

УДК 536.24

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КРИОГЕННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ МИШЕНИ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ПУЧКОМ ПРОТОНОВ ЦИКЛОТРОНА С18

Г.С. АРУТЮНЯН

Национальная научная лаборатория им. А.И. Алиханяна, Ереван, Армения

e-mail: gevharut@mail.yerphi.am

(Поступила в редакцию 16 декабря 2015 г.)

Проведены расчеты теплофизических процессов охлаждения твердотельной мишени, облучаемой пучком протонов в циклотроне С18, методом конечных элементов программой ANSYS для пучков с неоднородной плотностью распределения частиц в профиле пучка. Показано, что эффективность облучения и условия охлаждения мишени существенно зависят от распределения частиц в пучке и эффективного размера пучка. Показана принципиальная возможность осуществления криогенного охлаждения мишени, позволяющая существенно повысить эффективность облучения и увеличить выход конечного продукта – медицинского изотопа ^{99m}Tc . Разработанная методика расчета может быть применена также для других процессов облучения мишеней пучками заряженных частиц.

1. Введение

В последние годы во всем мире активно обсуждается возможность прямого получения изотопа ^{99m}Tc (минуя стадию промежуточного ^{99}Mo) для медицинских целей, используя ядерные реакции на пучках заряженных частиц [1,2]. В Национальной научной лаборатории им. А.И. Алиханяна проводятся работы по разработке технологии получения изотопа ^{99m}Tc [3] методом облучения молибденовой мишени из ^{100}Mo , запрессованного в основу из титана, протонным пучком циклотрона С18 [4]. Одним из ограничений этой методики является отвод тепла, выделяемого в мишени в результате рассеяния протонов.

В настоящей работе предлагается методика криогенного охлаждения жидким азотом с тыльной стороны мишени. Анализ теплофизических процессов проводится методом конечных элементов программой ANSYS [5].

2. Мишенный модуль

Изотоп ^{99m}Tc может производиться на циклотроне методом облучения мишени из молибдена в реакции $^{100}\text{Mo}(p,2n)^{99m}\text{Tc}$. Во время облучения протонный пучок попадает на мишенный модуль «Nitra Solid Compact TS06» [6], который

представляет собой сложную систему, обеспечивающую теплосъем и механическое крепление мишени.

Мишень состоит из металлического диска и вещества для облучения, которое располагается в центральном углублении диска (рис.1).

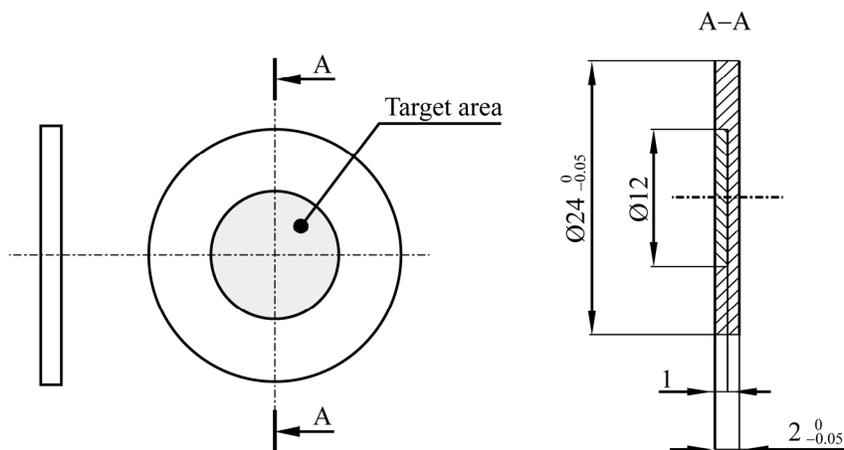


Рис.1. Геометрические параметры мишени.

Мишенный диск имеет следующие геометрические размеры: диаметр 12 мм, высота 2 мм, диаметр углубления 6 мм и глубина 1 мм.

