Известия НАН Армении, Физика, т.59, №2, с.131–143 (2024) УДК 621.039.8.002 DOI:10.54503/0002-3035-2024-59.2-131

# ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА ПОДЛОЖКИ НА ПРОЦЕССЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОКАЛЬНО НАКЛОННЫХ МИШЕНЕЙ В МИШЕННОМ МОДУЛЕ NIRTA SOLID COMPACT

# Р. ДАЛЛАКЯН, Н. ДОБРОВОЛЬСКИЙ<sup>\*</sup>, А. ГРИГОРЯН, А. МАНУКЯН, И. СИНЕНКО

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

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

(Поступила в редакцию 24 июня 2024 г.)

Представлены результаты численного моделирования тепловых процессов в локально-наклонных мишенях, изготовленных из прессованного порошка молибдена с подложками из титана и меди. Целью моделирования является оценка пригодности таких мишеней для облучения высокоинтенсивными протонными пучками в мишенном модуле Nirta Solid Compact Model TS06 при производстве медицинского радиоизотопа Tc-99m. Расчеты выполнялись с использованием инженерного пакета Fluid Flow (Fluent) программной платформы ANSYS Workbench на моделях мишеней с аксиально-симметричными гофрами в зоне облучения. Исследования показывают, что локально-наклонные мишени с титановыми и медными подложками позволяют снизить температуру мишеней за счет гофрирования. Кроме того, мишени с медными подложками могут обеспечить увеличение предельного тока облучения в 1.5 раза по сравнению со стандартными плоскими мишенями, что близко к ранее полученным данным для мишеней с подложками из ниобия. На локально-наклонных мишенях с титановыми подложками гофрирование не приводит к практически значимому увеличению предельного тока облучения в связи с низкой теплопроводностью титана.

### 1. Введение

Численное моделирование играет значительную роль в оперативном тестировании новых инженерных решений для производства изотопов на ускорителях [1–7]. В работах [6, 7] нами предложена оригинальная конструкция локальнонаклонной мишени (ЛНМ) и подложки для мишенного модуля Nirta Solid Comрасt [8] и приведены результаты численного моделирования процессов охлаждения для нескольких моделей ЛНМ. Оригинальность этой конструкции заключалась в том, что подверженную облучению плоскую часть стандартной подложки мишени и саму плоскую мишень мы заменили на гофрированные элементы, «локально» наклонённые к пучку протонов. За счёт гофрирования в моделях ЛНМ с подложками из ниобия [7] площадь охлаждения была увеличена в 2.37 раза при полной совместимости по размерам с мишенным модулем. Результат численного анализа тепловых процессов в таких ЛНМ показал, что в них возможно увеличение критического тока в 1.3–1.5 раза по сравнению с критическим током стандартной плоской мишени (СПМ), а основным каналом охлаждения является теплопередача через подложку в охлаждающую воду.

В настоящей работе приводятся результаты аналогичных расчетов для ЛНМ с подложками из титана и меди. Для расчётов отобраны гофрированные с двух сторон модели мишеней с аксиально-симметричными гофрами – двойные аксиально-симметричные мишени (ДАМ). Они обладают высокой симметрией, что сохраняет в моделях специфику «локальной наклонности» и не отвлекает на рассмотрение более специфичных особенностей поведения ЛНМ с линейными гофрами. В остальном авторы придерживаются обозначений и стиля изложения, принятого в работе [7]. Расчеты были проведены с использованием инженерного пакета Fluid Flow (Fluent) программной платформы ANSYS Workbench, что обеспечивает надежную основу для анализа тепловых процессов в ЛНМ с различными материалами подложек.

#### 2. Описание рабочих моделей и расчётной процедуры

С подробным описанием гофрированных с двух сторон моделей ЛНМ, а также с основными техническими подробностями расчетной процедуры можно ознакомиться в работе [7]. В настоящей работе они не изменились. Уточним лишь, что в дальнейшем под термином «мишень» подразумевается слепок из спрессованного порошка молибдена с плотностью 63% от плотности металла (далее Мо63%). Термин «подложка» используется для обозначения облучаемой части держателя мишени, а термин «наружное кольцо» – для необлучаемой. Расчёты проведены в предположении, что пучок протонов имеет начальную энергию 18 МэВ и полностью поглощается в мишени (4.5 МэВ) и подложке (13.5 МэВ). Такое распределение энергий обусловлено тем, что сечение реакции <sup>100</sup>Мо(p, 2n)<sup>99m</sup>Тс, как функция энергии протонов, имеет отчётливый максимум при энергиях около 15-16 МэВ с резким спадом при низких энергиях. Максимальный выход конечного продукта – радиоизотопа технеция <sup>99m</sup>Tc, должен получаться при облучении изотопа молибдена <sup>100</sup>Мо протонами в диапазоне энергий 18-13.5 МэВ [9]. Принималось, что ток пучка равен или 10, или 15.2 мкА и равномерно распределён по поверхности мишени. В статье рассматривается также «упрощённая» мишень с титановой подложкой, гофрированной только со стороны мишени Мо63%. В этой модели обратная сторона подложки оставлена плоской, как в СПМ. Такой вариант мишени в дальнейшем будет называться «Плоско-Гофрированная Мишень» – (ПГМ).

