



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**
Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

Препринт 2019–10

М.А. Маслов, А.Д. Рябов, Н.В. Сквороднев, А.П. Солдатов

**Входное окно мишенной станции
для наработки медицинских радионуклидов**

Направлено в *ПТЭ*

Протвино 2019

Аннотация

Маслов М.А., Рябов А.Д., Сквороднев Н.В., Солдатов А.П.. Входное окно мишенной станции для наработки медицинских радионуклидов: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2019–10. – Протвино, 2019. – 14 с., 8 рис., 2 табл., библиогр.: 12.

Представлена конструкция входного вакуумного окна, разработанного и изготовленного в рамках реализации проекта мишенной станции для наработки медицинских радионуклидов. Приведены расчетные данные температурных полей и термомеханических напряжений в элементах окна, а также данные по напряженно-деформированному состоянию окна под действием совокупной нагрузки (давление плюс неравномерный нагрев). Особое внимание уделено численному моделированию охлаждения окна недогретыми потоками воды. Оценено «время жизни» окна, обусловленное радиационными повреждениями материала окна. Учитывая высокие уровни энерговыделения и наведенной активности, инициированные протонами в окне, а также достаточно частую его замену, сплав АМгб выбран в качестве материала окна.

Abstract

Maslov M.A., Ryabov A.D., Skvorodnev N.V., Soldatov A.P. The input window of the target station for development of medical radionuclides: NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2019–10. – Protvino, 2019. – p. 14, fig. 8, tables 2, refs.: 12.

The design of the inlet vacuum window developed and manufactured in the framework of the project of the target station for the development of medical radionuclides is presented. The calculated data of temperature fields and thermomechanical stresses in the window elements, as well as data on the stress-strain state of the window under the action of the total load (pressure plus uneven heating) are given. Special attention is paid to numerical simulation of window cooling by underheated water flows. The “lifetime” of the window caused by radiation damage to the window material is estimated. Given the high levels of energy release and induced activity initiated by protons in the window, as well as its frequent replacement, AMg6 alloy is chosen as the window material.

Введение¹

Одним из направлений развития современной практической медицины является применение искусственно полученных радионуклидов для диагностики и лечения заболеваний в кардиологии и онкологии. Такие радионуклиды получают либо в ядерных реакторах, либо с использованием высокоинтенсивных протонных пучков. В последнем случае пучок протонов направляется на мишени, установленные в мишенной станции (МС). В проектируемом комплексе планируется использовать протонные пучки с энергией 70 МэВ и интенсивностью до 375 мкА [1,2].

Элементы мишенной станции подвергаются радиационному облучению в ходе наработки целевых радионуклидов, и наиболее сильному воздействию при этом подвергается окно мишенной станций, отделяющее вакуум каналов транспортировки пучков частиц от находящихся внутри станции охлаждаемых водой мишеней. Уровни энерговыделения при вышеуказанных параметрах пучка таковы, что требуется эффективное охлаждение мембраны окна. Проблема при разработке окна МС во многом схожа с аналогичной проблемой при проектировании и эксплуатации установок для дожигания долгоживущих радиоактивных изотопов в отработанном ядерном топливе, а также для источников нейтронного излучения. Используемые материалы для изготовления окон: алюминиевые сплавы AL5083 [3], AL6061 [4] (российские аналоги – АМг4,5 и АД33 соответственно); Inconel718 [5]; сплав меди с алюминием типа GlidCop AL-15 [5] (основа – Al_2O_3); сплавы типа Ti-Al-V, V-Cr-Ni.

Продольная плотность энерговыделения в мембране окна (материал – АМг4,5; пучок – энергия 70 МэВ, ток 375 мкА), рассчитанное с помощью программы SRIM [6], составляет $(dE/dz) = 750$ Вт/мм. Для сплава Inconel718 эта величина примерно в три раза выше.

¹ Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения о предоставлении субсидии от «27» июня 2019 г. №075.15.2019.1393, идентификатор Соглашения RFMEFI60717X0193 (ПНИЭР «Разработка инновационной технологии производства в промышленных объемах медицинского изотопа стронция-82, необходимого для осуществления диагностики методом позитронно-эмиссионной томографии различных кардиологических заболеваний»).

Мощность дозы остаточного излучения, обусловленная наведенной активностью, для окна из сплава Inconel718, в десятки раз выше, чем для окна из сплава типа АМг [2]. Учитывая достаточно частую замену окна, для его изготовления выбран сплав АМг6, как обладающий лучшими механическими характеристиками по сравнению с другими сплавами АМг.

Конструкция окна мишенной станции

Окно мишенной станции, выточенное из целиковой заготовки (алюминиевый сплав АМГ6), изображено на рисунке 1. Наиболее нагруженной частью окна является плоская тонкая мембрана, которая подвергается воздействию давления со стороны потока охлаждающей жидкости, текущей в узкой щели (ширина щели $\sim 3 \div 5$ мм) между мишенью и мембраной. Максимальное давление оценивается в $P_0 = 1.7$ бар, температура ядра потока жидкости принята равной $t_0 = 30^\circ\text{C}$.