Оптимальная толщина мишени определяется сечением реакции $^{100}\text{Mo}(p,2n)^{99\text{m}}\text{Tc}$ для протона с энергией 18 МэВ. Согласно предварительным расчетам на базе программ SRIM (Stopping and Range of Ions in Matter) данная толщина составляет 408 мкм [6]. SRIM – группа программ, которая считает длину пробега ионов в материи.

Материал, из которого изготовлен металлический диск должен обладать высокой механической прочностью, высокой теплопроводностью для эффективного теплоотвода во время облучения и быть химически инертным. Такими качествами обладают, например, титан и ниобий.

Во время облучения мишень по заводской технологии охлаждается с фронтальной и тыльной сторон. С фронтальной стороны мишень охлаждается потоком гелия. С тыльной стороны охлаждение мишени по заводской технологии осуществляется потоком воды под давлением 8 бар. Этот метод позволяет утилизировать $W = 500$ Вт тепловой мощности, выделяемой в мишени от пучка. При энергии протонов $E_p = 18$ МэВ эта мощность соответствует току пучка $I_p \approx 27$ мкА, тогда как циклотрон С18 может обеспечить ток до 100 мкА. Таким образом, увеличение интенсивности процесса охлаждения мишени позволяет значительно увеличить ток пучка при облучении и повысить эффективность получения изотопа.

Для выбора подходящего материала диска мишени и метода охлаждения нужно произвести предварительный теплофизический расчет аксиально-симметричной мишени в процессе получения изотопа ^{99m}Tc .

3. Теплофизический расчет для аксиально-симметричной мишени

В основе теплофизического расчета мишени в процессе ее облучения пучком протонов лежит решение уравнения теплопроводности

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = q(t, x, y, z) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где $T(t, x, y, z)$ – температура, зависящая от времени t и пространственных координат x, y, z , ρ – плотность материала, c – теплоемкость, q – функция генерации тепла в единичном объеме в единицу времени, λ – коэффициент теплопроводности (предполагается, что λ может зависеть от температуры). Функция q определяет образование тепла в результате рассеяния и поглощения протонного пучка в материале мишени, т.е. локальную плотность потока и сечение поглощения протонов в данном типе вещества мишени. Поскольку интерес представляет стационарное решение данной теплофизической задачи, поэтому определяющий динамику температурного поля первый член в уравнении (1) можно опустить. Кроме того, ограничимся аксиально-симметричным решением уравнения, т.к. пучок, обычно, имеет аксиальную симметрию.

Теплофизический расчет мишени проводится с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Суть МКЭ заключается в том, что область, в которой ищется решение дифференциальных уравнений, разбивается на конечное число подобластей (элементов). В каждом из элементов произвольно выбирается вид аппроксимирующей функции. В простейшем случае это полином первой степени. Вне своего элемента аппроксимирующая функция равна нулю. Значения функций на границах элементов (узлах) являются решением задачи и заранее неизвестны. Коэффициенты аппроксимирующих функций обычно ищутся из условия равенства значения соседних функций на границах между элементами (в узлах). Затем эти коэффициенты выражаются через значения функций в узлах элементов. Составляется система линейных алгебраических уравнений. Количество уравнений, равное количеству неизвестных значений в узлах, на которых ищется решение исходной системы, прямо пропорционально количеству элементов и ограничивается только возможностями ЭВМ. Так как каждый из элементов связан с ограниченным количеством соседних, система линейных алгебраических уравнений имеет разреженный вид, что существенно упрощает её решение [7].