В табл.1 приводится подборка наиболее характерных численных значений, использованных в расчетах и при обсуждении полученных результатов. Теплофизические характеристики входящих в модели веществ взяты из базы данных ANSYS [10] и двух специализированных справочников [11, 12]. Большой разброс в приведенных значениях теплопроводности титана отражает то обстоятельство, что для его производителей теплопроводность является, по-видимому, сопутствующим ненормируемым параметром. В промышленности титан ценится за другие качества – за малый удельный вес, химическую стойкость, технологичность и высокую прочность. Приведенные в табл.1 величины  $D_{\rm Nb}$ ,  $D_{\rm Ti}$ ,  $D_{\rm Mo63\%}$  и  $D_{\rm Cu}$ имеют смысл толщин указанного в нижнем индексе слоя вещества только для

| N⁰ | Физическая  | Вода   | Гелий  | Mo63                                     | Ti    | Ti    | Ti   | Nb   | Cu          |
|----|---|--------|--------|--|-------|-------|------|------|-------------|
| N⁰ | величина  | [10]   | [10]   | % [7]                                    | [10]  | [11]  | [12] | [11] | [10]        |
| 1  | Плотность, кг/м <sup>3</sup>  | 998.2  | 0.162  | 6439                                     | 4850  | 4500  | 4500 | 8570 | 8978        |
| 2  | Теплоёмкость, Дж/кг×К   | 4182   | 5193   | 158                                      | 544   | 611   | 522  | 265  | 381         |
| 3  | Теплопроводность,<br>Вт/м×К   | 0.6    | 0.152  | 77.36                                    | 7.44  | 15.12 | 21.9 | 53.7 | 388         |
| 4  | Толщина слоя Мо63% в<br>СПМ, <i>D</i> мо63% [7], мм   | -      | -      | 0.4                                      | 0.4   | 0.4   | 0.4  | 0.4  | 0.4         |
| 5  | Толщина подложки СПМ,<br><i>D</i> <sub>Nb</sub> , <i>D</i> <sub>Ti</sub> , <i>D</i> <sub>Cu</sub> [7], мм | -      | -      | -  | 0.82  | 0.82  | 0.82 | 0.53 | 0.53        |
| 6  | Угол раскрытия гофра, α<br>[7], ° (градус)  | -      | -      | -  | 65    | 65    | 65   | 50   | 50          |
| 7  | Физическая толщина слоя<br>(гофра)<br>$d_{\text{laver}} = D_{\text{laver}} \sin(\alpha/2)$ , мм           | -      | -      | 0.21 <sub>Ti</sub><br>0.17 <sub>Cu</sub> | 0.44  | 0.44  | 0.44 | 0.22 | 0.22        |
| 8  | Облучаемая площадь в СПМ, мм <sup>2</sup>   | -      | -      | 113                                      | 113   | 113   | 113  | 113  | 113         |
| 9  | Облучаемая площадь в<br>ДАМ, мм <sup>2</sup>  | -      | -      | 216.4                                    | 216.4 | 216.4 | 216  | 266  | 266         |
| 10 | Ток пучка протонов<br>с энергией 18 МэВ, мкА  | -      | -      | 10                                       | 10    | 10    | 10   | 10   | 10,<br>15.2 |
| 11 | Энерговыделение от<br>пучка протонов при токе<br>10 мкА, Вт   | -      | -      | 45                                       | 135   | 135   | 135  | 135  | 135         |
| 12 | Давление/температура<br>воды и гелия на входе,<br>МПа/°С  | 0.5/22 | 0.2/22 | -  | -     | -     | -    | -    | -           |
| 13 | Коэффициент теплопере-<br>дачи от наружного кольца<br>в коллиматор, Вт/К×м <sup>2</sup>                   | -      | -      | -  | 350   | 350   | 350  | 350  | 350         |

Табл.1. Список численных значений использованных в расчетах физических величин

СПМ, где пучок протонов падает ортогонально к поверхности мишени и подложки. Для ДАМ эти величины имеют смысл пути, проходимым пучком протонов при пересечении наклонённого по отношению к нему слоя. Физическая толщина слоя (гофра)  $d_{\text{layer}}$ , измеренная перпендикулярно к его поверхности, определяется формулой  $d_{\text{layer}} = D_{\text{layer}} \sin(\alpha/2)$ , где  $\alpha$  – это угол раскрытия гофра, а нижний индекс «layer» принимает одно из значений «Nb», «Ti», «Mo63%» или «Cu» [7].

