

шения методом Монте-Карло задач переноса нейтронов в физике реакторов (ММКФК-2-BASE). М., 1996. НТЦ ЯРБ, аттестационный паспорт № 134 от 02.11.2001.

6. Блыскавка А.А., Мангуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Программный комплекс CONSYST//

ММККЕНО для расчета ядерных реакторов методом Монте-Карло в многогрупповом приближении с индикатрисами рассеяния в P_n -приближении: Препринт ФЭИ-2887, 2001.

Поступила в Редакцию 31.07.18

УДК 546.77.02.99

ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ТОПЛИВА И ВОДЫ В УСТАНОВКЕ МАК-2

Кочнов О.Ю. (АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова», г. Обнинск),
Колесов В.В., Зевякин А.С., Фомин Р.В. (ИАТЭ НИЯУ МИФИ, г. Обнинск)
e-mail: valeri-kolesov@yandex.ru

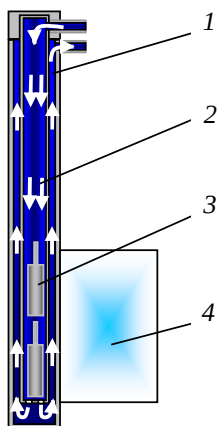
Изотоп ^{99}Mo , широко используемый в ядерной медицине, нарабатывается в специализированной установке МАК-2, помещаемой в экспериментальный канал реактора ВВР-Ц (рис. 1). В установке обычно устанавливаются две мишени в специальных контейнерах одна над другой (рис. 2).

Эффективность наработки ^{99}Mo зависит от конструктивных особенностей мишени и ее расположения в установке МАК-2. Размеры и состав мишеней подчиняются достаточно жестким ограничениям. Так, не допускается режим работы с кипением в пристеночном слое воды, окружающей контейнер. Это связано с тем, что при закипании пристеночного слоя алюминиевая оболочка контейнера нагревается, что может привести к ее прогоранию и недопустимому проникновению радиоактивных продуктов де-

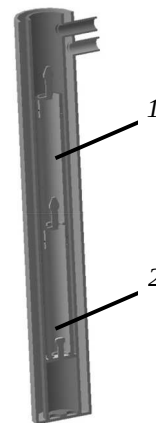
ления в воду, охлаждающую установку. Таким образом, необходимо так сконструировать оболочку и определить размеры контейнера и массу загружаемого в него ураносодержащего материала, чтобы обеспечить допустимую температуру воды в установке МАК-2.

Контейнеры для наработки ^{99}Mo имеют сложную конструкцию с угловой асимметрией отдельных элементов, что не позволяет с достаточной точностью эмпирически оценить температуру воды в пристеночном слое. В некоторых случаях такие эмпирические оценки приводили к необоснованному занижению температуры воды в пристеночном слое. Для учета этих особенностей конструкции была создана многослойная расчетная модель установки, которая использовалась при расчете распределения температуры в установке МАК-2 (рис. 3).

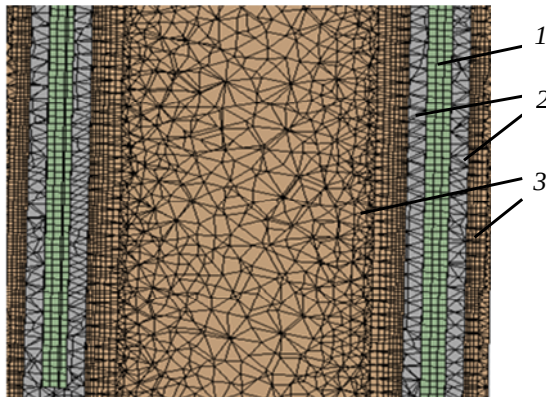
При ее создании принимались следующие характеристики материалов конструкции [1]:



Р и с. 1. Схема установки МАК-2 для наработки ^{99}Mo : 1 — вертикальный канал с внутренней трубкой; 2 — направление движения охлаждающей жидкости; 3 — мишень; 4 — активная зона



Р и с. 2. Схема МАК-2 с установленными блок-контейнерами: 1, 2 — верхняя и нижняя мишень соответственно



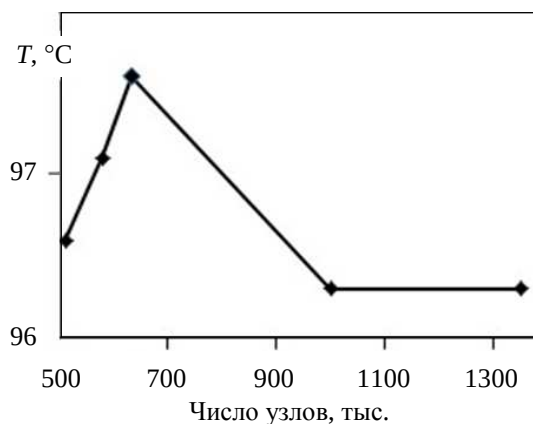
Р и с. 3. Структура расчетной слоистой сетки: 1 — урано-содержащая смесь; 2 — оболочка; 3 — вода

алюминиевая оболочка контейнера теплопроводностью 140 Вт/(м·К) и плотностью 2680 кг/м^3 ;

охлаждающая среда — вода расходом $0,82 \text{ кг/с}$ начальной температурой 57°C и статическим давлением 171 кПа .

В расчетах использовалась модель турбулентности $k-\epsilon$. Энерговыведение в нижней мишени 827 , в верхней 875 МВт/м^3 .