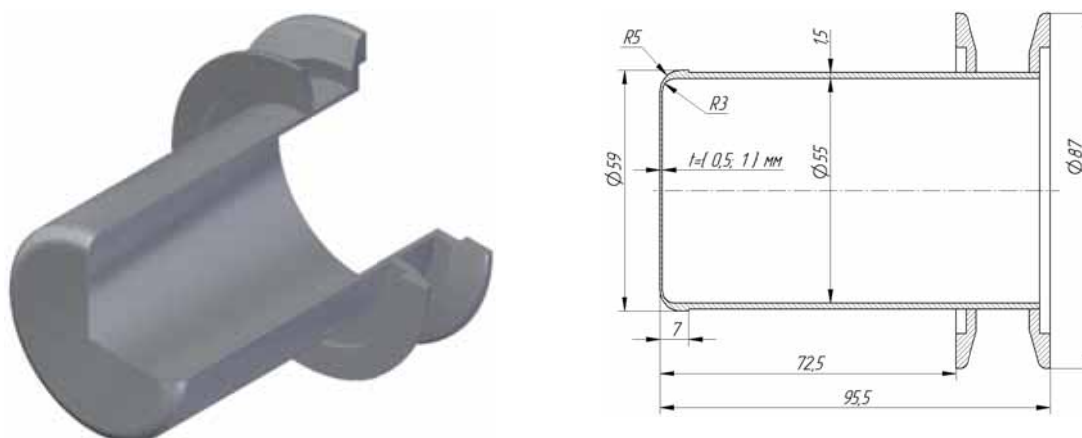


Рис. 1. 3D модель оконного блока типа "стакан" с элементами крепления (слева); вертикальный разрез оконного блока с указанием размеров (справа).

Исходные данные

Пучок, падающий на мембрану, имеет осесимметричный профиль. Следовательно, распределение плотности тепловых потерь в материале окна будет также осесимметричным. При максимальном токе пучка 375 мкА продольная плотность тепловыделения постоянна (из-за тонкости мембраны) и равна $(dE/dz) = 750$ Вт/мм.

Распределение плотности объемного тепловыделения в мембране задается формулой:

$$\varepsilon(r; R_s) = \frac{(dE/dz)}{2\pi\sigma^2} \varepsilon_r(r; R_s) \quad , \quad \text{где} \quad (1)$$

$$\varepsilon_r(r; R_s) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \exp \left[-\frac{r^2 + R_s^2 - 2rR_s \cos \theta}{2\sigma^2} \right] d\theta \quad (2)$$

– безразмерная функция, в которой: σ – поперечная дисперсия исходного протонного пучка, R_s – радиус развертки пучка.

Расчеты проводились для двух толщин мембраны: $h = 0.5$ и 1.0 мм (диаметр мембраны равен 55 мм); и для двух различных протонных пучков: для центрального пучка с параметрами $\{\sigma = 10$ мм, $R_s = 0$ мм}, и для пучка с разверткой по радиусу $\{\sigma = 5$ мм, $R_s = 15$ мм}.

Как говорилось выше, мембрана охлаждается недогретой водой (температура ядра потока $t_0 = 30^\circ\text{C}$), находящейся под давлением $P_0 = 1.7$ бар. В модели охлаждения поверхности мембраны полагалось, что при температуре стенки мембраны ниже температуры кипения жидкости t_b (равна 115°C при давлении 1.7 бар) теплоотвод осуществляется посредством стандартного закона теплообмена, задаваемого условием 3-го рода $q = \alpha_0(t_s - t_0)$, где локальный коэффициент теплоотдачи α_0 в общем случае является функцией температуры стенки t_s , температуры ядра потока t_0 , локальной скорости потока и физических свойств жидкости. В настоящей работе коэффициент теплоотдачи α_0 полагался постоянной величиной, равной $\alpha_0 = 0.4$ Вт/(см²°C) – характерное значение для ламинарного потока, и $\alpha_0 = 1.0$ Вт/(см²°C) – для турбулентного.

Таким образом, всего было рассчитано 8 вариантов, отличающихся параметрами $h, \{\sigma, R_s\}, \alpha_0$.

Методика моделирования теплообмена при пузырьковом кипении в программе ANSYS

При заданных тепловых нагрузках часть мембраны может иметь температуру выше температуры кипения воды, и на такой поверхности реализуется режим пузырькового кипения, экспериментально изученный в области *развитого (advanced)* кипения. Для области развитого пузырькового кипения плотность потока тепла с охлаждаемой поверхностью может быть представлена как [7,8]:

$$\Delta q = C(P_0) \cdot (t_a - t_b)^3 \quad [\text{Вт/м}^2] \quad (3)$$

где в размерном коэффициенте $C(P_0) = \left(\frac{3.4 \cdot P_0^{0.18}}{1 - 0.0045 \cdot P_0} \right)^3$ давление потока охлаждающей жидкости выражается в *барах*, t_a – температура поверхности при развитом пузырьковом кипении, $\Delta q = q(t_a) - \alpha_0(t_b - t_0)$ – разность между общей теплоотдачей и теплоотдачей за счет конвективного теплообмена.

Для части охлаждаемой поверхности с температурой поверхности t_s ниже температуры кипения t_b используется обычный закон конвекции

$$q = \alpha_0(t_s - t_0) \quad (4)$$

Теплообмен во всем диапазоне температур стенки (вплоть до температуры плавления) опишем единым *квази-конвективным* законом:

$$q(t_s) = \alpha_c(t_s, \{t_0, P_0, \alpha_0\}) \cdot (t_s - t_0) \quad (5)$$

где $\alpha_c(t_s, \{t_0, P_0, \alpha_0\})$ – переменный коэффициент теплоотдачи – есть функция температуры стенки t_s и параметров модели $\{t_0, P_0, \alpha_0\}$.

