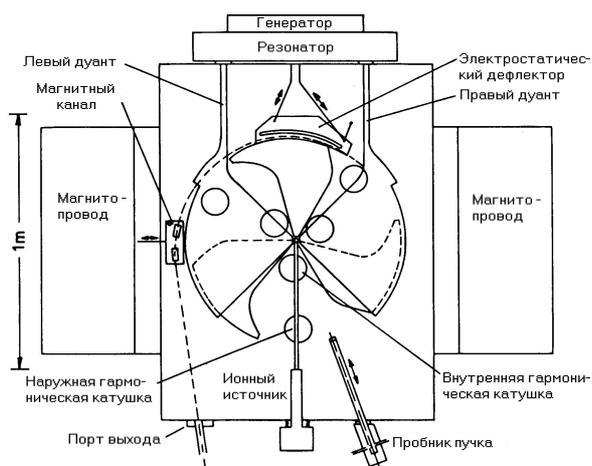


Рис.2. Сечение циклотрона медианной плоскостью

Из Рис.2 видно, что инжекция ионов производится вблизи центра ускорительной камеры. Ускорение ионов производится электрическими полями дуантов, подключенных к ВЧ-генератору. Траектории

ускоряемых ионов – разворачивающиеся спирали вблизи медианной плоскости.

Внутренние гармонические катушки позволяют создать подстройкой распределения магнитного поля вблизи инжектора оптимальные условия для дальнейшего ускорения ионов. Наружные гармонические катушки позволяют уменьшить потери ускоренных ионов при выводе ускоренного пучка с помощью дефлектора. Пробник пучка используется при наладке для контроля положения ускоряемого пучка на различных радиусах.

На Рис.2 показаны также фигурные радиальные полюсные наконечники, позволяющие реализовать аксиальную фокусировку и изохронное ускорение ионов.

Ускоренный пучок может высаживаться на мишень, располагаемую внутри камеры ускорения, (на Рис.2 она не показана), а может, как это показано на Рис.2, выводиться с помощью дефлектора и магнитного канала за пределы камеры ускорения.

В нашем случае этот пучок с помощью ионпровода и расположенных на нем ионно-оптических элементов направляется на вход переключающего электромагнита, показанного на Рис.3.

