

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОКАЛЬНО НАКЛОННОЙ МИШЕНИ С МИШЕННЫМ МОДУЛЕМ NIRTA SOLID COMPACT

А. АВЕТИСЯН, Р. ДАЛЛАКЯН, Н. ДОБРОВОЛЬСКИЙ*, А. ГРИГОРЯН,
А. МАНУКЯН, А. МЕЛКОНЯН, И. СИНЕНКО

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

*e-mail: n.dobrovolski@aanl.am

(Поступила в редакцию 23 ноября 2023 г.)

Разработаны новые мишени локально-наклонного типа для производства медицинских изотопов, которые можно использовать при облучении пучками протонов высокой интенсивности. Приводятся результаты численного анализа тепловых процессов в локально-наклонных мишенях из прессованного порошка молибдена с подложками из ниобия для мишенного модуля Nirta Solid Compact Model TS06. Такие мишени используются при производстве медицинского радиоизотопа Tc-99m. Расчёты проведены с помощью инженерного пакета Fluent Flow (Fluent) программной платформы ANSYS Workbench 18.2. для вариантов мишеней с линейными и аксиально-симметричными гофраами в зоне облучения протонами. Показано, что на различных моделях локально-наклонных мишеней с увеличенной в 2.37 раз площадью охлаждения можно добиться увеличения тока облучения в 1.34–1.46 раз по сравнению со стандартной плоской мишенью. Проведен анализ распределения тепловых потоков и температур в мишенях.

1. Введение

Для производства медицинских изотопов на протонных циклотронах часто используется мишенный модуль Nirta Solid Compact Model TS06. Особенностью этого модуля является простота и надёжность конструкции, однако то, что пучок протонов падает на облучаемую плоскую мишень перпендикулярно её поверхности [1, 2], является скорее недостатком конструкции, поскольку фактически сводит к минимуму доступные для охлаждения площади мишени и подложки. Как следствие, это ограничивает допустимую интенсивность облучения мишени из-за опасности её перегрева током пучка [3].

Для высокоинтенсивного облучения используются наклонённые по отношению к пучку плоские мишени, в которых одновременно уменьшена толщина мишени и увеличена поверхность охлаждения, причем в несколько раз [4–7]. К сожалению, такие мишени и соответствующие им мишенные модули гораздо сложнее в реализации.

В работе [8] мы предложили модифицированный вариант конструкции мишени и её подложки для мишенного модуля Nirta Solid Compact, который сочетает достоинства указанного модуля и целиком наклонной плоской мишени. Мы

назвали такую конструкцию мишени с соответствующей подложкой локально-наклонной мишенью (ЛНМ). Главным отличием предложенной конструкции от исходной является то, что подверженная облучению плоская часть стандартной подложки и сама плоская мишень заменяются на подобным образом гофрированные элементы. За счёт этого поверхность охлаждения ЛНМ с обеих сторон увеличивается, а толщина облучаемых частей мишени и подложки уменьшается, практически так же, как и в полностью наклонных мишенях. При этом ЛНМ остаётся совместимой с мишенным модулем Nirta Solid Compact.

В настоящей работе приводятся результаты численного анализа тепловых процессов в локально-наклонных мишенях из прессованного порошка молибдена с подложками из ниобия, которые могут использоваться при производстве медицинского радиоизотопа Tc-99m. Расчёты проведены с помощью инженерного пакета Fluent Flow (Fluent) программной платформы ANSYS Workbench 18.2 [9].

2. Описание рабочей модели и расчётной процедуры

В качестве моделей для расчётов мы остановились на двух вариантах ЛНМ и на стандартной плоской мишени, используемой как эталон: ЛНМ с аксиально-симметричными гофрами – «Двойная Аксиальная Мишень (ДАМ)»; ЛНМ с линейными гофрами – «Двойная Линейная Мишень (ДЛМ)»; «Стандартная плоская мишень (СПМ)». Слово «двойная» в названиях подчеркивает факт одновременного гофрирования и мишени, и подложки.

Особенности конструкции локально-наклонных мишеней ДАМ и ДЛМ с подложками показаны на рис. 1. На рис. 1а изображено сечение ДЛМ, на рис. 1б – сечение ДАМ. Облучаемая часть мишеней – гофрированный круговой участок в центре. Тело мишени – спрессованный порошок молибдена – гофры, расположенные сверху облучаемого участка. Остальной объём – это подложка мишени из ниобия. Пучок протонов падает на мишени сверху вдоль оси симметрии облучаемой круговой области.

Подложки мишеней функционально состоят из двух частей – облучаемых пучком протонов, гофрированных, и необлучаемых, гладких, расположенных в виде кольца на периферии. В программе гофрированные фрагменты подложек – это домены с внутренним энерговыделением и теплообменом, а периферийные фрагменты – это домены только с теплообменом. Отметим, что физической границы раздела между облучаемой и необлучаемой частями в подложках нет, это одна деталь. Виртуальная граница введена для удобства учёта внутреннего

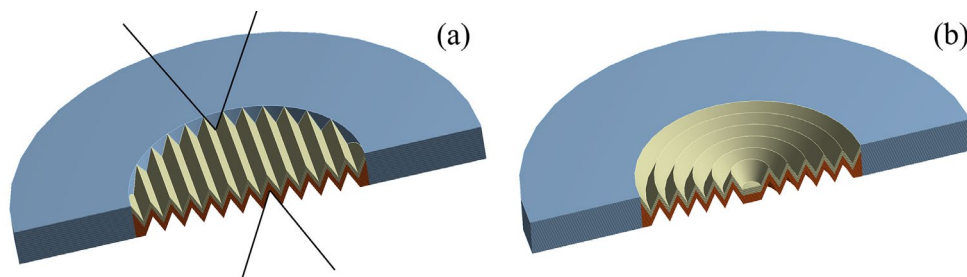


Рис. 1. Сечения (а) ДЛМ и (б) ДАМ плоскостью симметрии. Вспомогательные линии на рисунке ДЛМ демонстрируют углы раскрытия отдельного гофра. Изображен вариант с равными углами раскрытия для мишени и для подложки.