В работе [9] предложена формула, гладко сопрягающая область обычной конвекции ($t_b > t_s \geq t_0$) с областью развитого пузырькового кипения ($t_s \cong t_a$):

$$\frac{t_s - t_b}{t_a - t_b} = \left[1 + \left(\frac{t_a - t_b}{\Delta q / \alpha_0} \right)^{3/2} \right]^{-2/3} \quad (6)$$

В работах [8,9] приведены экспериментальные данные, показывающие, что при $\frac{\Delta q}{\alpha_0(t_a - t_b)} > 3$ имеет место развитый режим кипения, и можно считать $t_s \cong t_a$.

Предлагается следующий алгоритм табличного построения функции $\alpha_c(t_s)$ в виде точек $\{t_s, \alpha_c\}$ во всем возможном диапазоне температур охлаждаемой стенки:

- Запасаем в таблицу две известные точки $\{t_0, \alpha_0\}$ и $\{t_b, \alpha_0\}$;
- затем для каждого значения t_a ($t_a > t_b$) из упорядоченного по возрастанию множества $\{t_a\}$
 - 1) вычисляем Δq по формуле (3);
 - 2) вычисляем температуру стенки t_s по формуле (6);
 - 3) вычисляем полную плотность потока $q(t_s) = \Delta q + \alpha_0(t_b - t_0)$;
 - 4) вычисляем среднее значение коэффициента теплоотдачи α_c согласно формуле (5);

5) запасаем точку $\{t_s, \alpha_c\}$ в таблицу.

Построенная таким образом таблица сохраняется в текстовом файле, который в дальнейшем считывается программой ANSYS [10], и используется при решении тепловой задачи для задания переменного коэффициента теплоотдачи на конвективной границе охлаждения окна.

Построенная по описанному алгоритму функция $\alpha_c(t_s)$ и плотность потока тепла $q(t_s) = \alpha_c(t_s) \cdot (t_s - t_0)$ при значениях параметров $t_0 = 30^\circ\text{C}$, $P_0 = 1.7$ бар, $\alpha_0 = 0.4$ Вт/(см²°C) показаны на рисунке 2.

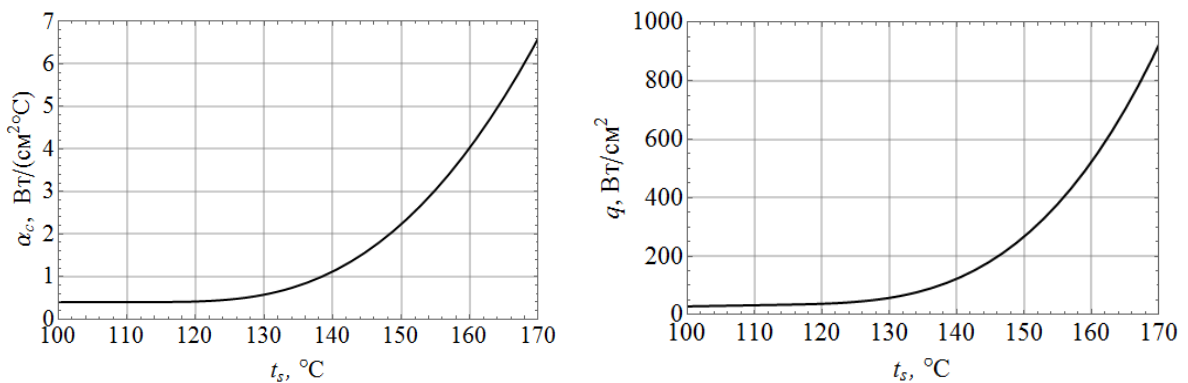


Рис. 2. Расчетный коэффициент теплоотдачи α_c (слева) и соответствующая ему плотность потока тепла q (справа) как функции температуры t_s охлаждаемой поверхности.

Построены по параметрам: $t_0 = 30^\circ\text{C}$, $P_0 = 1.7$ бар, $\alpha_0 = 0.4$ Вт/(см²°C)

Приведенные графики показывают, что использование механизма пузырькового кипения позволяет снимать чрезвычайно высокие тепловые потоки, что недоступно для обычного механизма теплосъема с помощью не кипящей жидкости. Однако следует иметь ввиду, что устойчивый режим пузырькового кипения возможен при условии, что максимальный тепловой поток не превышает *первую критическую плотность теплового потока*, при достижении которой начинается переход от пузырькового к пленочному кипению с резким падением коэффициента теплоотдачи.

Экспериментальные данные показывают, что первая критическая плотность теплового потока q_{c1}^* , зависящая от *недогрева* жидкости $\Delta\tilde{t} = t_b - t_0$ и скорости v потока жидкости в канале, может быть представлена в виде [11]:

$$q_{c1}^*(\Delta\tilde{t}, v) = q_{c1} \cdot k(v, \Delta\tilde{t}) \cdot \left[1 + 0.065 \left(\frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{п}}} \right)^{0.8} \frac{c_p \Delta\tilde{t}}{r} \right]$$

где:

$q_{c1} = 120 \text{ Вт/см}^2$ – первая критическая плотность потока при $\Delta\tilde{t} = 0$ и $v = 0$;
 $\rho_{\text{ж}}$ и $\rho_{\text{п}}$ – плотности жидкости и ее насыщенного пара при температуре кипения;
 c_p и r – средняя теплоемкость воды в диапазоне $[t_0, t_b]$ и теплота парообразования жидкости при t_b ;
 $k(v, \Delta\tilde{t})$ – безразмерный коэффициент, учитывающий возрастание 1-ой критической плотности при увеличении скорости протока жидкости в канале и при увеличении недогрева [7].