### 3. Результаты моделирования и обсуждение полученных результатов

Основные результаты работы представлены на рис.1–4 и в табл.2. На рисунках изображены контуры распределений тепловых потоков и установившихся температур в мишенях с подложками из меди и титана, а в таблице собрана итоговая информация в цифрах. На рис. 1–4 приведены данные для СПМ и ДАМ с подложками из титана и меди, теплофизические характеристики которых взяты из базы данных ANSYS [10]. В табл.2 информация о максимальных значениях

| DOK      | Физические<br>параметры в форматах   | Материал подложки |                  |                  |                  |                  |  |  |
|----------|--|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|--|--|
| NeNe cT] | \$СПМ / \$ДАМ,<br>\$СПМ / \$ПГМ  | Ті [10]<br>(ПГМ)  | Ті [10]<br>(ДАМ) | Ті [11]<br>(ДАМ) | Ті [12]<br>(ДАМ) | Си [10]<br>(ДАМ) |  |  |
| 1        | Максимальная темпе-<br>ратура мишени, °С                                   | 107/110           | 107/74           | 78/56            | 68/50            | 41/35            |  |  |
| 2        | Максимальная темпе-<br>ратура подложки, °С                                 | 64/43             | 64/72            | 45/38            | 44/37            | 40/34            |  |  |
| 3        | Максимальный ТП в<br>гелий от мишени,<br>10 <sup>5</sup> Вт/м <sup>2</sup> | 3.85/4.86         | 3.85/2.95        | 2.75/2.18        | 2.08/1.88        | 0.289/0.166      |  |  |
| 4        | Максимальный ТП в воду от подложки, 10 <sup>6</sup> Вт/м <sup>2</sup>      | 1.28/1.11         | 1.28/1.40        | 1.39/1.43        | 1.44/1.40        | 2.05/1.33        |  |  |
| 5        | Интегральный ТП в<br>гелий от мишени, Вт                                   | 25/43             | 25/27            | 15/18            | 12/14            | 1/1              |  |  |
| 6        | Интегральный ТП в<br>воду от подложки, Вт                                  | 129/108           | 129/143          | 137/151          | 140/154          | 174/165          |  |  |
| 7        | Интегральный ТП в<br>наружное кольцо от<br>мишени, Вт                      | 14/11             | 14/3             | 15/3             | 14/3             | 4/2              |  |  |
| 8        | Интегральный ТП в<br>наружное кольцо от<br>подложки, Вт                    | 12/18             | 12/7             | 13/8             | 14/9             | 1/12             |  |  |
| 9        | Сумма интегральных<br>ТП. Вт   | 180/180           | 180/180          | 180/180          | 180/180          | 180/180          |  |  |

Табл.2. Теплофизические характеристики мишеней и подложек при токе протонов 10 мкА

указанных на рисунках величин дублируется, а также дополнительно приводится аналогичная информация для модели ПГМ и для мишеней с титановыми подложками с теплофизическими характеристиками из двух других источников [11, 12]. В табл.2 также приведены данные об интегральных потоках тепла от мишеней и подложек в воду, гелий и наружное кольцо.

Столбцы в табл.2 расположены в порядке возрастания теплопроводности подложки. В каждой ячейке с результатами расчёта через дробную черту приводится сразу два значения, первое – для СПМ, второе – для ДАМ или ПГМ. Таким образом мы облегчаем сравнение указанных величин. Обозначения «\$СПМ», «\$ДАМ» или «\$ПГМ» следует читать, как «численное значение» анализируемой величины для соответствующих моделей.

Как и в работе [7], основным критерием для целесообразности перехода от СПМ к ЛНМ мы считаем степень уменьшения максимального значения теплового потока из подложки в воду.