МКЭ на сегодняшний день является основным инструментом для выполнения сложных теплофизических расчетов. Нами были проведены расчеты с

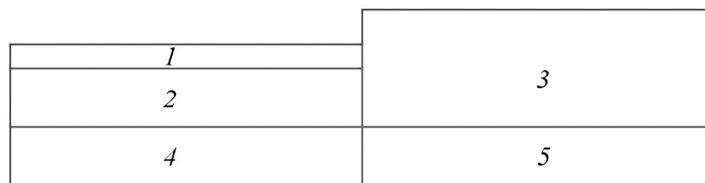


Рис.2. Расчетные области мишени: 1 – мишенное вещество, 2,3 – области мишенного диска, 4,5 – области вещества, прилегающего к мишенному диску (вода в случае водяного охлаждения и медь в случае азотного охлаждения).

помощью программы ANSYSFLOTRAN. ANSYS – универсальная программная система МКЭ анализа, существующая и развивающаяся на протяжении последних 30 лет, является довольно популярной у специалистов в сфере автоматизированных инженерных расчетов и решения линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач механики деформируемого твердого тела, механики конструкций, жидкости и газа, теплопередачи и теплообмена, электродинамики и акустики [5].

Так как мишенный диск с мишенью имеют аксиально-симметричную форму и предполагается, что пучок также аксиально-симметричен, причем оси пучка и мишени совпадают, задача сводится к решению аксиально-симметрич-

Табл.1. Коэффициенты теплопроводностей составных материалов мишени и мишенного диска при разных температурах

Температура, К	Теплопроводность, Вт/мм К			
	Молибден	Ниобий	Титан	Медь
4	0.061	0.14	0.0058	16.2
10	0.15	0.29	0.014	24
20	0.29	0.25	0.028	10.8
40	0.36	0.095	0.039	2.17
80	0.21	0.058	0.033	0.56
150	0.149	0.053	0.027	0.429
200	0.143	0.053	0.025	0.413
300	0.138	0.054	0.022	0.401
400	0.134	0.055	0.02	0.393
600	0.126	0.058	0.019	0.379
800	0.118	0.061	0.02	0.366
1000	0.112	0.064	0.021	0.352

ной модели. Модель мишенного диска и мишени состоит из нескольких областей. Сечение аксиально-симметричной модели показано на рис.2. Ось мишени проходит вдоль левых границ областей 1, 2 и 4.

После задания параметрической геометрии модели для каждой расчетной области в программу введены значения теплопроводностей материала [8] данной

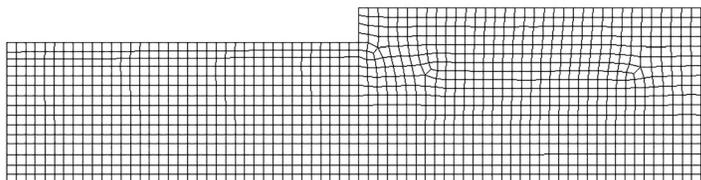


Рис.3. Сетка конечных элементов модели мишенного диска.

области при разных температурах (см. табл.1).

После введения теплопроводностей материалов задаются сетка конечных элементов модели, генерируемые мощности в каждой области, условия конвекционных теплосъемов с поверхностей мишени и граничные условия в нижней части мишени. Сетка конечных элементов показана на рис.3.

Теплоотвод мишени с фронтальной стороны осуществляется обдувом гелия, а с тыльной стороны может осуществляться потоком жидкого азота или воды. По спецификации мишенного модуля максимальное допустимое давление