Для выбранных параметров $t_0 = 30^\circ\text{C}$, $t_b = 115^\circ\text{C}$, $k=1$ первая критическая плотность потока оценивается снизу как 425 Вт/см^2 .

Поведение окна под давлением

При рассматриваемых нагрузках мембрана толщиной 1 мм ведет себя как *жесткая* пластинка, а толщиной 0.5 мм – как *гибкая*. Поэтому расчет для тонкой мембраны проводился с учетом больших перемещений. На рисунке 3 представлены изолинии модуля перемещения, а на рисунке 4 – поле эквивалентных напряжений в моделях окна с толщиной мембраны 1 мм (слева) и 0.5 мм (справа) под действием давления 1.7 бар.

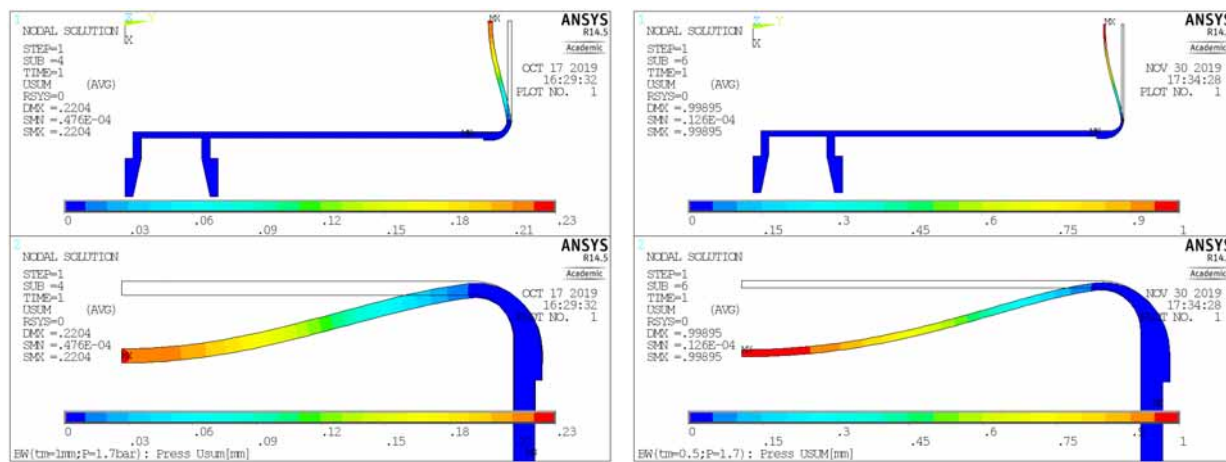


Рис. 3. Изолинии модуля перемещения в модели с толщиной мембраны 1 мм (слева) и 0.5 мм (справа) под действием давления 1.7 бар. $U_{max} = (0.22; 1.00) \text{ мм}$

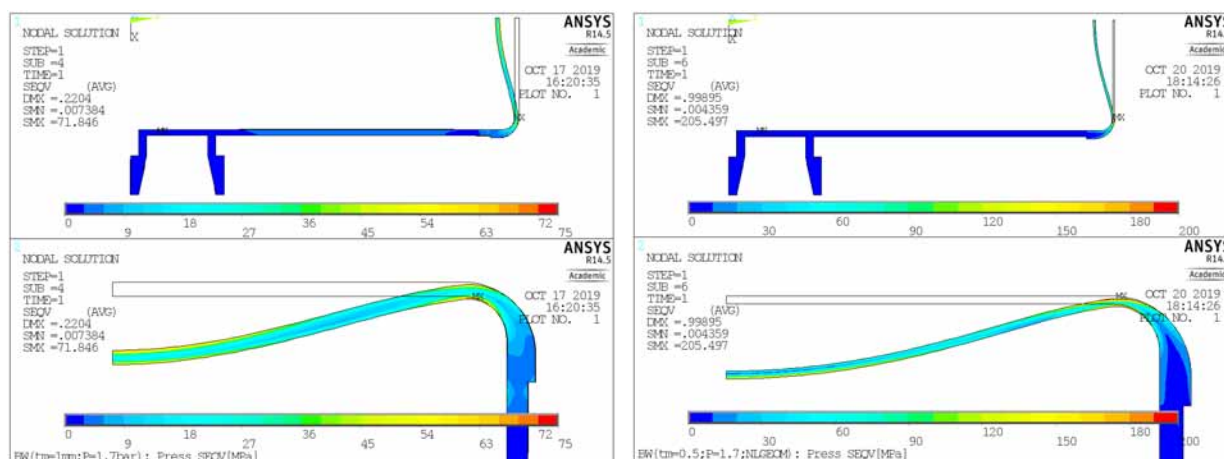


Рис. 4. Эквивалентные напряжения в модели с толщиной мембраны 1 мм (слева) и 0.5 мм (справа) под действием давления 1.7 бар. $S_{max}^{eqv} = (72; 205)$ МПа

Прогиб мембраны более 0.5 мм нежелателен, так как это увеличивает размер канала (3-5 мм по пучку) с водой, охлаждающей мембрану и мишень. Это приводит к падению эффективности наработки радионуклидов вследствие потерь энергии протонов в дополнительном слое воды. Кроме того, из соображений прочностной надежности конструкции окна из алюминиевого сплава, максимальные напряжения не должны превышать значения предела текучести материала, который для сплава АМгб примерно равен 150 МПа. По этим двух критериям толщина мембраны окна выбирается равной 1 мм.