### 3.1. Интегральные тепловые потоки в гелий и воду

Вычисленные значения интегральных тепловых потоков (TП) от облучаемых частей мишеней и подложек для всех исследованных вариантов мишеней



Рис.1. Контуры распределения тепловых потоков в воду и гелий для СПМ и ДАМ с титановыми подложками при токе протонов 10 мкА: а – ТП в воду из титановой подложки для СПМ, b – ТП в гелий из мишени Мо63% для СПМ, с – ТП в воду для ДАМ и d – ТП в гелий для ДАМ. На фоне контуров распределения тепловых потоков изображены также сечения водяной и гелиевой полостей плоскостью симметрии с полученными расчётным путём соответствующими векторами тока. Поток гелия задает выделенное направление от входа в гелиевую полость к выходу из неё, нарушая тем самым аксиальную симметрию гелиевой части модели. Поток гелия определяет показанную на рис.b и d ориентацию секущей плоскости. Поток воды аксиально симметричен и не накладывает дополнительных ограничений на ориентацию секущей плоскости.

приведены в табл.2 с распределением этой мощности по трём возможным каналам рассеяния: непосредственно в гелий через гофрированную поверхность мишени, непосредственно в воду через гофрированную поверхность подложки и в наружное кольцо по наружным кромкам мишени и подложки. Строка 9 табл.2 является контрольной, это сумма указанных в строках 5–8 величин.

Приведенные числа указывают на тенденцию к увеличению доли интегрального ТП в воду по мере роста теплопроводности материала подложки. Для интегрального ТП в гелий наблюдается обратная тенденция. При переходе от всех типов титановых подложек к медным отмеченные тенденции сохраняются и даже претерпевают скачок. Для такого скачка мы видим, как минимум, две причины. Во-первых, это многократно большая теплопроводность меди по сравнению с теплопроводностью титана и, во-вторых, меньшая толщина медной подложки  $D_{\rm Cu}$  и соответствующего гофра  $d_{\rm layer}$  (конкретные числа см. в табл.1). Анализ других приведенных в табл.2 величин будем проводить по мере рассмотрения рисунков, на которых эти величины наглядно представлены в виде оцифрованных контуров.

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

Распределение ТП на охлаждаемых поверхностях мишеней и подложек из титана и меди показано на рис.1–2.

На рис.1 приведены контуры распределений ТП в воду и гелий для СПМ и ДАМ с титановыми подложками при токе протонов 10 мкА. Векторы тока воды и гелия на плоских сечениях водяной и гелиевой полостей приведены для иллюстрации довольно сложного турбулентного характера обоих охлаждающих потоков с локальными обратными течениями.

При переходе от СПМ к ДАМ с титановой подложкой дополнительная площадь, потенциально пригодная для охлаждения, возрастает в 1.9 раза, это чисто геометрический эффект (исходные числа см. в табл.1). Из цифровых шкал на рис.1 и из чисел в табл.2 вилно, что при переходе от СПМ к ЛАМ максимальное значение TП в воду возрастает на 9% с  $1.28 \times 10^6$  до  $1.40 \times 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>, а аналогичное значение ПП в гелий уменьшается на 23% с  $3.85 \times 10^5$  до  $2.95 \times 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>, что заметно меньше указанного выше геометрического коэффициента 1.9 для прибавки в площади охлаждения. Причину заниженного, да ещё и разнонаправленного, изменения максимальных значений ТП в воду и гелий поясним, анализируя контуры на рис.1с и 1d. На рис. 1с отчётливо видно, что большая часть новой поверхности титановой подложки ДАМ, особенно в окрестности хребтов и прилегающих к ним участков склонов, не участвует в интенсивном теплообмене. Визуальное сопоставление площадей верхних зон между отметками 7 и 8 на указанных рисунках показывает, что площадь интенсивной теплопередачи в воду от ДАМ (1с) даже меньше, чем от СПМ (1а). В целом картина распределения ТП в воду аксиально-симметрична. В структуре ТП от мишени в гелий (1d) отметим лва основных отличия. Во-первых, поток гелия нарушает аксиальную симметрию в структуре ТП, несмотря на наличие такой симметрии в модели. Как это происходит показано на рис. 1b и 1с, где изображены и ТП от мишени, и потоки гелия над мишенью в сечении гелиевой полости плоскостью симметрии. Во-вторых, в интенсивном теплообмене участвует заметная часть новой поверхности с примерно продольным обтеканием гофров потоком гелия. Тепло в гелий на этих участках наиболее интенсивно отдают как раз хребты мишени и прилегающие к ним склоны гофров. Остальная часть поверхности мишени гораздо хуже передаёт тепло в гелий из-за его весьма специфичного течения с застойными зонами и завихрениями. На рис. 1d это зоны между отметками 1 и 6.

