

УДК 621.039

ПОВЫШЕНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ЭНЕРГОНАПРЯЖЕННЫХ МИШЕНЕЙ В РЕАКТОРАХ СЕРИИ РБТ

© 2013 Г.Д. Гатауллина¹, Т.А. Осипова², В.А. Узиков¹

¹ ОАО «ГНЦ НИИАР», Ульяновская область, Димитровград-10

² Филиал НИЯУ «МИФИ» «Димитровградский инженерно-технологический институт»

Поступила в редакцию 26.11.2013

Для повышения теплотехнической надежности при облучении энергонапряженных мишеней в реакторах серии РБТ рассмотрена конструкция канала с восходящим движением теплоносителя. Приведены результаты расчетных исследований, которые показали возможность применения данной конструкции канала при облучении мишеней для наработки Мо-99.

Ключевые слова: реакторы РБТ-6, РБТ-10/2, осколочный ⁹⁹Мо, канал с восходящим потоком теплоносителя, облучательный канал, облучательное устройство

В НИИАР в качестве базовой технологии переработки облученного топлива для выделения из него осколочного ⁹⁹Мо принята технология ROMOL-99, при которой перерабатываются мишени с ограниченным количеством алюминия (не более 200 грамм в составе загружаемых в аппарат-растворитель партии топливных мишеней с интерметаллидным топливом UAl3).

Наиболее подходящими по нейтронно-физическим характеристикам, доступности каналов для облучения (возможность оперативной перегрузки мишеней) и длительности работы без перегрузок активной зоны (для обеспечения ритмичного графика поставки продукции) являются бассейновые реакторы РБТ-6 и РБТ-10/2. Данный тип реакторов характеризуется нисходящим движением теплоносителя в рабочих и облучательных каналах. В настоящее время при облучении мишеней с интерметаллидным топливом имеется ограничение по тепловому потоку, снимаемому с их поверхности, обусловленное риском опрокидывания потока теплоносителя из-за появления паровой фазы и перегревом мишеней. Поэтому важным условием безопасной эксплуатации реактора в режиме наработки ⁹⁹Мо является ограничение прогресса нисходящего потока теплоносителя в облучательном устройстве (ОУ) и интенсивности поверхностного кипения, невыполнение которых может стать причиной опрокидывания потока в ОУ и развития кризиса теплоотдачи на мишенях.

Гатауллина Гузьяль Дядатовна, научный сотрудник реакторного исследовательского комплекса.

E-mail: orip@niiar.ru

Осипова Татьяна Андреевна, младший научный сотрудник реакторного исследовательского комплекса, аспирант. E-mail: orip@niiar.ru

Узиков Виталий Алексеевич, ведущий инженер-технолог реакторного исследовательского комплекса.

E-mail: orip@niiar.ru

Одним из способов повышения теплотехнической надежности при облучении теплонапряженных мишеней является снятие ограничения по прогреву теплоносителя. Для этого рассматривается возможность применения специального канала с участком восходящего потока, в котором размещаются мишени для наработки молибдена. Конструкция такого канала представлена на рис. 1.

Канал представляет собой двухходовую конструкцию с кольцевым подъемным участком (на периферии) и центральным (опускным). Мишени ОУ располагается в кольцевом зазоре и жестко центрируется на внутренней трубе. В нижней части канала вблизи трубной доски расположены отверстия для входа теплоносителя.

Теплоноситель поступает через входные отверстия 6 в кольцевой зазор между корпусом канала 1 и внутренней трубой 3, проходя между мишенями в ОУ 5, затем через расширение канала 2 поступает во внутреннюю трубу и уходит в подзонное пространство. Для снижения потери давления при переходе от подъемного движения теплоносителя к опускному предусмотрено расширение, выполненное как в канале (2), так и во внутренней трубе (4).

Оценка гидравлических характеристик канала с восходящим потоком и расположенным в нем облучательным устройством рассматриваемой конструкции, проводилась с использованием расчетного модуля FLOW SIMULATION пакета Solid Works [1]. Для увеличения точности конечноэлементных расчетов в условиях осевой симметрии расчеты проводились для j части загруженного канала.