энерговыведения в подложках из-за поглощения энергии пучка.

Достоинство предложенных нами локально-наклонных мишеней в том, что облучать их можно в стандартном мишенном модуле Nirta Solid Compact и иметь при этом выигрыш и по площади охлаждения, и по толщине, как и на соответствующих эллиптических «глобально-наклонных» мишенях, нуждающихся в более сложных мишенных модулях [10].

Кроме ниобия в качестве материала для подложки мы рассматривали также титан и медь. Как и ожидалось, теплопроводность материала подложки существенно влияет на тепловые характеристики локально-наклонных мишеней. Поскольку ниобий из трёх перечисленных материалов имеет промежуточное значение теплопроводности, то в настоящей работе мы решили именно на нём продемонстрировать наиболее типичные особенности ЛНМ. Специфика поведения ЛНМ с подложками из титана и меди заслуживает отдельного рассмотрения.

Взаимное расположение основных компонентов рабочей модели ДЛМ для программы показано на рис.2, где также изображена расчётная сетка модели. Сетка содержит примерно 130 тыс. узлов и 600 тыс. элементов. На рисунке видно, что сетка имеет переменный шаг, который заметно уменьшается в окрестности поверхностей и мелкомасштабных элементов. Особенно явно это видно на гофрах мишени и подложки, а также в прилегающих к ним пограничных слоях гелия и воды.

Изображенная на рис.2 рабочая модель содержит разнородные домены (компоненты) являющиеся твердыми телами (мишень с подложкой, позиции 1 и 6), жидкостью (водой, позиции 7 и 8), и газом (гелием, позиции 2–5). Причем мишень и подложка в процессе облучения неподвижны, а вода и гелий находятся в движении. Рис.2 достаточно полно представляет модель в статичном состоянии, однако гидродинамические аспекты поведения модели в рабочем состоянии на

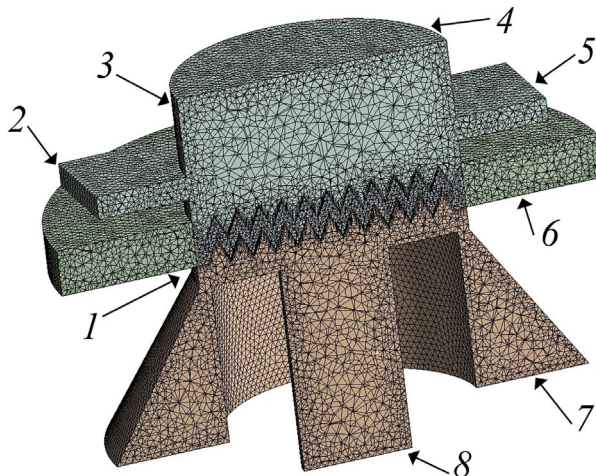


Рис.2. Центральное сечение рабочей модели ДЛМ плоскостью симметрии. Отображено взаимное расположение компонентов модели и расчётная сетка: 1 – мишень и облучаемая часть подложки (на рисунке видны, как зигзагообразная полоса); 2 – вход потока гелия; 3 – гелиевая камера; 4 – виртуальная граница гелиевой камеры; 5 – выход потока гелия; 6 – необлучаемая часть подложки; 7 – кольцевой коллектор для сбора и отвода отработанного потока воды; 8 – сопло подачи охлаждающей воды.

нем не отображены совсем, что может затруднить понимание её теплофизических характеристик.

Гидродинамические и теплофизические аспекты поведения модели ДЛМ иллюстрируются рис.3, где основные домены (компоненты) представлены в активном состоянии – вода и гелий в движении, а мишень и облучаемая часть подложки генерируют тепло; рис.3а – установившееся распределение температуры мишени и подложки на фоне потоков воды и гелия в плоскости центрального сечения модели плоскостью симметрии, показанной на рис.2; рис.3б – эти же величины, но в объеме гелиевой камеры.

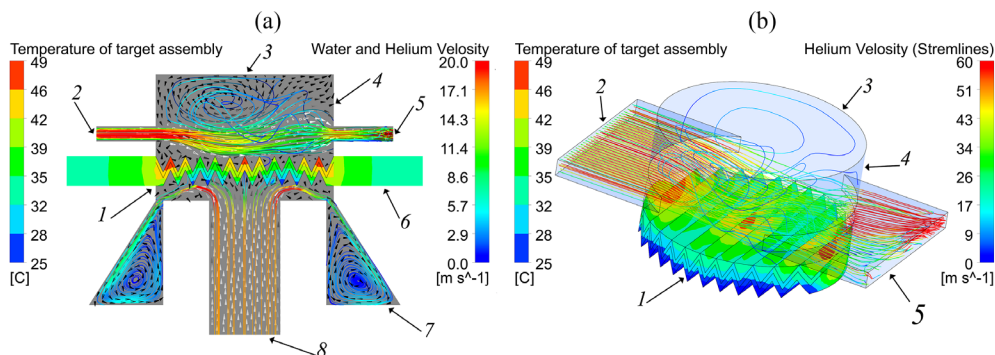


Рис.3. Распределение температуры в мишени и подложке (а) на фоне потоков воды и гелия на плоскости симметрии и (б) на фоне потоков гелия в объеме гелиевой камеры. Обозначения на рис.3 такие же, как и на рис.2. Позиции 6–8 на рис.3б не отображены, чтобы открыть дополнительный обзор облучаемой части подложки.

Обращает на себя внимание отчетливая турбулентность обоих потоков, а также то, что в гелии температура ребер рельефа мишени выше температуры её ближайших участков, а в воде наоборот – ребра подложки холоднее. Отчетливо заметны небольшие застойные зоны в окрестности входа и выхода потока гелия в гелиевую камеру, приводящие к перегреву ребер мишени в указанных местах. Видно также, что в мишенном модуле Nirta Solid Compact вода через сопло подачи 8 падает на центральную область подложки 1 перпендикулярно её поверхности, а затем равномерно растекается в стороны в радиальном направлении к приемному коллектору 7. Вследствие этого вокруг центра неизбежно возникает застойная зона, в которой касательный к поверхности подложки поток воды только формируется от нулевого значения скорости в центре до максимального, расположенного примерно на половине радиуса подложки напротив кромки подающего сопла. Обратный процесс имеет место вблизи наружного диаметра подложки 1. Здесь напротив входа в отводящий коллектор 7 касательная компонента скорости воды снова падает до нуля. Кольцевидная зона повышенной касательной компоненты скорости воды формирует зону повышенной теплопередачи от подложки, что выражается в снижении её температуры в окрестности этой зоны, особенно на ребрах.