Причина разнонаправленной реакции ТП от подложки из титана и от мишени на переход к ДАМ обусловлена резким снижением теплопередачи внутри подложки и в теле мишени при таком переходе. Действительно, при переходе от СПМ к ДАМ происходит ожидаемый рост площади охлаждения водой и гелием, но при этом гофры становятся тоньше в 1.9 раза, чем соответствующий слой в плоской подложке СПМ, и во столько же удлиняется путь для передачи тепла по более тонкому склону гофра в направлении от центра к периферии. Совместное действие двух последних факторов уменьшает внутренние перетоки тепла между долинами и хребтами гофрированного рельефа как в подложке, так и в мишени в  $1.9 \times 1.9 = 3.61$  раза. Подчеркнём, что в данной оценке имеется в виду теплопередача по материалу подложки посредством механизма теплопроводности: толщина теплопроводящего слоя становится меньше, а фактический путь для тепла – во столько же раз больше. В подложке на фоне низкой теплопроводности титана это приводит к сильному ослаблению перераспределения тепла в теле подложки (см. рис.1с). В мишени более высокая теплопроводность Мо63% заметно сглаживает отмеченную проблему с внутренним перераспределением тепла. В мишени Мо63% дополнительная площадь более эффективно участвует в теплопередаче, а в титановой подложке она фактически отстранена от этого изза недостаточной теплопроводности титана. В результате критический ток в ДАМ с титановой подложкой формально должен быть даже ниже критического тока в СПМ на указанные выше 9%. Обращаем внимание на то, что приведенные данные относятся к титану с теплофизическими характеристиками из библиотеки программы ANSYS [10]. У этого варианта титана теплопроводность минимальна (см. табл.1). В табл.2 приведены аналогичные данные по максимальным значениям ТП в воду также для двух других вариантов подложек из титана с большей теплопроводностью [11, 12]. Эти данные не меняют общего вывода: переходить от СПМ к ЛАМ рали символического повышения критического тока, достижимого только на мишенях с подложками из максимально чистого титана [12], с практической точки зрения явно нецелесообразно.

Этот результат побудил нас проанализировать «упрощенный» ПГМ-вариант модели с титановой подложкой, гофрированной вместе с мишенью со стороны контакта с гелием, но плоской со стороны контакта подложки с водой. В такой модели мы стремились устранить проблемы с водяным охлаждением гофрированного рельефа путём отказа от него, сохранив «локальную наклонность» только со стороны мишени.

Как и ожидалось, контуры ТП в ПГМ-модели оказались близкими по характеру к тому, что мы наблюдали на рис.1а для ТП в воду и на рис.1d для ТП в гелий. Сами контуры мы для краткости опускаем. Соответствующие числа в табл. 2 показывают, что максимальное значение ТП в воду для ПГМ при переходе от СПМ уменьшилось с  $1.28 \times 10^6$  до  $1.11 \times 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>, т.е. примерно на 13%. Неожиданным оказалось заметное увеличение максимального значения ТП в гелий с  $3.85 \times 10^5$  до  $4.86 \times 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>, т.е. на 26%. Одновременно при переходе от СПМ к ПГМ интегральный ТП в воду уменьшился с 129 до 108 Вт, т.е. на 21 Вт, а интегральный ТП в гелий при этом вырос на 18 Вт с 25 до 43 Вт т.е. почти на столько же. Баланс тепла при этом не нарушился: недостающие 3 Вт с воды по разным каналам «ушли» в наружное кольцо. Интересно, что дополнительные 18 Вт интегрального теплопритока в гелий (а это 72% от исходных 25 Вт) привели к росту температуры мишени всего лишь на 4°С (конкретные числа см. в табл. 2). Это следствие благоприятного сочетания относительно высокой теплопроводности материала мишени с гофрированием её поверхности.

Уменьшение на 13% максимального значения ТП в воду, а, следовательно, и формальное увеличение критического тока для ПГМ с титановой подложкой, происходящее на фоне практически неизменной температуры мишени, скорее всего не стоит потенциальных трудозатрат на переход от СПМ к ПГМ. Таким образом, ни один из исследованных вариантов ЛНМ с титановой подложкой – ни ДАМ, ни ПГМ, не даёт технологически значимого выигрыша в критическом токе по сравнению с СПМ.