Термомеханический анализ

В этом пункте приводятся результаты прочностного расчета окна при совместном действии давления воды ($P_0 = 1.7$ бар) и неравномерного нагрева за счет объемного тепловыделения от проходящего через окно протонного пучка с интенсивностью 375 мкА.

Центральный протонный пучок $\{\sigma = 10$ мм, $R_s = 0$ мм}

В программе ANSYS результаты расчетов можно представить в графическом виде в многочисленных форматах. Здесь мы ограничимся характерными картинками для одного из вариантов расчета – варианта с параметрами $\alpha_0 = 0.4$ Вт/(см²°С), $h = 1$ мм.

На рисунке 5 представлены распределение температуры в окне (слева) и характерная картинка напряженно-деформированного состояния оконного блока (справа).

Максимальная температура достигается в центре мембраны и равна 140°C , что превышает температуру кипения воды, и значит центральная часть поверхности мембраны будет охлаждаться посредством пузырькового кипения. Максимальный прогиб мембраны реализуется, естественно, в ее центре и составляет величину $U_{max} = 0.13$ мм. Максимальное эквивалентное напряжение наблюдается в заделке мембраны и составляет величину $S_{max}^{eqv} = 120$ МПа.

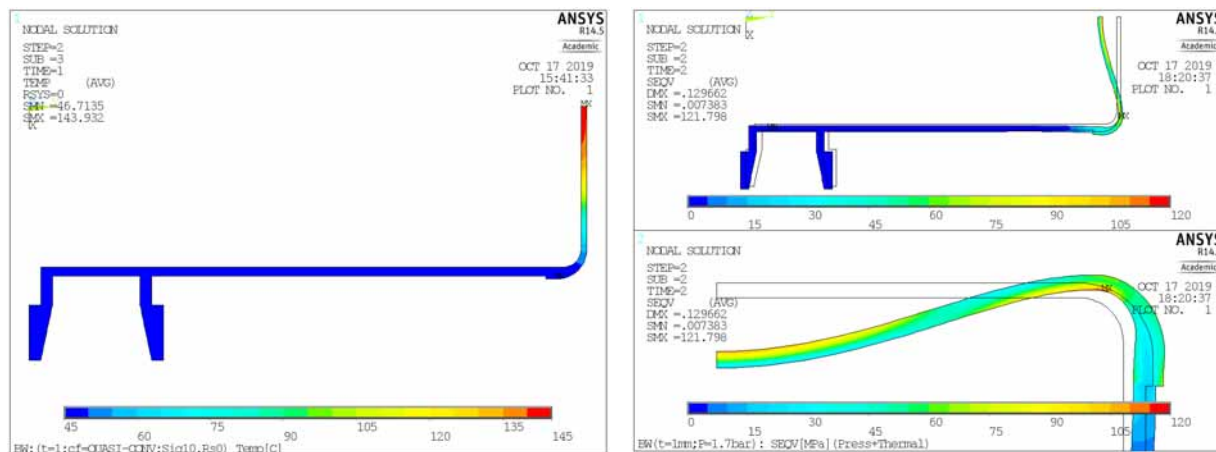


Рис. 5. Распределение температуры (слева) и эквивалентные напряжения (справа) в модели с параметрами $\alpha_0 = 0.4$ Вт/(см²°C), $h = 1$ мм. Результат: $T_{max} = 143.9$ °C, $T_{min} = 46.7$ °C; $U_{max} = 0.13$ мм, $S_{max}^{eqv} = 120$ МПа

На рисунке 6 приведены векторное поле плотности потока тепла в окне и зависимости радиальной и аксиальной компонент вектора плотности потока от радиуса по охлаждаемой (конвективной) поверхности мембраны. Интересно поведение векторного поля потока тепла в мембране: наряду с оттоком тепла через охлаждаемую поверхность наблюдается значительный радиальный поток тепла по направлению к периферии окна. Это связано с высоким коэффициентом теплопроводности материала мембраны $\lambda = 122$ Вт/(м°С). Максимальная плотность потока достигается в центре мембраны на ее охлаждаемой поверхности и составляет 115 Вт/см², что в три раза ниже 1-ой критической плотности.