При расчётах и анализе результатов мы придерживались следующих подходов: теплофизические характеристики включённых в модель веществ брались из библиотеки программной платформы ANSYS и справочника [11]. Согласно правилам ANSYS, знак теплового потока считался отрицательным, если тело теряет

энергию. Плотность, удельная теплоёмкость и теплопроводность спрессованного порошка молибдена – тела мишени, считались равными 63% от соответствующих значений для металлического молибдена. Это значение было определено нами экспериментально по измерениям плотности спрессованного порошка на специально изготовленных прототипах мишеней и экстраполировано на остальные величины. Максимальный размах гофров для всех вариантов мишеней был выбран равным 2 мм – это, во-первых, не противоречило требованию совместимости по размерам с мишенным модулем Nirta Solid Compact и, во-вторых, давало возможность получить максимально возможное увеличение площади охлаждения за счёт гофрирования. Угол раскрытия гофров α для данной модели с подложкой из ниобия принимался равным примерно 50° .

Расчет проводился при следующих начальных и граничных условиях: температуры зажима, удерживающего подложку мишени, а также воды и гелия на входе в систему охлаждения равны 22°C и во время облучения не меняются. Теплообмен на внешних стенках гелиевой и водяной систем отсутствует. Необлучаемая часть подложки передает тепло в зажим со своей внешней поверхности с постоянным «среднестатистическим» коэффициентом теплопередачи, равным $350 \text{ Вт/К}\times\text{м}^2$. Тепловое сопротивление на всех контактирующих поверхностях равно нулю. Давления гелия и воды на входе в систему охлаждения равны 0.2 и 0.5 Мпа, соответственно. Начальная энергия пучка протонов равна 18 МэВ. Ток пучка протонов равен 10 мкА и равномерно распределён по кругу диаметром 12 мм вокруг центра мишени.

Толщина молибденовой мишени из спрессованного порошка D_{Mo63} была подобрана так, чтобы пучок протонов терял в мишени энергию от 18 до 13.5 МэВ, т.е. всего 4.5 МэВ. При облучении молибдена в указанном диапазоне энергий должен получаться максимальный выход конечного продукта – радиоизотопа технеция [12]. Для определения необходимого численного значения D_{Mo63} с помощью программ SR-NIEL residual particle energy traversing an absorber [13] подбиралось такое значение параметра Traversing Depth, при котором достигалось требуемое ослабление энергии пучка в молибдене. Это значение оказалось равным 0.27 г/см^2 . Далее вычислялась плотность спрессованного порошка молибдена, равная 63% от плотности металлического молибдена, т.е. 6.63 г/см^3 . Толщина D_{Mo63} определялась из полученных чисел по формуле $D_{\text{Mo63}} = 0.27 / 6.63 = 0.04 \text{ см}$. Описанное определение толщины D_{Mo63} было справедливо для СПМ с ортогональным падением пучка протонов на поверхность порошка. В случае наклонного падения пучка на поверхность гофра, как у ДЛМ или ДАМ полученная выше величина 0.04 см должна равняться пути, проходимому пучком протонов при полном пересечении наклонённого порошкового слоя. Физическая толщина спрессованного порошка d_{Mo63} , измеренная перпендикулярно поверхности гофра, в этом случае должна определяться по элементарной формуле $d_{\text{Mo63}} = D_{\text{Mo63}} \sin(\alpha/2)$, где α – это угол раскрытия. Для $\alpha = 50^\circ$ формула приводит к значению $d_{\text{Mo63}} = 0.017 \text{ см}$. Отметим, что последняя формула справедлива и для плоской модели СПМ, где $\alpha = 180^\circ$ и $d_{\text{Mo63}} = D_{\text{Mo63}}$.

Толщина подложки из ниобия D_{Nb} была подобрана так, чтобы пучок протонов полностью терял в ней всю оставшуюся после прохождения мишени энергию, т.е. 13.5 МэВ. В этом случае указанная выше программа давала для величины Traversing Depth значение 0.45 г/см^2 . Принимая во внимание это

значение и то, что плотность ниобия равна 8.57 г/см^3 для D_{Nb} , получалось число $D_{\text{Nb}} = 0.45 / 8.57 = 0.053 \text{ см}$. Физическая толщина ниобия d_{Nb} , измеренная перпендикулярно поверхности гофра, определялась по той же формуле $d_{\text{Nb}} = D_{\text{Nb}} \sin(\alpha/2)$, что приводило к значению $d_{\text{Nb}} = 0.022 \text{ см}$. Это была минимально допустимая толщина, необходимая для полного поглощения остаточной энергии пучка.

Принималось, что в теле мишени – спрессованном порошке, при прохождении пучка протонов выделяется тепловая энергия с мощностью 45 Вт ($45 \text{ Вт} = 10 \text{ мкА} \times 4.5 \text{ МэВ}$). Аналогично, в облучаемой части подложки – гофрированном фрагменте, выделяется тепловая энергия с мощностью 135 Вт ($135 \text{ Вт} = 10 \text{ мкА} \times 13.5 \text{ МэВ}$). Суммарное тепловыделение в мишени и подложке при токе пучка 10 мкА принималось равным сумме указанных величин и равным $(45 + 135) \text{ Вт} = 180 \text{ Вт}$.

Угол раскрытия гофров $\alpha \sim 50^\circ$ позволил получить удобную для практической реализации модель. Из геометрического рассмотрения структуры гофров видно, что площадь охлаждения ЛНМ с углом раскрытия α возрастает по сравнению с СПМ на коэффициент $k_S = 1/\sin(\alpha/2)$. При $\alpha = 50^\circ$ для указанного геометрического коэффициента «усиления» площади получается значение $k_S = 2.37$. Во столько же раз уменьшается толщина мишени.