На рис. 2 приведены аналогичные контуры ТП для ЛНМ с медными подложками: для СПМ при токе протонов 10 мкА и для ДАМ при токах 10 и 15.2 мкА. На рис. 2с и 2е отчётливо видно, что в медной подложке ДАМ большая часть новой поверхности участвует в интенсивном теплообмене с водой. В этом главное отличие от того, что наблюдалось на рис.1с для мишеней с титановой подложкой. Причём, наиболее интенсивно отдающие тепло участки поверхности медных гофров расположены как раз вблизи хребтов и на обращённых к центру склонах. Контуры с ТП в воду и гелий при токе протонов 15.2 мкА добавлены на рис.2 чтобы наглядно показать возможность увеличения максимального значения тока протонов в ДАМ с медной подложкой в 1.52 раза по сравнению с аналогичным значением для СПМ при токе 10 мкА. Действительно, при переходе от СПМ к ДАМ максимальное значение ТП в воду от медной подложки при токе



Рис.2. Контуры распределения тепловых потоков в воду и гелий для СПМ и ДАМ с медными подложками: а – ТП в воду из подложки для СПМ; b – ТП в гелий из мишени Мо63% для СПМ; с и е – ТП в воду для ДАМ; d и f – ТП в гелий для ДАМ. Ток протонов на контурах от а до d равен 10 мкА. Ток протонов на контурах е и f равен 15.2 мкА. На контурах с – f отчетливо видно, что дополнительная площадь контакта медной подложки с водой и гелием, образовавшаяся при переходе от СПМ к ДАМ, практически полностью участвует в интенсивном теплообмене как с водой, так и с гелием.

протонов 10 мкА уменьшается в 1.52 раза с 2.05×10<sup>6</sup> (2a) до 1.33×10<sup>6</sup> Вт/м<sup>2</sup> (2c). Особенно важно, что характер теплопередачи в воду и гелий для ДАМ при увеличении тока с 10 до 15.2 мкА практически не изменяется. Таким образом, число 1.52 можно считать «тепловой» эффективностью ДАМ с медной подложкой.

Отметим, что при переходе от СПМ к ДАМ с медной подложкой происходит геометрический прирост площади в 2.4 раза (исходные числа см. в табл.1), что даже больше, чем прирост площади в 1.9 раза для мишеней с титановыми подложками. В случае с медной подложкой коэффициент снижения теплопередачи в материале гофра равен  $2.4 \times 2.4 = 5.76$ , вместо 3.61 для титановой подложки. То, что итоговая теплопередача поперёк гофров в данном случае всё же лучше, чем в случае с титановой подложкой, является следствием теплопроводности меди, которая более, чем в 50 раз превышает теплопроводность титана (точные значения см. в табл.1). В этом заключается главная причина того, что большая часть новой поверхности медной подложки ДАМ участвует в интенсивном теплообмене с водой. На локально-наклонных мишенях с медной подложкой проявилась ещё одна причина для снижения тепловой эффективности гофрированного рельефа – гидродинамическая. Для иллюстрации данного тезиса обратимся к анализу контуров 2с и 2е. На них отчетливо видно, что склоны гофров, обращённые к центру подложки, более интенсивно отдают тепло, чем склоны, обращенные наружу. Противоположные склоны гофров для потока воды оказываются, как бы в «тени» хребтов и хуже передают тепло в воду. Неравноценность поверхности гофров с точки зрения теплопередачи наблюдается и в гелии: лучше всего передают тепло в гелий те участки гофров, где поток гелия движется примерно вдоль них (см. на контуры 2d и 2f), хуже всего – фрагменты гофров в окрестности входа и выхода потока гелия.

Таким образом, снижение «тепловой» эффективности гофрированного рельефа, по сравнению с геометрическим приростом площади охлаждения для предложенных вариантов ЛНМ, неустранимо при существующей системе охлаждения и происходит одновременно по нескольким причинам.

Проведенный анализ проблем с ТП в воду и гелий в рассмотренных вариантах ЛНМ показал, что во всех вариантах ЛНМ с медной подложкой формально можно было бы отказаться от потока гелия в охлаждении мишени за счёт его байпасирования. Действительно, только 1 из 180 Вт рассеивается непосредственно в гелий (см. табл.2). Однако, мы не рекомендуем этого делать, поскольку в системе охлаждения мишенного модуля Nirta Solid Compact Model TS06 гелий является для мишени не только теплоносителем, а ещё и нейтральной газовой средой, причём этот же поток гелия используется также и для охлаждения выходного окна протонного пучка.