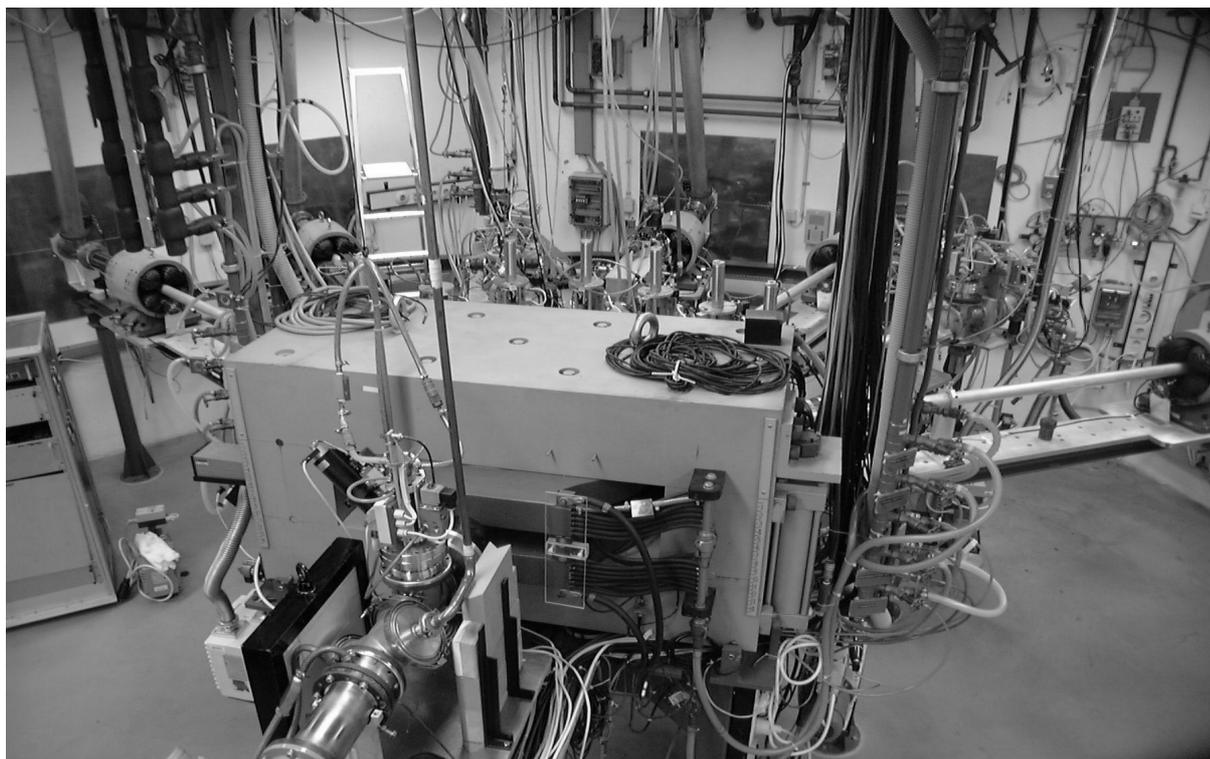


Рис.3. Переключающий электромагнит

Как видно из Рис.3, поступающий на вход переключающего электромагнита ускоренный пучок ионов подходящим значением магнитного поля может быть направлен в один из выходных ионпроводов и соответствующую мишень.

## ЦИКЛОТРОН CV-28 В ННЦ ХФТИ

### 1. Конфигурация циклотронного комплекса.

На Рис.1 и Рис.3 приведены фотографии, сделанные в Юлихском научном центре (Юлих, Германия).

В 2006 году все оборудование циклотронного комплекса CV-28 за исключением систем вентиляции и водоохлаждения было демонтировано, упаковано и к концу 2006 года перевезено в ННЦ ХФТИ.

С этого момента начались работы, имеющие своей целью ввод в действие циклотронного комплекса CV-28 в ННЦ ХФТИ в помещениях, построенных ранее.

На Рис.4 представлен план размещения оборудования ускорительного комплекса CV-28.