При анализе результатов учитывался тот факт, что при конвективной теплопередаче от твердой поверхности к воде существует критический поток тепла, при превышении которого теплопередача резко ухудшается [14].

3. Результаты моделирования и обсуждение полученных результатов

В контексте поставленной задачи – представления концепции локально-наклонных мишеней, мы остановились на описании и анализе трёх наиболее характерных, на наш взгляд, величин, таких, как: интегральные тепловые потоки от мишеней в гелий и от подложек в воду (внешний теплообмен), тепловые потоки от мишеней к подложкам и обратно (внутренний теплообмен) и на распределении установившихся температур в мишенях и подложках.

Мы ограничились представлением результатов только для модели с равномерным «нейтральным» распределением тока пучка по поверхности мишеней, поскольку распределение плотности тока в пучке само по себе является независимым фактором влияния на тепловые характеристики мишеней [3, 15]. Таким выбором модели для расчётов мы стремились сосредоточиться на роли именно «локальной наклонности» в тепловых характеристиках предложенных мишеней.

3.1. Интегральные тепловые потоки в гелий и воду

В качестве отправной точки для анализа мы исходили из того факта, что в теле мишени выделяется 45 Вт тепловой мощности, а в облучаемой части подложки – 135 Вт. Каналов рассеяния этой мощности всего три по числу поверхностей, охватывающих область энерговыделения – гофры мишени и подложки. Это поток тепла непосредственно в гелий через поверхность мишени, поток тепла непосредственно в воду через поверхность подложки и потоки в боковые стороны – в необлучаемую часть подложки, через неё в зажим (на рисунках не показан) и далее снова в воду. Ясно, что внутренние перетоки тепла между

мишенью и подложкой на внешний баланс тепла не влияют. Результаты расчёта представлены в табл.1, где приведены численные значения физических величин HF_{int} [Вт] – интегралов плотности теплового потока из мишени или подложки по соответствующим поверхностям. Для наглядности, в отдельной строке значения этих же величин представлены в относительной форме, в процентах по отношению к полному энерговыделению, равному 180 Вт. Из приведенных чисел видно, что тепловые потоки непосредственно в гелий и воду доминируют по сравнению с потоками в зажим – держатель мишени. Анализом последнего теплоотода в данном рассмотрении заниматься не будем ввиду его малости. В таблице сохранен подход программы к определению знака теплового потока – он считается отрицательным, если тело теряет энергию.

Обращает на себя внимание, что в СПМ из 45 Вт, выделяющихся в мишени, всего около 6 Вт непосредственно снимаются потоком гелия. Остальное тепло через подложку и зажим перетекает в воду, что отчётливо отражается в числах:

Табл.1. Интегральный тепловой поток HF_{int} [Вт] из мишени в гелий и из облучаемого участка подложки в воду для различных вариантов ЛНМ

Направление теплового потока	СПМ			ДАМ			ДЛМ Поток гелия поперек гофров			ДЛМ Течение гелия вдоль гофров		
	Из мишени в гелий	Из подложки в воду	В зажим	Из мишени в гелий	Из подложка в	В зажим	Из мишени в гелий	Из подложки в воду	В зажим	Из мишени в гелий	Из подложка в	В зажим
HF_{int} [Вт]	-6.07	-169.99	-3.94	-17.66	-158.71	-3.63	-11.10	-162.79	-6.11	-9.54	-164.39	-6.07
% от 180 Вт	3.37	94.44	2.19	9.81	88.17	2.02	6.16	90.44	3.39	5.30	91.33	3.37

для ДЛМ и ДАМ поток тепла в воду непосредственно через поверхность подложки равен примерно 160 Вт, что заметно больше 135 Вт, выделяющихся непосредственно в самой подложке.

Во всех рассмотренных вариантах ЛНМ теплопередача в гелий существенно больше, чем в СПМ. В ДАМ, например, она достигает 17.66 Вт, т.е. увеличивается практически в три раза. Отметим, что прирост площади теплообмена при переходе от СПМ к любой другой ЛНМ в анализируемой модели происходит в k_s раз, т.е. всего в 2.37 раза. Одной из очевидных причин «опережающего» роста теплопередачи в гелий может быть то, что гофры в ЛНМ играют роль весьма

эффективного завихрителя потока, улучшающего теплоотдачу к гелию за счёт создания турбулентности (см. рис.3).

Кроме турбулентности могут быть и другие менее очевидные причины для роста теплопередачи в гелий, одна из которых будет рассмотрена ниже. Но, в любом случае можно однозначно утверждать, что роль теплоотвода от мишени через поток гелия во всех ЛНМ существенно возрастает по сравнению с СПМ.

3.2. Распределение плотности тепловых потоков на охлаждаемых поверхностях мишени и подложки

Распределение плотности тепловых потоков на охлаждаемых поверхностях мишени и подложки показано на рис.4–6, где соблюден заложенный в программу подход к определению знака теплового потока – он считается отрицательным,

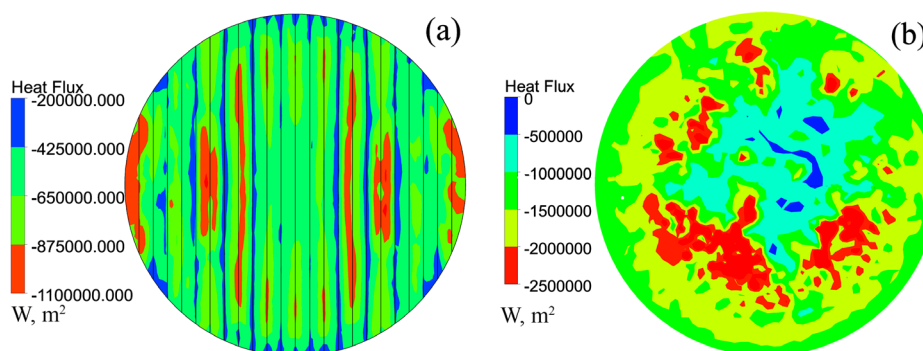


Рис.4. Плотность теплового потока через поверхность подложки в воду для (а) ДЛМ и для (б) СПМ. На рис.4а гофры расположены вертикально так, что через центр проходит долина рельефа подложки. Далее хребты и долины чередуются. Видны зоны пониженной плотности теплового потока вокруг центров и на периферии у обеих подложек. Из приведенных на рис.4а данных видно, что поперечное обтекание гофров водой (направление влево–вправо от центра) обеспечивает большую теплопередачу от подложки, чем продольное (направление вверх–вниз от центра).