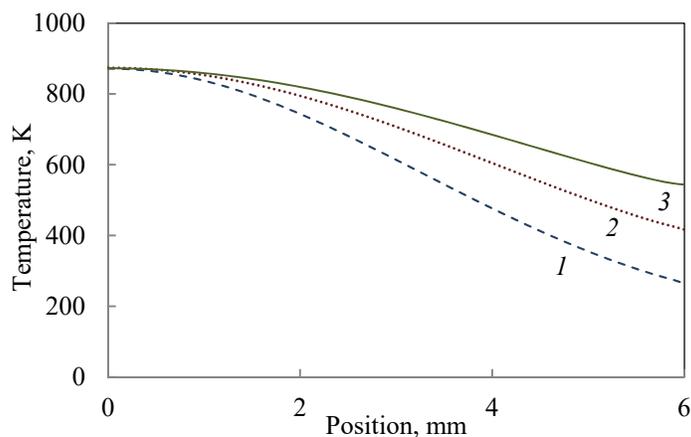


Рис.4. Распределение температуры на поверхности мишени при различных распределениях пучка в случае мишенного диска из Nb и тыльного режима охлаждения с помощью жидкого азота: (1) $\sigma = 3$ мм, $I = 32.8$ мкА, (2) $\sigma = 4$ мм, $I = 53.3$ мкА и (3) $\sigma = 5$ мм, $I = 79.1$ мкА.

гелия на входе мишени 0.5 МПа, а максимальная температура на входе 25°C. Коэффициент поверхностного теплоотвода при таких условиях составляет ~550 В/м²К [9] (в диапазоне скоростей потока гелия 3–7 м/с). Вычисления показали, что изменения этого коэффициента незначительно изменяют общую картину теплофизического расчета. Различные условия эксплуатации мишени моделируются рядом граничных условий.

Расчет проведен для разных распределений пучка циклотрона, материала мишенного диска и режима охлаждения мишени. Для каждого случая найден ток пучка, при котором максимальная температура мишени не превышает 600°C (температура, при которой металлический молибден начинает окисляться) [10]. Результаты расчетов распределения температуры на поверхности мишени при использовании мишенного диска из ниобия и тыльного режима охлаждения жидким азотом для различных распределений пучка приведены на рис.4.

Результаты расчетов в зависимости от распределения пучка, материала мишенного диска и метода охлаждения приведены в табл.2.

Табл.2. Результаты расчетов в зависимости от распределения пучка, материала мишенного диска и метода охлаждения

Входные параметры			Полученные параметры			
Коэфф. распределения пучка σ , мм	Материал мишенного диска	Метод охлаждения	Макс. ток пучка, мкА	Эффективность пучка, %	Эффективный ток, мкА	Макс. температура мишени, К
3	Ti	вода	11.6	90.5	10.5	873
4	Ti	вода	18	73.8	13.3	875
5	Ti	вода	26	59.5	15.5	875
3	Nb	вода	27	90.5	24.4	876
4	Nb	вода	44.1	73.8	32.5	874
5	Nb	вода	66	59.5	39.3	874
3	Ti	жидкий азот	16.4	90.5	14.8	873
4	Ti	жидкий азот	25.2	73.8	18.6	873
5	Ti	жидкий азот	36.2	59.5	21.5	872
3	Nb	жидкий азот	32.8	90.5	29.7	872
4	Nb	жидкий азот	53.3	73.8	39.3	874
5	Nb	жидкий азот	79.1	59.5	47.1	873

4. Заключение

Методом конечных элементов (МКЭ) на базе программы ANSYS проведен теплофизический расчет процессов охлаждения твердотельной мишени, облучаемой пучком протонов циклотрона С18. Для режима криогенного охлаждения приведены результаты по максимальной температуре поверхности мишени при разных режимах охлаждения, материалов мишенного диска и распределений плотности пучка на поверхности мишени. Показана принципиальная возможность осуществления метода криогенного охлаждения мишени, что позволит значительно поднять интенсивность пучка при облучении и таким образом повысить эффективность облучения и наработки медицинского изотопа. Также показана зависимость максимально допустимого тока пучка в зависимости от метода охлаждения и распределения плотности пучка на поверхности мишени, что позволяет настроить геометрические параметры пучка для получения оптимальной эффективности охлаждения. Это выявляет также необходимость измерения профиля поперечного сечения пучка на поверхности мишени. Данные измерения целесообразно провести методом сканирования датчиком на основе вибрирующей струны для обеспечения высокой точности измерения.

Разработанная методика расчетов на основе метода конечных элементов может быть применена в целом ряде исследований теплофизических и прочих процессов.