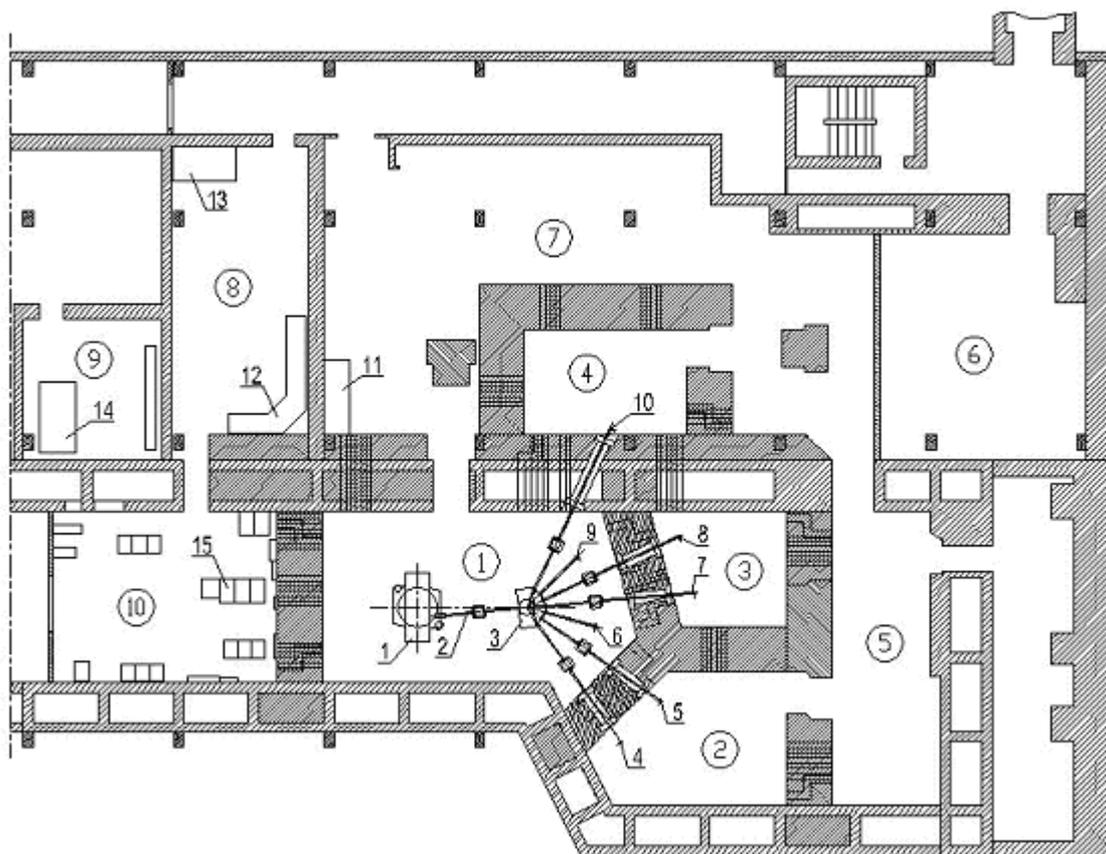


Рис. 4.

Цифры в кружках - номера комнат: 1 – комната циклотрона и переключающего электромагнита; 2-4 – комнаты мишеней; 5,7 – комнаты физиков; 6 – комната оборудования приточной вентиляции; 8 – пультовая; 9 – комната системы водоохлаждения; 10 – комната источников стабилизированного электропитания. Цифрами без кружков обозначены: 1 – циклотрон; 2 – ионопровод ускоренного пучка; 3 – переключающий электромагнит; 4-10 – мишени; 11 – система газоснабжения ионного источника; 12 – пульт управления; 13 – пульт управления системой вакуумной откачки; 14 – система автономного водоохлаждения; 15 – источники стабилизированного электропитания циклотронного комплекса

Изображенная на Рис.4 схема является результатом намерения повторить у нас схему расположения циклотронного комплекса Юлихского научного центра насколько это возможно в условиях уже существующих помещений. Практически повторена геометрия комнаты циклотрона и переключающего электромагнита, так же как и в Юлихе, две мишени расположены в комнате циклотрона и пять в трех комнатах мишеней. Повторены конструкции защитных стен и дверей.

Основные строительные работы состоят в создании защитных бетонных стен и дверей толщиной 1,8 м для комнат 1-4 и потолка толщиной 1,8 м для комнаты 4, а также фундамента для циклотрона и переключающего электромагнита.

Заново проектируются вентиляция помещений, система водоохлаждения и система электропитания циклотрона трехфазным напряжением 480 В, мощностью 300 кВт.

2. Направления использования ускоренных пучков.

2.1. Исследование изменения механических свойств материалов под влиянием бомбардировки легкими ионами.

Циклотрон является очень полезным инструментом для изучения большого разнообразия эффектов радиационных повреждений путем их моделирования с помощью легких ионов.

К настоящему времени сотрудниками Юлихского исследовательского центра отработаны методики, которые позволяют моделировать изменения механических свойств материалов атомных реакторов под действием нейтронов бомбардировкой легкими ионами, которые генерируются циклотроном CV-28 [3]. Ими же отработаны методики работы с миниатюрными образцами и выданы рекомендации по проведению механических испытаний миниатюрных облученных образцов [4,5].

Также предложен метод моделирования изменения механических свойств spallation мишеней введением в них гелия прямой имплантацией. Результаты таких исследований важны для реализации безопасной ядерной энергетики будущего.

Исследования радиационных повреждений конструкционных материалов являются одним из основных направлений будущего использования циклотрона CV 28 в ННЦ ХФТИ.

2.2. Применения в медицинских целях.