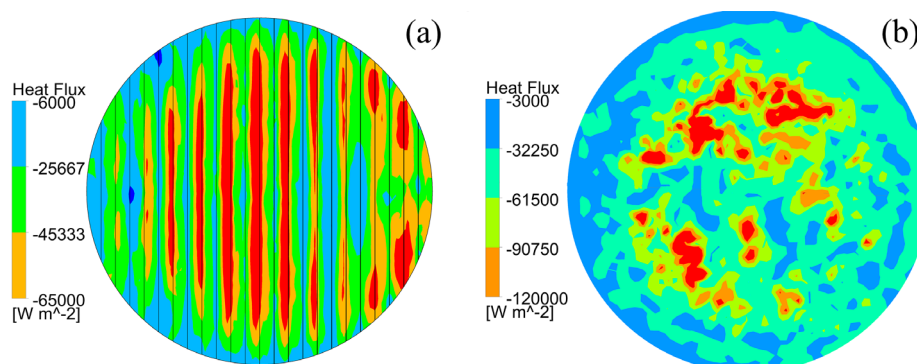


Рис.5. Плотность теплового потока через поверхность мишени в гелий для (а)ДЛМ и для (б) СПМ. На рис.5а гофры расположены вертикально так, что через центр проходит хребет рельефа мишени. На рис.5а имеет место поперечное обтекание гофров гелием, благодаря чему поток гелия равномерно распределяется над поверхностью мишени и обеспечивает её весьма однородное охлаждение.

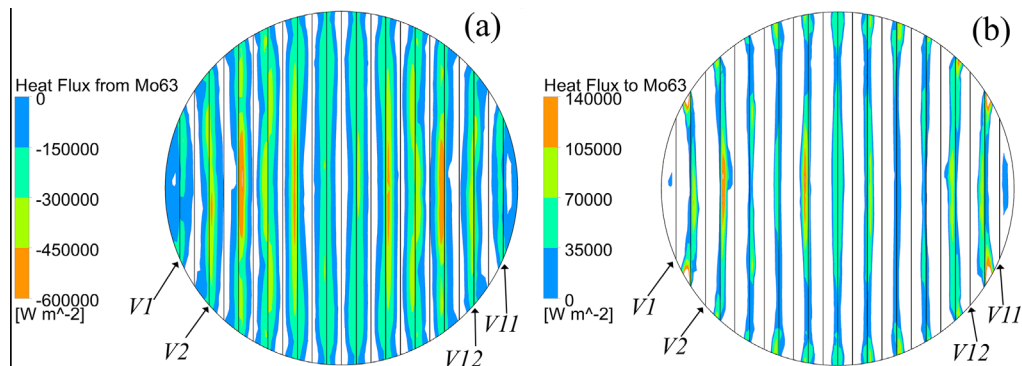


Рис.6. Тепловые потоки из (а) мишени в подложку и из (b) подложки в мишень для ДЛМ. В программе включён режим отображения Clip to Range. Это привело к тому, что на рисунках отобразились величины только из диапазонов, указанных на соответствующих шкалах: на рис.6а только отрицательные, на рис.6б – только положительные. Символами $V1$, $V2$ и $V11$, $V12$ обозначено положение двух первых и двух последних долин на рельефе мишени.

если тело теряет энергию. Для сохранения естественности восприятия некоторых рисунков шкалы для плотности тепловых потоков Heat Flux слева от изображений инвертированы. На всех рисунках поток гелия направлен слева направо.

Для удобства последующего описания тепловых свойств мишеней с гофрированным рельефом введём условные термины «долина» и «хребет» по ассоциации с горным рельефом. Согласно этой терминологии, пересечения вспомогательных линий на рис.1а расположены в долинах рельефов мишени и подложки. В контексте данной работы долина представляет из себя заглублённый в твёрдое тело гофр, а хребет – выпирающий гофр, окружённый гелием или водой. Гофры подложки и мишени согласованы: под каждым окруженным газобразным гелием хребтом мишени расположена заполненная водой долина подложки.

Для анализа рис.4–5 приведенных выше определений достаточно. Рис.6 более сложный в интерпретации. Чтобы избежать путаницы на рис.6а, б введены вспомогательные метки $V1$, $V2$, и $V11$, $V12$, подсказывающие местоположение двух первых и двух последних долин на рельефе мишени ДЛМ.

Приведенная на рис.4 карта распределения плотности тепловых потоков от ниобиевых подложек в воду показывает, что для обеих моделей максимальные значения плотности потоков группируются в виде широкой круговой зоны, расположенной примерно на половине радиуса, где скорость воды максимальна (см. рис.3а). Плотность теплового потока в воду непосредственно вокруг центра мишени и вблизи её наружного диаметра заметно ниже, чем в указанной зоне.

Причину такого поведения мы видим в фундаментальной зависимости теплопередачи от твердого тела к охлаждающей воде от её скорости: чем выше касательная к поверхности компонента скорости воды, тем больше теплопередача [11]. Отметим, что зона повышенной теплопередачи для ДЛМ на рис.4а сама по себе неоднородна: её участки слева–справа от центра лучше отдают тепло в воду, чем аналогичные участки снизу–сверху. Мы объясняем это тем, что слева–справа от центра подложки имеет место примерно поперечное обтекание гофров

потоком воды, а снизу–сверху от центра вода течет примерно вдоль долин. Из приведенных данных видно, что поперечное обтекание гофров водой обеспечивает большую теплопередачу от подложки, чем продольное.