Исходными данными для расчета являлись трехмерная модель ОУ и канала, построенная в Solid Works, а также известный перепад давления на активной зоне РБТ (~ 6,5 кПа). Расчет-

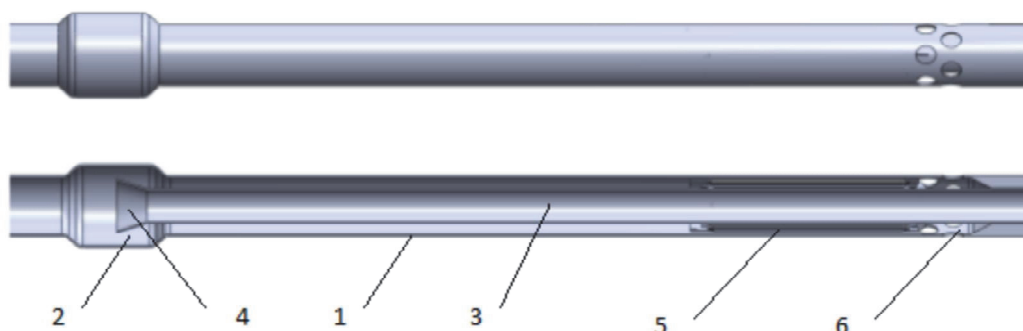


Рис. 1. Конструкция канала с восходящим движением теплоносителя:

1 – корпус канала; 2 – расширение канала; 3 – внутренняя труба; 4 – расширение внутренней трубы; 5 – облучательное устройство; 6 – входные отверстия в канале

ный расход теплоносителя через такой канал с облучательным устройством составил $\sim 12 \text{ м}^3/\text{ч}$ при средней скорости теплоносителя в зазорах между мишенями 1,6 м/с. Теплогидравлический расчет охлаждения мишеней проводился как в расчетном комплексе ANSYS v.12.1 в модуле CFX, так и с использованием кода RELAP5/Mod3.2 [2].

При проведении расчетного анализа по коду RELAP5/Mod3.2 использовался полученный при трехмерном моделировании расчетный расход при известном перепаде давления на канале.

В ходе расчетного анализа были оценены теплогидравлические параметры при облучении мишеней в рассматриваемом канале с принудительным расходом $12 \text{ м}^3/\text{ч}$ и температурой теплоносителя в бассейне (на входе в активную зону) 50°C . Расчетные оценки проводились для мощности на одно устройство 156 кВт при 52 мишенях прямоугольного профиля.

Трехмерное моделирование теплогидравлических процессов в канале с восходящим потоком проводилось в расчетном модуле CFX, позволяющем моделировать пристеночное кипение теплоносителя на мишенях и фазовые переходы первого рода. Для сокращения расчетного времени и затрат компьютерных ресурсов рассматривался сектор канала (18°) с наложением условий симметрии.

В качестве начальных условий задавался расход теплоносителя через расчетный сектор кана-

ла $0,2 \text{ кг/с}$ и давление на выходе из канала 1,65 МПа. Энерговыведение в ОУ принималось равным 3 кВт/мишень.

Расчет показал, что ввиду уменьшения проходного сечения на уровне нижней решетки схлопывание пузырьков происходит менее интенсивно из-за затруднения движения потока. В сечении центральной плоскости активной зоны проходное сечение больше, поэтому условия охлаждения мишеней лучше. На уровне верхней решетки, также как и на уровне нижней решетки, образуется зона с бoльшим относительным паросодержанием.

Средняя температура теплоносителя в любом сечении по высоте мишеней не превышает температуру насыщения при данном давлении, следовательно, может наблюдаться только пузырьковое кипение недогретой жидкости на поверхности мишеней.

При расчете теплогидравлических режимов работы облучательного устройства в канале с восходящим потоком по коду RELAP5/Mod3.2 также учитывалась неравномерность энерговыведения по высоте мишеней, которая задавалась изменением параметров тепловыделения по 9-ти высотным участкам.