Автор выражает благодарность С.Г. Арутюняну и А.Э. Аветисяну за поддержку и помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. **K. Gagnon, F. Bénard, M. Kovacs, et al.** Nuclear Medicine and Biology, **38**, 907 (2011).
2. **B. Guérin, S. Tremblay, S. Rodrigue, et al.** J. Nuclear Medicine, **51**, 13N (2010).
3. **Г.С. Арутюнян.** Изв. НАН Армении, Физика, **50**, 384 (2015).
4. **A. Avetisyan, R. Avagyan, I. Kerobyan, et al.** Development of Medicine-Intended Isotope Production Technologies at Yerevan Physics Institute. EPJ Web of Conferences, **93**, (2015).
5. ANSYS, <http://www.ansys.com/>
6. Nirta Solid Compact Model TS06 Operating Manual, ELEX COMMERCE, Belgrade, Serbia (2010).
7. **R. Gallagher.** Finite Element Analysis: Fundamentals. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1975.
8. **И.С. Григорьев, Е.З. Мелихов.** Физические величины. Справочник. Москва, Энергоатомиздат, 1991.
9. **Q. Liu, K. Fukuda.** JSME Inter. J. Series B Fluids and Thermal Engineering, **45**, 559 (2002).
10. **A. Avetisyan, R. Dallakyan, R. Sargsyan, A. Melkonyan, M. Mkrtchyan, G. Harutyunyan, N. Dobrovolsky.** Inter. J. Engin. Science and Innovative Technology, **4**, 37 (2015).

С18 ՑԻԿԼՈՏՐՈՆԻ ՊՐՈՏՈՆԱՅԻՆ ՓԼՁՈՎ ՀԱՌԱԳԱՍՑԹՎՈՂ
ՊԻՆԴՄԱՐՄՆԱՅԻՆ ԹԻՐԱԽԻ ԿՐԻՈԳԵՆԱՅԻՆ ՍԱՌԵՑՄԱՆ
ՀՆԱՐԱՎՈՐՈՒԹՅԱՆ ՏԵՍԱԿԱՆ ՀԻՄՆԱՎՈՐՈՒՄԸ

Գ.Ս. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ

Կատարված են C18 ցիկլոտրոնի պրոտոնային փնջով ճառագայթվող պինդմարմնային թիրախի սառեցման ջերմաֆիզիկական հաշվարկները: Դրանք արված են վերջավոր տարրերի եղանակով՝ ANSYS ծրագրով, մասնիկների ոչ համասեռ բաշխման խտություն ունեցող փնջերի համար: Ցույց է տրված, որ ճառագայթման արդյունավետությունը և թիրախի սառեցման պայմանները զգալիորեն կախված են փնջի մասնիկների տարածական բաշխումից և փնջի էֆեկտիվ չափսերից: Ցույց է տրված թիրախի կրիոգենային սառեցման սկզբունքային հնարավորությունը, ինչը թույլ կտա զգալիորեն բարձրացնել ճառագայթման արդյունավետությունը և ճառագայթումից ստացված նյութի՝ ^{99m}Tc բժշկական իզոտոպի ելքը: Մշակված մեթոդը կարող է կիրառվել նաև լիցքավորված մասնիկներով այլ թիրախների ճառագայթման պրոցեսների համար:

THEORETICAL JUSTIFICATION OF THE CRYOGENIC COOLING POSSIBILITY
OF SOLID TARGET DURING C18 CYCLOTRON PROTON BEAM IRRADIATION

G.S. HARUTYUNYAN

Calculations of cooling thermal processes of the solid state target during C18 cyclotron proton beam irradiation were done by finite element method in ANSYS program for beams with inhomogeneous density distribution. It is shown that irradiation efficiency and the target cooling conditions significantly depends on distribution of particles density and beam effective size. It is demonstrated a principal possibility of target cryogen cooling, that provides a significant increment of irradiation efficiency and final product yield – medical isotope ^{99m}Tc . The developed method may be used for other processes of targets irradiation with charged particles as well.