На рис.6 в режиме Clip to Range отображены внутренние перетоки тепла через поверхность раздела мишени и подложки. На рис.6а отображаются только области с отрицательными значениями теплового потока из мишени в диапазоне, указанном на его шкале. Как видно из рисунка, эти области практически целиком расположились в долинах мишени. Остальная поверхность мишени, в данном случае это склоны и окрестность хребтов, не окрашивается программой. Тепловой поток в окрашенных областях – долинах, отрицателен, а значит направлен из мишени в подложку. Наличие теплового потока из мишени в подложку ожидаемо, исходя из проведенного выше в разделе 3.1 анализа интегральных потоков тепла.

На рис.6б окрашены только области с положительными значениями теплового потока, т.е. области, где мишень принимает тепло от подложки. Видно, что эти области в основном сосредоточены вблизи хребтов мишени.

В терминах «долин» и «хребтов» результаты, изображённые на рис.6 можно сформулировать так: в долинах мишень интенсивно передаёт тепло в воду через подложку, а на хребтах мишень принимает тепло от подложки, увеличивая тепловой поток в гелий. Мы предполагаем, что именно поэтому показанный в табл.1 интегральный поток тепла в гелий для ДЛМ и ДАМ столь высок по сравнению с СПМ, где проблема долин и хребтов полностью отсутствует.

Для оценки эффективности концепции ЛНМ обратимся к табл.2, где приведены максимальные значения плотности теплового потока HF_{\max} [МВт/м²] в

Табл.2. Максимальные значения плотности теплового потока HF_{\max} [МВт/м²] в гелий и воду, а также максимальные температуры t_{\max} [°C] поверхностей мишени и подложки для различных вариантов ЛНМ

Направление теплового потока	СПМ		ДАМ		ДЛМ Поток гелия поперек гофров		ДЛМ Течение гелия вдоль гофров	
	Из мишени в гелий	Из подложки в воду	Из мишени в гелий	Из подложка в воду	Из мишени в гелий	Из подложки в воду	Из мишени в гелий	Из подложка в воду
HF_{\max} , МВт/м ²	-0.123	-1.81	-0.797	-1.34	-0.242	-1.24	-0.188	-1.30
HF_{\max} , %	100	100	649.15	74.44	196.86	68.69	152.81	72.09
t_{\max} , °C	51.27	43.99	41.01	38.48	46.56	43.89	43.61	41.19
k		1		1.34		1.46		1.39

гелий и воду, а также максимальные температуры t_{\max} [°C] поверхностей мишени и подложки для различных вариантов ЛНМ. Знак минус в строке HF_{\max} [МВт/м²] указывает на исходящее направление теплового потока.

Анализ результатов удобнее проводить, пользуясь строкой с относительными величинами, выраженными в процентах по отношению к соответствующим значениям для СПМ. Из приведенных данных видно, что для потока тепла из мишени в гелий для всех ЛНМ происходит значительный рост относительной величины HF_{\max} . Отметим, что благодаря большим значениям HF_{\max} [МВт/м²] для всех типов ЛНМ перегрева поверхности их мишеней в гелии фактически не происходит. Этот тезис подтверждается данными строки для t_{\max} .

Приведенные в табл.2 значения максимального теплового потока HF_{\max} [МВт/м²] из мишени в гелий носят скорее иллюстративный характер тогда, как подобные значения для потока тепла из подложки в воду имеют определяющее значение для оценки эффективности концепции ЛНМ.

Для максимального значения плотности потока тепла HF_{\max} [МВт/м²] из подложки в воду наблюдается иная картина. При переходе от СПМ к ЛНМ эта величина уменьшается, причём значительно. Числа в строке для коэффициента k в таблице показывают во сколько раз происходит указанное уменьшение. Максимальное уменьшение величины HF_{\max} [МВт/м²] в 1.46 раз наблюдается для ДЛМ с перекрёстным обтеканием гофров гелием.

Этот результат полезнее сформулировать по-другому: одно и то же значение HF_{\max} [МВт/м²] в локально-наклонных мишенях будет достигнуто при токах, в k раз больших, чем соответствующий ток в стандартной плоской мишени. Это утверждение справедливо, поскольку в использованной нами расчётной модели нет нелинейных элементов и величина HF_{\max} [МВт/м²] пропорциональна энерговыделению в мишени. т.е. току пучка протонов.

В табл.2 значения HF_{\max} [Вт/м²] приведены для тока 10 мкА, но с учётом отмеченной пропорциональности они легко пересчитываются на любое другое значение тока.

Коэффициент k в табл.2 и есть количественный показатель эффективности локально-наклонных мишеней по сравнению со стандартными плоскими мишенями. Действительно, в системах с водяным охлаждением существует понятие критического теплового потока HF_{critical} [МВт/м²], при превышении которого, теплопередача от твёрдого тела в воду резко снижается из-за смены режима кипения воды. Величина критического теплового потока зависит от многих параметров, например, таких, как давление воды и скорость её течения, материал поверхности охлаждения, его состояние и ориентация, наличие в воде специальных присадок и т.д. В числовом выражении значения критического теплового потока для воды варьируются в очень широком диапазоне, например, в работе [14] приводятся значения HF_{critical} [МВт/м²] от 1.3 МВт/м² до 35 МВт/м².

Поскольку в использованной нами расчётной схеме концепция критического теплового потока не заложена, то факт существования этой величины мы учитывали «вручную». О необходимости такого учёта говорит то, что уже при токе пучка 10 мкА достигнутые значения HF_{\max} [МВт/м²] для плотности потока тепла в воду попадают в указанный выше диапазон для критических значений HF_{critical} [МВт/м²].

Вычислить реальное значение HF_{critical} [МВт/м²] для конкретной модели, к

сожалению, невозможно. В настоящей работе мы исходим из того, что при каком-то значении тока $i_{critical}$ величина HF_{max} [МВт/м²] достигнет своего предельного значения $HF_{critical}$ [МВт/м²] и произойдёт срыв всего процесса охлаждения. Это и будет предельно допустимым током облучения. Для нас важно, что при любом конкретном значении $HF_{critical}$ [МВт/м²] ток $i_{critical}$ для локально-наклонной мишени будет в k раз больше соответствующего тока для стандартной мишени.