На рис. 2 представлено распределение температур оболочек по высоте мишеней, а также температуры омывающего эти мишени теплоно-

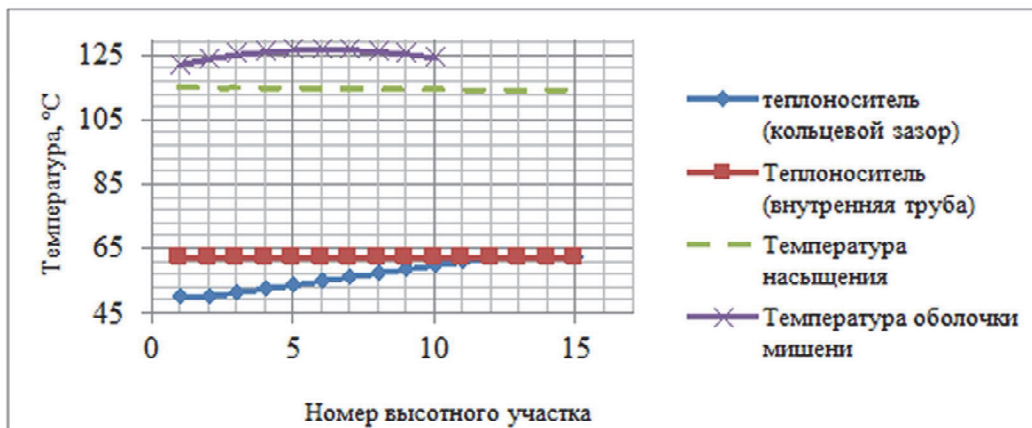


Рис. 2. Распределение температур по высоте облучательного устройства в РБТ

сителя на подъемном (кольцевой зазор) и опускаемом (внутренняя труба) участках активной зоны, а также температура насыщения теплоносителя с учетом нивелирного напора. Как следует из результатов расчета, температура оболочек мишеней превышает температуру насыщения и наблюдается пристеночное кипение теплоносителя.

Поверхностное кипение теплоносителя в нагретой жидкости приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи с поверхности мишеней, поэтому перегрева мишеней не произойдет. В случае использования канала с опускающим движением теплоносителя при относительно малых скоростях при поверхностном кипении происходит перераспределение потоков в системе параллельных каналов активной зоны, и снижается расход через облучательный канал из-за тормозящего эффекта от уменьшения средней плотности теплоносителя, омывающего мишени. В пределе это может привести к разогреву теплоносителя в облучательном устройстве (ОУ) и переходу от поверхностного кипения к объемному, что в условиях гидродинамики активной зоны РБТ может привести к «зависанию» парового пузыря в пространстве между мишенями и их разрушению.

В канале с восходящим потоком даже при развитии пузырькового кипения снижение эффективной плотности теплоносителя на подъемном участке приводит к увеличению расхода теплоносителя через ОУ и делает невозможным «запирание» потока теплоносителя «паровым пузырем». В этом случае расход теплоносителя через ОУ не прекращается, и, следовательно, перегрева и разгерметизации мишеней не происходит [3]. Допущение возможности развитого пузырьково-

го кипения на поверхности мишеней снимает ограничение на максимальную плотность теплового потока, что резко снижает требования к развитости теплоотдающей поверхности. Это позволяет упростить технологию изготовления мишеней, снизить долю неиспользуемого оболочечного материала в мишени повышая тем самым долю интерметаллидного топлива UAl3.

При анализе теплотехнической надежности коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи вычисляются как минимальное отношение расчетной критической и фактической плотностей теплового потока по высотным участкам мишеней.

Из сравнения результатов расчета критических тепловых потоков для мишеней квадратного сечения по коду RELAP5/MOD3.2 со значениями, полученными по эмпирическим корреляциям, рекомендованным МАГАТЭ для исследовательских реакторов, а также ряду отечественных корреляций, видно, что характерен большой разброс результатов расчетов коэффициента запаса до кризиса по различным эмпирическим корреляциям (рис. 3).