Для медицинских целей (диагностика, терапия) с помощью циклотронов производятся более 50 радиоизотопов, есть обширная литература по их приготовлению и применению. В частности, для целей диагностики в настоящее время в мире широко используется протонно-эмиссионная томография (ПЭТ), ультракороткоживущие изотопы для которой производятся на циклотронах, параметры которых близки параметрам CV-28. Стоимость ПЭТ центра составляет примерно 5 млн. долларов. При наличии циклотрона стоимость ПЭТ центра снижается вдвое. Поэтому целесообразно создать при ННЦ ХФТИ первый в Украине центр ПЭТ-диагностики.

Один из семи пучковых каналов, а именно канал №10 на Рис.4, предполагается использовать как источник быстрых нейтронов. Этот канал возможно применить для целей терапии опухолей, мало чувствительных для фотонных излучений (30% больных раковыми заболеваниями). При облучении быстрыми нейтронами излечивается 80% больных против 24% при фотонной терапии.

### 2.3. Активационный анализ.

Такой анализ важное и полезное применение циклотронов. С этой техникой достигаемый хороший уровень детекции для многих элементов. Более того, она помогает детектировать те элементы, которые не могут быть определены обычно используемым

активационным анализом с помощью тепловых нейтронов, которые получаются в реакторах. Это такие легкие элементы, как AL, Si, Ti, Cd, Te, Pb, Bi, и т.п.

## ЛИТЕРАТУРА

1. J. Hemmerich, R. Hölzle, W. Kogler. The Jülich compact cyclotron - a multi - purpose irradiation facility // *Kerntechnik 19. Jahrgang (1977) №2*.
2. J.R. Majorino, V. Sciani, S. Anefalos. The utilization of a Cyclotron CV-28 in basic and applied nuclear research...//*Braz. J. Phys. v.34 no.3a São Paulo Sept. 2004*.
3. H. Ulmaier. The simulation of neutron-induced mechanical property changes by light ion bombardment // *Invited review for Trans. Ind. Inst. Metals 34, 324 (1981) and J. Nucl. Mater. 108 & 109, 426 (1982)*.
4. P. Jung and H. Ulmaier. Miniaturized specimens for testing of irradiated materials // *Proc. IEA – Internat. Symposium, Jülich Sept. 22-23 (1994), KFA – Report, Jülich (Jan 1995)*.
5. P. Jung, A. Hishinuma, G.E. Lucas and H. Ulmaier. Recommendations for miniaturized techniques for mechanical testing of fusion materials // *J. Nucl. Mater. 1996, 232, 186*.

*Статья поступила в редакцию 18.10.2007 г.*

## COMPACT CYCLOTRON CV-28 AND PROSPECTS ITS USAGE

*A.M. Yegorov, A.G. Lyman, I.M. Nekludov, Yu.T. Petrusenko*

It was described the project of multi-functioning research complex being created on the basis of cyclotron CV-28, given by the scientific center of Julich, (Julich, Germany) NSC KPTI. It is given the configuration and parameters of the basic system of the complex, characteristics of beams accelerated as well as programs of their utilization for the purposes of carrying out of investigations of radiation resistance, physical and mechanical properties of construction materials of nuclear reactors' active regions, development and utilization of the technologies of production of radionuclides for medical purposes.

## КОМПАКТНИЙ ЦИКЛОТРОН CV-28 І ПЕРСПЕКТИВИ ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ

*О.М. Єгоров, А.Г. Лимар, І.М. Неклюдов, Ю.Т. Петрусенко*

Описано проект багатозілового дослідницького комплексу, що створюється на основі циклотрону CV-28, що був передан у 2006 р. Юліхським науковим центром (Юліх, Німеччина) до ННЦ ХФТИ. Приведені конфігурація і параметри основних систем комплексу, характеристики прискорюваних іонних пучків і програми їх використання для проведення досліджень радіаційної стійкості і фізико-механічних властивостей конструкційних матеріалів активної зони ядерних реакторів. Приведені також програми для розвитку і використання технологій виробництва радіонуклідів для медичних цілей.