Как видно из табл.2, в предложенной модели значение величины k лежит в пределах 1.34–1.46, что достигает 62% от идеального результата – геометрического коэффициента усиления площади $k_s = 2.37$, и может быть значимо с практической точки зрения.

Итак, максимально допустимый ток $i_{critical}$ для локально-наклонной мишени будет в 1.46 раз больше соответствующего тока для стандартной мишени, что и является техническим обоснованием целесообразности их разработки и применения.

3.3. Распределение установившихся температур на мишени и на подложке

Подробные карты распределения температур на поверхностях обеих мишеней со стороны гелия и воды изображены на рис.7 и 8. Неожиданным оказалось распределение температур для ДЛМ: в гелии температура хребтов рельефа у этой мишени выше температуры склонов (рис.7а), а в воде наоборот – горячее своих склонов долины подложки (рис.8а). Естественным следует признать распределение температур для воды, поскольку хребты в ней холоднее склонов из-за того, что они лучше остальных частей рельефа омываются охлаждающим потоком.

Причина того, что в гелии хребты ДЛМ горячее ближайшего окружения вскрыта выше в разделе 3.2. Там на рис.6б показано, что в окрестности хребтов имеется дополнительный теплоприток в мишень со стороны подложки и поток гелия, по-видимому, не справляется с охлаждением хребтов мишени.

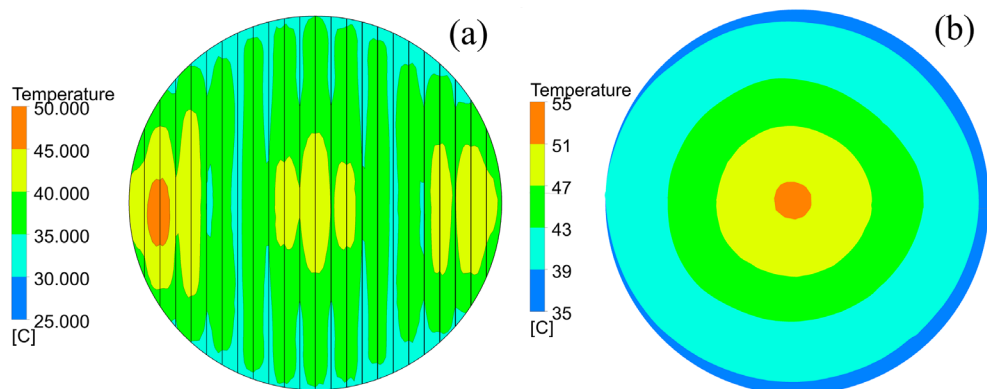


Рис.7. Контуры распределения температуры на поверхности мишени со стороны гелия для (а) ДЛМ и (б) СПМ. Для ДЛМ изображён вариант с поперечным обтеканием гофров гелием. На рис.7а гофры мишени расположены вертикально так, что через центр проходит хребет рельефа и он имеет более высокую температуру, чем его ближайшее окружение. Относительно горячие зоны слева и справа от центра вблизи экватора на рис.7а обусловлены застойными зонами в окрестности входа и выхода потока гелия в гелиевую камеру (см. рис.3).

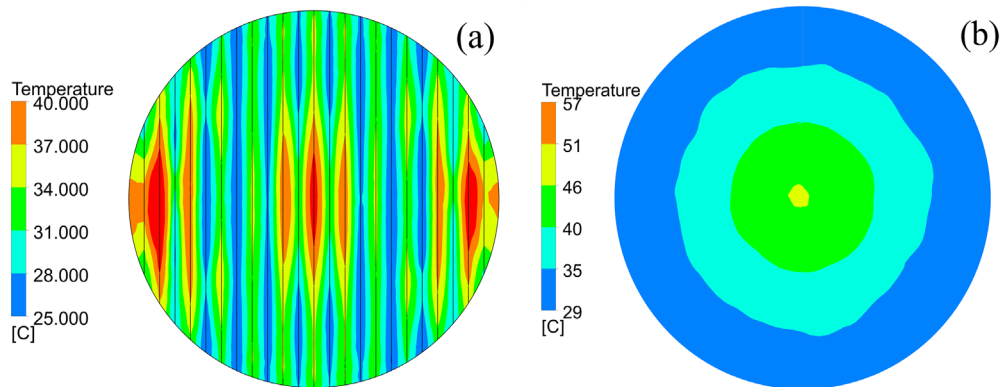


Рис.8. Температура поверхности подложки со стороны воды для (а) ДЛМ и (б) СПМ. Отметим, что на рис.8а проходящий через центр подложки горячий гофр подложки в этой проекции фактически представляет из себя заполненную водой долину – он заглублён в тело подложки, расположен под хребтом мишени и горячее окружения.

Рис.8а необходимо рассматривать одновременно с рис.4а. При этом про- явится явная антикорреляция между величиной плотности теплового потока че- рез поверхность подложки в воду – рис.4а и температурой поверхности подложки со стороны воды – рис.8а: на участках подложки с большими значениями плот- ности теплового потока температура подложки ниже, что довольно естественно. Температура подложки в данной ситуации является величиной производной от теплового потока с её поверхности.

4. Заключение

В работе представлена модель локально-наклонной мишени – ЛНМ, с гоф- рированным рельефом на облучаемой части и рассчитаны её теплофизические характеристики. На примере ЛНМ из спрессованного порошка молибдена с нио- биевой подложкой определены реально достижимые параметры модели, обу- словленные свойствами использованных материалов и требованиями совместимости конструкции модели с существующим мишенным модулем Nirta Solid Compact.

Показано, что, хотя идеальный результат для эффективности локально- наклонной мишени, равный отношению площадей ЛНМ и стандартной мишени, на предложенной модели и не достигается, однако даже достигнутый результат, равный 62% от максимального, может представлять практический интерес. А то, что максимально допустимый ток $i_{critical}$ для локально-наклонной мишени будет в 1.46 раз больше соответствующего предельного тока для стандартной ми- шени, можно считать техническим обоснованием целесообразности разработки ЛНМ.