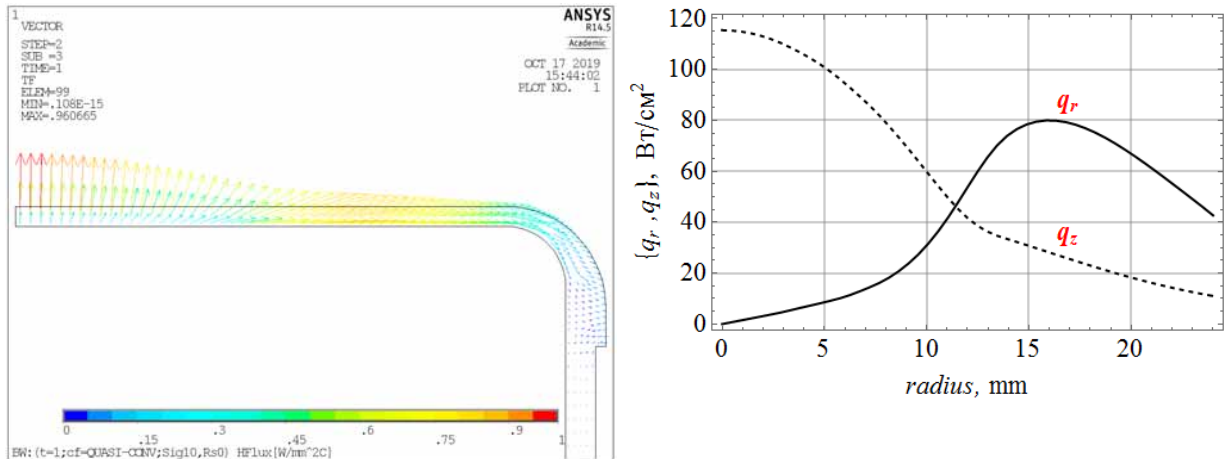


Рис. 6. Векторное поле плотности потока тепла (слева); Зависимости радиальной q_r и аксиальной q_z компонент плотности потока тепла от радиуса (справа) в модели с параметрами $\alpha_0 = 0.4 \text{ Вт}/(\text{см}^2\text{°C})$, $h = 1 \text{ мм}$. $(q_z)_{max} = 115$, $(q_r)_{max} = 80 \text{ Вт}/\text{см}^2$

На рисунке 7 показаны зависимости температуры стенки и локального коэффициента теплоотдачи вдоль радиуса на охлаждаемой поверхности мембраны.

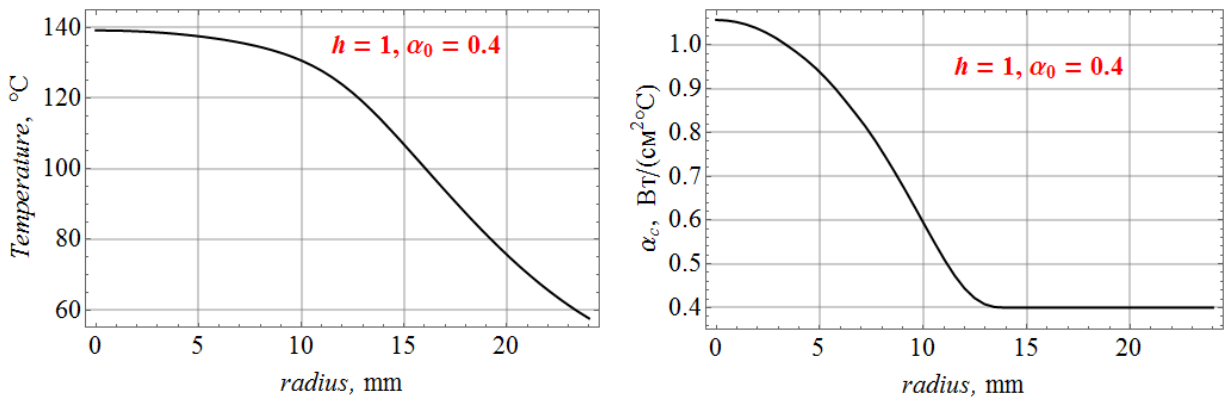


Рис. 7. Температура вдоль радиуса мембраны на ее конвективной поверхности (слева); Коэффициент теплоотдачи вдоль радиуса мембраны на ее конвективной поверхности (справа) для модели с параметрами $\alpha_0 = 0.4 \text{ Вт}/(\text{см}^2\text{°C})$, $h = 1 \text{ мм}$.

Результат: $T_{max}^{conv} = 139.2\text{°C}$; $\alpha_{max} = 1.1 \text{ Вт}/(\text{см}^2\text{°C})$, $\alpha_{min} = 0.4 \text{ Вт}/(\text{см}^2\text{°C})$

На следующих рисунках изображены зависимости радиального, азимутального и эквивалентного напряжения от радиуса на охлаждаемой (рис. 8, слева) и неохлаждаемой (рис. 8, справа) поверхностях мембраны.

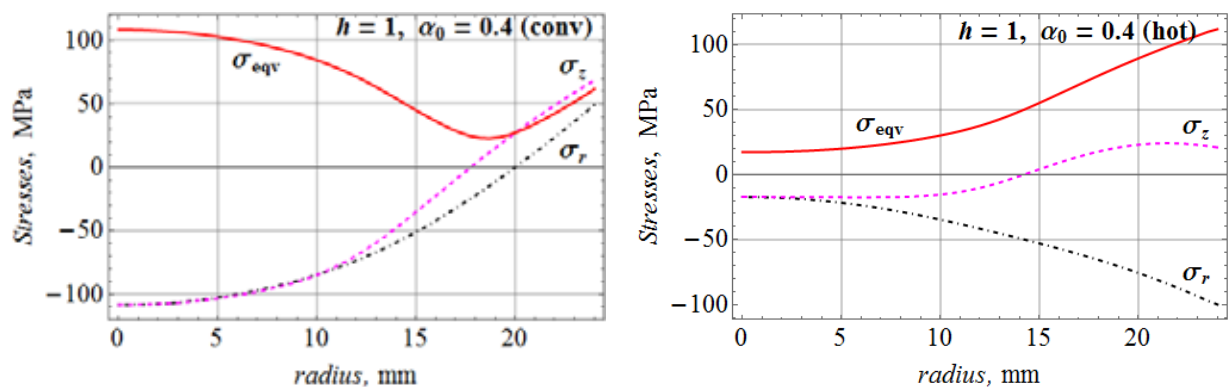


Рис. 8. Радиальное, азимутальное и эквивалентное напряжения как функции радиуса мембраны на ее конвективной (слева) и неохлаждаемой (справа) поверхностях.