#### 3.3. Распределение установившихся температур на мишенях и на подложках

На рис.3 изображены контуры распределения температур мишеней и титановых подложек для СПМ и ДАМ при токе протонов 10 мкА. В СПМ (3b) и в ДАМ (3d) заметна утрата центральной симметрии температурных полей мишени Мо63%, обусловленная сравнительно сильной тепловой связью мишени с потоком гелия: из 45 Вт, выделяющихся в мишени, 25 Вт, т.е. больше половины, рассеивается непосредственно в гелий (см. табл.2). При переходе от СПМ к ДАМ



Рис.3. Контуры распределения температур титановых подложек и мишеней для СПМ и ДАМ при токе протонов 10 мкА: а – температура контактирующей с водой титановой подложки для СПМ, b – температура контактирующей с гелием мишени Мо63% для СПМ, с – температура титановой подложки для ДАМ и d – температура мишени Мо63% для ДАМ. Примечательно, что значительная часть поверхности титановой подложки в воде для ДАМ заметно холоднее, чем для СПМ, хотя небольшой участок с наиболее высокой температурой находится именно на ДАМ.

максимальное значение температуры титановой подложки со стороны воды слегка возрастает с 64 (3a) до  $72^{\circ}$ C (3c). Такое температурное поле на поверхности титановой подложки установилось из-за отмеченной в предыдущем разделе малой теплопроводности титана. Значение максимальной температуры мишени Мо63%, как и ожидалось, уменьшается при переходе от СПМ к ДАМ с 107 (3b) до 74°С (3d), т.е. на 33°С. Причина снижения максимальной температуры Мо63% в ДАМ кроется в совместном влиянии относительно большой теплопроводности материала мишени и дополнительной площади охлаждения в гелии за счёт гофрирования. Отмеченное снижение максимальной температуры мишени может представлять интерес и с технологической точки зрения. На рис.4 изображены контуры распределения температур мишеней и медных подложек для СПМ при токе 10 мкА и ДАМ при токах протонов 10 и 15 мкА. На мишени с медной подложкой специфической асимметрии температурных полей мишени Мо63%, вызванной потоком гелия не наблюдается. Это следствие того, что тепловой режим мишени в данном случае практически полностью определяется хорошо проводящей тепло симметричной медной подложкой: из 45 Вт, выделяющихся в мишени, только 1 Вт рассеивается непосредственно в гелий, остальное тепло идёт в подложку и её наружное кольцо (числа см. в табл.2), которые имеют аксиально-симметричное устройство и такое же охлаждение. При переходе от



Рис.4. Контуры распределения температур медных подложек и мишеней для СПМ и ДАМ: а – температура контактирующей с водой медной подложки для СПМ; b – температура контактирующей с гелием мишени Мо63% для СПМ; с и е – температуры титановых подложек для ДАМ; d и f – температуры мишеней Мо63% для ДАМ. Ток протонов на контурах от а – d равен 10 мкА. Ток протонов на контурах е и f равен 15.2 мкА. Примечательно, что при токе 15.2 мкА температурные поля для ДАМ количественно практически сравниваются с соответствующими температурными полями для СПМ, но при токе 10 мкА. Специфической асимметрии температурных полей мишени Мо63%, вызванной потоком гелия не наблюдается.

СПМ к ДАМ максимальные значения температур медной подложки и мишени Mo63% уменьшаются на 6°С, что является положительным по характеру, но чисто символическим по величине результатом. С практической точки зрения более важно то, что в мишенях с медными подложками максимальные температуры изначально заметно ниже, чем максимальные температуры в любых мишенях с титановыми подложками (исходные числа см. в табл.2). Таким образом, если нет каких-то специфических ограничений на использование мишеней с медными подложками, то лучше использовать именно их – получится двойной выигрыш и по температуре мишени, и по возможности повысить предельный ток облучения.

#### 4. Заключение

Концепция эффективного перехода от стандартных плоских мишеней к локально-наклонным мишеням имеет многоаспектный характер и не ограничивается только коэффициентом геометрического увеличения площади охлаждения в результате такого перехода. Она также зависит от выбранной модели мишени, теплофизических свойств материалов и параметров системы охлаждения. В частности, при переходе от СПМ к ДАМ с медной подложкой происходит геометрический прирост площади в 2.4 раза, однако учёт остальных перечисленных выше факторов приводит к снижению этого «идеального» результата до значения 1.52, что составляет примерно 60% от него. Во всех вариантах ЛНМ с медной подложкой только 1 из 180 Вт рассеивается непосредственно в гелий (см. табл.2). Несмотря на столь малый вклад потока гелия в охлаждение мишени мы рекомендуем сохранить его и для ЛНМ с медной подложкой, поскольку в системе охлаждения мишенного модуля Nirta Solid Compact Model TS06 гелий является для мишени не только теплоносителем, а ещё и нейтральной газовой средой, причём этот же поток гелия используется также для охлаждения выходного окна протонного пучка.