Более того, это результат для конкретного варианта ЛНМ, возможно, что он может быть улучшен за счет совершенствования конструкции ЛНМ и более тща- тельного подбора материалов. В частности, интересно будет распространить предложенный подход на мишени из гофрированной металлической фольги или на плёночные мишени, напыленные на гофрированную подложку.

Дополнительный выигрыш от использования гофрированных мишеней может проявиться и на этапе химической постобработки. Эти аспекты требуют специального анализа и выходят за рамки численного моделирования тепловых процессов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета по высшему образованию и науке МОНКС РА в рамках научного проекта № 21Т-2G279.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nirta Solid Compact Model TS06 Operating Manual, ELEX COMMERCE, Belgrade, Serbia, 2010.
2. <https://www.elexcomm.com/product/539d84643beb6ec14b00000d>.
3. **G.S. Harutyunyan**. J. Contemp. Phys., **51**, 102 (2016).
4. **K. S. Chun, H. Park, J. Kim**. The 13th International Workshop on Targetry and Target Chemistry, **28**, Proceedings 005, (2011).
5. **H. Thisgaard, M. Jensen, D.R. Elema**. The 13th International Workshop on Targetry and Target Chemistry Proceedings, Abstract 023, 128 (2011).
6. **H. Thisgaard, M. Jensen, D.R. Elema**. Applied Radiation and Isotopes, **69**, 1 (2011).
7. **S. Spellerberg, B. Scholten, I. Spahn, W. Bolten, M. Holzgreve, H.H. Coenen, S.M. Qaim**. Applied Radiation and Isotopes, **104**, 106 (2015).
8. **R. Dallakyan, N. Dobrovolski, A. Melkonyan, I. Sinenko, A. Manukyan, A. Grigoryan**. 18th Workshop on Targetry and Target Chemistry, Abstracts, Whistler, BC, Canada, 54 (2022).
9. <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-Fluent>
10. HighPIT Model PI01 ELEX Commerce, <https://www.elexcomm.com/product/539df10c5a2a548b53000007>.
11. **C.P. Kothandaraman, S. Subramanyan**. Heat and Mass Transfer Data Book, New Delhi: New Age International (P) Ltd., Publishers, 2007.
12. **A. Avetisyan, R. Avagyan, I. Kerobyan, R. Dallakyan, G. Harutyunyan, A. Melkonyan**. EPJ Web of Conferences 93, 08001 (2015), <https://isotope.yerphi.am/articles/epj-conferences.pdf>.
13. Web Calculator for determine the residual spectral fluence or residual energy for a particles traversing a shielding material, <https://www.sr-niel.org/index.php/sr-niel-web-calculators/web-calculator-for-determine-the-residual-spectral-fluence-for-a-particles-traversing-a-shielding-material>.
14. **Y.A. Cengel**. Heat Transfer a Practical Approach. New York: McGraw – Hill, 1997.
15. **M.A. Aginian, A.P. Aprahamian, 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**. J. Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences), **56**, 257 (2021).

NIRTA SOLID COMPACT ԹԻՐԱԽԱՅԻՆ ՄՈՂՈՒԼԻ ՀԱՄԱՐ ԼՈԿԱԼ ԹԵՔ
ԹԻՐԱԽՆՆԵՐԻ ՀՈՎԱՑՄԱՆ ՊՐՈՑԵՍՆԵՐԻ ԹՎԱՅԻՆ ՄՈՂԵԼԱՎՈՐՈՒՄ

Ա. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ, Ռ. ԴԱԼԼԱՔՅԱՆ, Ն. ԴՈԲՐՈՎՈԼՍԿԻ,
Ա. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ, Ա. ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ, Ա. ՄԵԼԿՈՆՅԱՆ, Ի. ՍԻՆԵՆԿՈ

Աշխատանքը նվիրված է բժշկական իզոտոպների արտադրության համար նոր լոկալ թեք տեսակի թիրախների մշակմանը, որոնք կարող են օգտագործվել պրոտոնային մեծ ինտենսիվությամբ փնջերով ճառագայթելիս: Աշխատանքում ներկայացված են ջերմային պրոցեսների թվային մոդելավորման արդյունքները լոկալ թեք թիրախներում, որոնք պատրաստված են մամլված մոլիբդենի փոշուց՝ նիոբիումե հենարանի վրա Nirta Solid Compact Model TS06 թիրախային մոդուլի համար: Հաշվարկներն իրականացվել են ANSYS Workbench 18.2 ծրագրի Fluent Flow (Fluent) ինժեներական փաթեթի միջոցով պրոտոնային ճառագայթման գոտում գծային և առանցքային սիմետրիկ ակնունքով թիրախների տարբերակների համար: Ցույց է տրվել, որ օգտագործելով 2.37 անգամ ավելացած հովացման տարածք ունեցող լոկալ թեք թիրախների տարբեր մոդելներ, հնարավոր է հասնել ճառագայթման հոսանքի 1.34–1.46 անգամ աճի՝ համեմատած ստանդարտ հարթ թիրախի: Կատարվել է թիրախներում ջերմային հոսքերի և ջերմաստիճանների բաշխման վերլուծություն:

NUMERICAL MODELING OF COOLING PROCESSES OF A LOCALLY INCLINED
TARGET WITH A NIRTA SOLID COMPACT TARGET MODULE

A. AVETISYAN, R. DALLAKYAN, N. DOBROVOLSKI, A. GRIGORYAN,
A. MANUKYAN, A. MELKONYAN, I. SINENKO

The work is devoted to the development of locally inclined targets for the production of medical radioisotopes, which can be used for high-intensity proton beam irradiations. The paper presents the results of a numerical analysis of thermal processes in locally inclined targets made of pressed molybdenum powder with a niobium target holder for the Nirta Solid Compact Model TS06 target module. Calculations were carried out using the Fluent Flow (Fluent) engineering package of the ANSYS Workbench 18.2 software platform for variants of targets with linear and axially symmetric grooves in the proton irradiation zone. It has been shown that using various models of locally inclined targets with a cooling area increased by 2.37 times, it is possible to achieve an increase in the irradiation current by 1.34–1.46 times compared to a standard flat target. An analysis of the distribution of heat flows and temperatures in the targets was carried out.