Модель: $\alpha_0 = 0.4 \text{ Вт}/(\text{см}^2\text{°C})$, $h = 1 \text{ мм}$.

Основные результаты расчетов сведены в таблицу 1, в которой t_{max} – максимальная температура в окне (достигается в центре мембраны на ее неохлаждаемой поверхности); t_{max}^{conv} – максимальная температура мембраны на ее охлаждаемой поверхности (достигается в центре); t_{min} – минимальная температура в окне (достигается на периферии окна); U_{max} – максимальный прогиб мембраны; S_{max}^{eqv} – максимальное эквивалентное напряжение в окне (достигается в заделке мембраны на участке максимального изгиба, либо в центре мембраны); $(q_r)_{max}$ – максимальная плотность потока в радиальном направлении (достигается в сечении мембраны, в котором градиент температуры максимальный); $(q_z)_{max}$ – максимальная плотность потока в аксиальном направлении (достигается в точке охлаждаемой поверхности, в которой объемная плотность тепловыделения максимальна. В случае центрального пучка – это центр мембраны).

Таблица 1. Основные результаты расчетов вариантов мембраны для пучка с параметрами $\{\sigma = 10 \text{ мм}, R_s = 0 \text{ мм}\}$ при давлении воды 1.7 бар ($t_b = 115\text{°C}$).

Вариант	$t_{max} / t_{max}^{conv} / t_{min}$, °C	U_{max} , мм	S_{max}^{eqv} , МПа	$(q_r)_{max} / (q_z)_{max}$, Вт/см ²
$h = 0.5, \alpha_0 = 1.0$	84.8 / 83.7 / 33.3	1.17	228	38 / 54
$h = 0.5, \alpha_0 = 0.4$	131.0 / 129.9 / 39.7	1.35	264	73 / 57
$h = 1.0, \alpha_0 = 1.0$	129.9 / 125.7 / 34.9	0.17	120	66 / 104
$h = 1.0, \alpha_0 = 0.4$	143.9 / 139.2 / 46.7	0.13	122	80 / 115

Из таблицы 1 видно, что только в одном из четырех вариантов охлаждение будет происходить без кипения воды. В остальных трех в центральной части мембраны отвод

тепла будет осуществляться посредством пузырькового кипения, а на периферии – посредством обычного конвективного охлаждения.

Осесимметричный протонный пучок с разверткой $\{\sigma = 5 \text{ мм}, R_s = 15 \text{ мм}\}$

В случае пучка с разверткой максимальная плотность тепловыделения уменьшается примерно в 2 раза по сравнению с центральным пучком, что уменьшает температуру и потоки тепла в окне. В этом подпункте мы не приводим картинки – они аналогичны предыдущим, за исключением того, что максимальные температура и аксиальный поток тепла будут достигаться не в центре мембраны, а на радиусе, чуть меньшем радиуса развертки $R_s = 15 \text{ мм}$ (где максимальна плотность тепловыделения).

В таблице 2 сведены основные результаты расчетов. Все величины – такие же как в таблице 1.

Таблица 2. Основные результаты расчетов вариантов мембраны для пучка с параметрами $\{\sigma = 5 \text{ мм}, R_s = 15 \text{ мм}\}$ при давлении воды 1.7 бар ($t_b = 115^\circ\text{C}$).

Вариант	$t_{max} / t_{max}^{conv} / t_{min}, ^\circ\text{C}$	$U_{max}, \text{мм}$	$S_{max}^{eqv}, \text{МПа}$	$(q_r)_{max} / (q_z)_{max}, \text{Вт/см}^2$
$h = 0.5, \alpha_0 = 1.0$	58.6 / 58.0 / 32.7	1.07	229	34 / 28
$h = 0.5, \alpha_0 = 0.4$	92.2 / 91.7 / 39.2	1.16	266	66 / 25
$h = 1.0, \alpha_0 = 1.0$	83.0 / 81.0 / 34.7	0.16	100	57 / 51
$h = 1.0, \alpha_0 = 0.4$	130.2 / 128.1 / 49.2	0.11	124	93 / 51

Из таблицы 2 видно, что только в последнем варианте существует область (кольцевая, со средним радиусом $\sim 15 \text{ мм}$) поверхности мембраны, на которой отвод тепла осуществляется за счет механизма пузырькового кипения. Во всех остальных случаях вода не будет кипеть.

Оценка времени жизни окна

Время жизни окна определяется, как отмечено выше, в основном, двумя факторами:

- циклическими термонапряжениями, возникающими при прохождении пучка протонов через окно;
- радиационными повреждениями материала окна, инициированные протонами (влияние нейтронного излучения, генерируемого при взаимодействии протонов с элементами мишенной станции при энергии протонов 70 МэВ незначительны).

тельно, так как плотность потока нейтронов в материалах окна на порядки ниже плотности потока протонов [2]).

Оценки показывают, что циклические термонапряжения, связанные с колебаниями температуры окна, незначительны. Например, при круговой развертке пучка с параметрами $\{\sigma = 5 \text{ мм}, R_s = 15 \text{ мм}\}$ и частотой развертки 50 Гц, циклические колебания температуры оцениваются на уровне не выше 5°C.