Если говорить об эффективности перехода от стандартных плоских мишеней (СПМ) к локально-наклонным мишеням (ЛНМ) с точки зрения снижения температуры молибденовой мишени при равных условиях, то оба варианта ЛНМ с подложками из титана и меди можно формально признать эффективными. Однако, в мишенях с медными подложками максимальные температуры изначально заметно ниже. Поэтому, если нет специфических ограничений на использование мишеней с медными подложками, то предпочтительнее использовать именно их. Более того, если рассматривать только снижение температуры мишени, то с практической точки зрения переход от стандартных плоских мишеней к ЛНМ с медными подложками может быть необязательным, так как выигрыш в температуре мишени будет символическим – всего лишь 6°С.

Если под эффективностью перехода от СПМ к ЛНМ понимать возможность повышения допустимого значения тока облучения – критического тока, то мишени с медными подложками демонстрируют лучшие результаты. На таких мишенях возможно увеличение предельного тока облучения в 1.52 раза по сравнению со стандартными плоскими мишенями, что сопоставимо с результатами для мишеней с подложками из ниобия. Этот результат является техническим обоснованием для разработки ЛНМ с подложками из меди и ниобия. В то же время, на локально-наклонных мишенях с подложками из титана увеличения предельного тока облучения за счет гофрирования практически не происходит из-за низкой теплопроводности титана.

Приведены результаты для нескольких конкретных вариантов локальнонаклонных мишеней. Они могут быть улучшены за счет дальнейшего совершенствования конструкции ЛНМ и более тщательного подбора материалов. Особый интерес представляет расширение предложенного подхода на мишени с неравносторонними гофрами, где будет максимально увеличена площадь поверхности обращённых к потоку воды склонов, а также на локально-наклонные мишени из никеля, нанесённого на гофрированную подложку из ниобия методом электрохимического осаждения или вакуумного напыления.

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

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. M.A. Rovais, K. Yousefi, K. Ardaneh, M. Mirzaii. Nukleonika, 56(4), 283 (2011).
- 2. H. Khalafi, A.T. Khotbeh-Sara, F. Rahmani, M.M. Kejani, F. Ghasemi. 29th Linear Accelerator Conf. LINAC2018, JACoW Publishing, Beijing China, p. 148, 2018.
- 3. S.J.C. do Carmo, P.M. de Oliveira, F. Alves. Appl. Sci., 11, 10922, (2021).
- G. Asova, N. Goutev, D. Tonev, A. Artinyan. Journal of Physics: Conf. Series, 1023, 012008, (2018).
- S.C. Mun, G.C. Kang, C.M. Kang, J.Y. Kim, K.C. Lee, S. Y. Oh. Nuclear Engineering and Technology, 56, 3268 (2024). DOI: https://doi.org/10.1016/j.net.2024.03.027.
- 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.
- 7. А. Аветисян, Р. Даллакян, Н. Добровольский, А. Григорян, А. Манукян, А. Мелконян, И. Синенко. Известия НАН Армении, Физика, 59, 3 (2024).
- 8. Nirta Solid Compact Model TS06 Operating Manual, ELEX COMMERCE, Belgrade, Serbia, 2010.
- 9. 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.
- 10. ANSYS Fluent, https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent.
- 11. Y.A. Cengel. Heat Transfer a Practical Approach. New York: McGraw-Hill, 1997.
- 12. C.P. Kothandaraman, S. Subramanyan. Heat and Mass Transfer Data Book. New Delhi: New Age International (P) Ltd., Publishers, 2007.

# INFLUENCE OF THE TARGET HOLDER MATERIAL ON THE COOLING PROCESSES OF LOCALLY INCLINED TARGETS IN THE NIRTA SOLID COMPACT TARGET MODULE

## R. DALLAKYAN, N. DOBROVOLSKI, A. GRIGORYAN, A. MANUKYAN, I. SINENKO

The results of numerical modeling of thermal processes in locally inclined targets made of pressed molybdenum powder with holders of titanium and copper are presented. The simulation was conducted to determine the suitability of such targets for irradiation with highintensity proton beams in the "Nirta Solid Compact Model TS06" target module for producing the medical radioisotope Tc-99m. Calculations were carried out using the Fluid Flow (Fluent) engineering package of the ANSYS Workbench 18.2 software platform on models of targets with axially symmetric corrugations in the irradiation zone. It is shown that the target temperature decreases on locally inclined targets with titanium and copper holders due to corrugation. On targets with copper holders, it is also possible to increase the maximum irradiation current by 1.5 times compared to standard flat targets, comparable with previously obtained results for targets with niobium holders. It has been established that on locally inclined targets with titanium holders, corrugation does not provide a practically significant increase in the maximum irradiation current due to the low thermal conductivity of titanium.