Расчеты. Есть два типа оценок достаточности разбиения модели на расчетные ячейки: теоретический (значительно более консервативный) и инженерный, когда достаточность разбиения подтверждается серией расчетов. Был выбран второй способ для исследования температуры воды в пристеночном слое оболочки. Расчетные исследования, проведенные с использованием программного комплекса ANSYS CFX (США), показали, что увеличение числа расчетных узлов свыше 1 млн почти не приводит к изменению максимальной температуры теплоносителя (рис. 4). Исходя из этого, была



Р и с. 4. Зависимость максимальной температуры теплоносителя от числа узлов сетки

построена многослойная расчетная сетка с $1,35 \text{ млн}$ узлов, с использованием которой проводились расчетные исследования. Параметры алюминиевой оболочки и ураносодержащего материала были взяты из работы [2].

Расчетные исследования проводили для двух различных моделей с разной степенью детализации в описании теплообмена.

Модель 1. Отсутствие кипения, парообразования и турбулентности.

Подогрев воды можно оценить по формуле [3]

$$N = GC_p \Delta T,$$

где N — мощность, кВт; $G = 0,82 \text{ кг/с}$ — расход теплоносителя; $C_p = 4200 \text{ Дж/(кг·}^\circ\text{C)}$ теплоемкость воды; ΔT — подогрев теплоносителя, $^\circ\text{C}$.

Тепловая мощность, выделяемая в канале, составляет $25,3 \text{ кВт}$ для верхней и $24,93 \text{ кВт}$ для нижней мишени.

Подогрев теплоносителя определяется по формуле

$$\Delta T = N / GC_p$$

и составляет $14,6^\circ\text{C}$. Зная температуру теплоносителя на входе в канал (57°C), можно найти температуру воды на выходе. Температура теплоносителя на выходе из канала составила $71,76^\circ\text{C}$ без учета зависимости теплопроводности ураносодержащего материала от температуры и $71,75^\circ\text{C}$ с учетом такой зависимости. Максимальная температура ураносодержащего слоя составила 278 и 316°C соответственно, температура воды в пристеночном слое для этой модели — $96,6$ и $96,4^\circ\text{C}$ соответственно.

Таким образом, расчеты показывают, что учет зависимости теплопроводности ураносодержащего слоя от температуры увеличивает максимальную температуру в этом слое более чем на 10% . При этом температура воды в пристеночном слое почти не меняется.

Модель 2. Расчеты с учетом кипения, парообразования и турбулентности.

Температура теплоносителя на выходе из канала составляла $71,6^\circ\text{C}$, максимальная температура ураносодержащего слоя 298°C , температура воды в пристеночном слое $96,4^\circ\text{C}$. Таким образом, учет кипения, парообразования и турбулентности приводит к незначительному

уменьшению максимальной температуры в ураносодержащем слое, температура воды в пристеночном слое почти не изменяется.

Погрешность теплогидравлического расчета при использовании k — ϵ -модели не превышает 5% по сравнению с расчетами по аналитическим формулам [4].

Выводы. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

изменение теплопроводности U_3O_8 и ZnO в рабочем диапазоне температуры влияет на температуру теплоносителя на выходе незначительно, но дает более реальную картину распределения температурных полей в ураносодержащем слое;

при учете кипения, парообразования и турбулентности температура теплоносителя на выходе изменяется в пределах погрешности, поэтому использование упрощенной модели допустимо;

согласно расчету при наработке ^{99}Mo в установке МАК-2 не происходит пристеночного кипения охлаждающей жидкости при заданном давлении в канале, т.е. пределы и условия нормальной эксплуатации установки МАК-2 не нарушаются.

Расчеты показали, что запас до кипения по температуре пристеночного слоя воды позволяет увеличить количество ураносодержащего материала в мишени.

Методика расчетов может быть применена для оценки параметров других аналогичных петлевых каналов с принудительным охлаждением.

Работа выполнена при поддержке Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казанцев А.А., Сергеев В.В., Кочнов О.Ю. Расчетный анализ температуры в блок-контейнере модифицированной конструкции для наработки $Mo-99$ на ИЯУ ВВР-Ц (ИБВ.10М). — Ядерная физика и инжиниринг, 2014, т. 5, вып. 4, с. 306.
2. Thermophysical Properties Database of Materials for Light Water Reactors and Heavy Water Reactors. IAEA-TECDOC-1496. Vienna: IAEA, 2006. 397 с.
3. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). М.: Энергоатомиздат, 1990.
4. Ахмедзянов Д.А., Кишалов А.Е. Верификация расчета процесса теплообмена в программном комплексе ANSYS CFX. Уфа, УГАТУ, 2009.

Поступила в Редакцию 21.03.19

УДК 621.039.4

ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ^{232}U В ОТРАБОТАВШИХ ТВС БЫСТРОГО РЕАКТОРА С УРАНОВОЙ ЗАГРУЗКОЙ

Невиница В.А. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва),

Колупнаев Д.Н. (ПО «Маяк», г. Озерск)

neviniza_va@nrcki.ru

Одним из основных условий функционирования энергетики является ее обеспеченность ресурсами. Применительно к ядерной энергетике это означает наличие достаточного количества природного урана для энергетики с открытым топливным циклом, урана и плутония или тория и ^{233}U для энергетики с замкнутым топливным циклом. Согласно экспертным оценкам за период становления ядерной энергетики был израсходован объем природного урана, сопоставимый с оставшимися в России ресурсами природного

урана. Означает ли это тенденцию к быстрому истощению ресурсной базы? В условиях однократного использования ядерного топлива, безусловно, да. Следует, однако, отметить, что разделилось совсем незначительное количество тяжелых ядер, остальные перешли из категории топливных в категорию отработавшего ядерного топлива, сохранив при этом свои свойства делящихся элементов. Безусловно, использование плутония из отработавшего топлива требует модернизации активной зоны реакторов, дополни-