Одним из основных показателей радиационного повреждения материалов является *смещение на атом* (dpa – *displacements per atom*). По оценке, полученной с помощью программы SRIM [6], максимальное значение величины dpa в алюминиевом окне (время облучения – 1 год; ток протонного пучка – 375 мкА; центральный пучок с $\sigma = 10 \text{ мм}$) составляет 12 dpa/год. При этом максимальная величина плотности потока частиц составит $2.5 \cdot 10^{22}$ протон/(см²·год). Для пучка с разверткой $\{\sigma = 5 \text{ мм}, R_s = 15 \text{ мм}\}$ значение dpa оценивается как 6 dpa/год. Согласно работе [3], допустимая величина радиационных повреждений для сплава алюминия AL5083 оценивается на уровне 10 dpa/год.

Таким образом, «время жизни» окна (с коэффициентом запаса 2) оценивается на уровне 0.5-1 год. Безусловно, эта величина должна быть уточнена на основании данных опытной эксплуатации мишенной станции.

Заключение

- Разработана численная реализация расчета теплоотдачи при кипении с недогревом (т.е. когда температура потока жидкости ниже температуры кипения, а температура охлаждаемой поверхности выше температуры кипения) на основе методики, изложенной в работе [9], и пакета ANSYS[10]. Как отмечено в [8], методика [9] «подтверждена данными, полученными при кипении воды и этилового спирта в интервале давлений от 1.5 до 90 бар, недогрева от 1 до 260°C, плотностей теплового потока от 23 до 2400 Вт/см² и скоростей циркуляции жидкости от 1 до 23 м/сек».
- Расчетные данные температурных полей и термомеханических напряжений в элементах окна при проектных параметрах пучка протонов, выполненные с помощью этой реализации, показывают:

- термомеханические напряжения, возникающие в мембране окна из-за нагрева ее пучком, значительны, однако механические и тепловые свойства сплава АМгб позволяют использовать этот материал для изготовления окна;
- деформация мембраны определяется в основном давлением охлаждающей мембрану воды, температурные прогибы мембраны из-за нагрева ее пучком незначительны;
- минимальная толщина мембраны окна, обеспечивающая её прогиб не более 0.2 мм, составляет 1 мм;
- в области пучка отвод тепла с поверхности мембраны окна может осуществляться посредством пузырькового кипения, а на периферии мембраны – посредством обычного конвективного охлаждения;
- из-за радиационных повреждений материала мембраны «время жизни» окна оценивается в 0.5-1 год. Эта оценка должна быть подтверждена в ходе эксплуатации окна в составе мишенной станции.

Авторы выражают благодарность:

- *Л.О. Балиеву за участие в обсуждении полученных результатов и полезные замечания;*
- *Отделу ОМВТ ИФВЭ за предоставленные расчетные ресурсы на вычислительном кластере коллективного пользования ИФВЭ [12].*

Список литературы

- [1] М.А. Маслов, В.Н. Пелешко, А.П. Солдатов, А.А. Хасин, Р.Г. Тертычный. Производство радиофармпрепаратов в Протвино: проект на стадии реализации. Научоград ISSN 2313-7533, № 3-4{17-18}, стр. 16-20., Издательский дом «научная библиотека», 2018.
- [2] N. Savitskaya, M.A. Maslov, S.A. Nikitin, V.N. Peleshko, N.V. Skvorodnev. Selection of materials for target station equipment at cyclotron CYCLON-70, Proceedings of RUPAC2018, Protvino, Russia, pp. 391-393.
- [3] WANG Hai-Jing et al. Thermal analysis and optimization of proton beam windows for CSNS. Chinese Physics C, Vol. 37, No. 7 (2013) 077001.
- [4] Michael Butzek et al. Proton beam window for high power target application, 4-th High Power Targetry Workshop, Malmö, Sweden, 2011.
- [5] G. Murdoch et al. Beam Dump Window Design for the Spallation Neutron Source. Proceedings of PAC'2003, Portland, May 2003, p.1467 (2003).
- [6] James F. Ziegler, Jochen P. Biersack, Matthias D. Ziegler. STRIM/SRIM, www.srim.org.
- [7] М.А. Михеев и И.М. Михеева. Основы теплопередачи, Москва: Энергия, 1977.
- [8] Б.С. Петухов, Л.Г. Генин и С. Ковалев. Теплообмен в ядерных энергетических установках, Москва: Атомиздат, 1974.
- [9] Ю. Е. Похвалов, И. В. Кропин и И. В. Курганов. Обобщение данных по теплоотдаче при кипении недогретых жидкостей. Теплоэнергетика, т. 5, стр. 63, 1966.
- [10] ANSYS, www.ansys.com
- [11] В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сухомел. Теплопередача. Москва, «Энергия», 1975.
- [12] Kotliar V., Gusev V., Kukhtenkov V., Savin N. ИИЕР Tier-2 computing center: status and operation // CEUR Workshop Proceedings, February 2017, Vol. 1787, pp. 323-327.

Рукопись поступила 29 ноября 2019 г.

Маслов М.А., Рябов А.Д., Сквороднев Н.В., Солдатов А.П.

Входное окно мишенной станции для наработки медицинских радионуклидов

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати 02.12.2019	Формат 60 × 84/16.	Цифровая печать.
Печ.л. 1, 25. Уч.– изд.л. 1,6.	Тираж 80. Заказ 13.	Индекс 3649.

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ
142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