Из расчетного анализа видно, что код дает завышенное значение критической плотности теплового потока по сравнению с другими корреляциями [4]. Расчетный запас до кризиса теплоотдачи по корреляции, заложенной в коде RELAP, составляет ~ 10.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ теплогидравлических режимов охлаждения теплонапряженных мишеней при нисходящем и восходящем потоках теплоносителя с

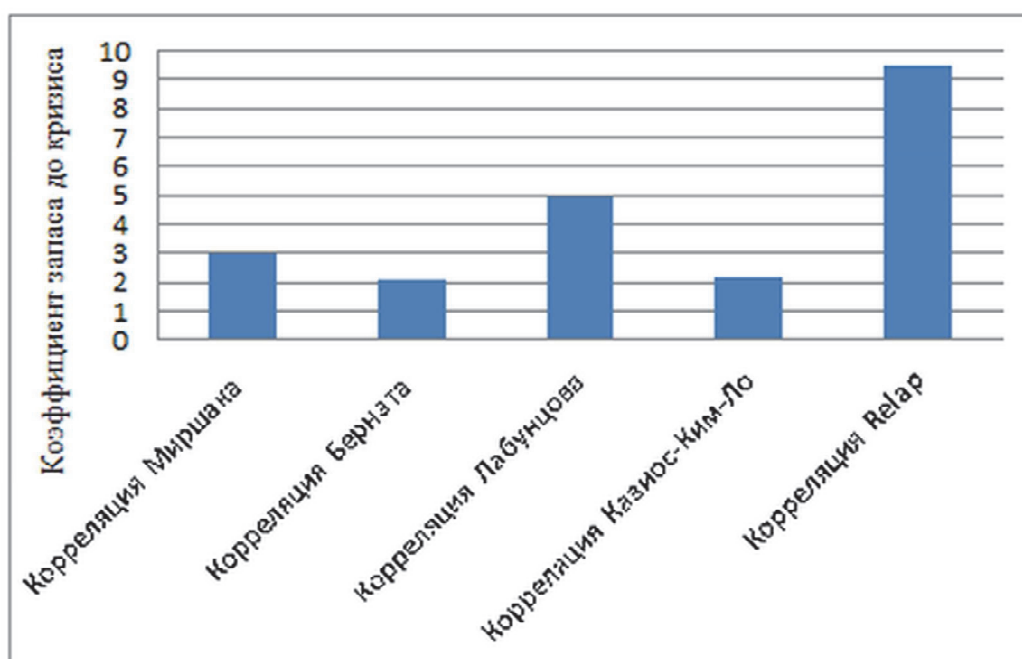


Рис. 3. Коэффициент запаса до кризиса, рассчитанный для разных корреляций

низкими параметрами (невысокое давление, небольшая скорость) показал существенное повышение запаса до кризиса теплоотдачи (теплотехнической надежности) при облучении в РУ РБТ. Поверхностное кипение при восходящем движении теплоносителя приводит к интенсификации циркуляции и увеличению скорости теплоносителя, что позволяет избежать запаривания пространства между мишенями при высоких тепловых нагрузках. Снятие ограничений по плотности теплового потока на поверхности мишеней дает возможность снизить требования к конструкции мишеней и к технологии их изготовления, что существенно уменьшает их стоимость.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алямовский А.А. SolidWorks/COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов. М.: ДМК, 2004. 427с.
2. RELAP5/MOD3.2 CODE MANUAL, Volume I. NUREG/CR-5535. INEL-95/0174. June 1995.
3. *Mishima K., Nishihara H.* The effect of flow direction and magnitude on CHF for low pressure water in thin rectangular channels. Nuclear Engineering and design, 86 (1985). Pp.165-181
4. *Тонг Л.* Кризис кипения и критический тепловой поток [перев. с англ.]. М.: Атомиздат, 1976. С. 24-25.

ENHANCEMENT OF THERMO-TECHNICAL RELIABILITY WHEN IRRADIATING STRESSED TARGETS IN RBT REACTORS

© 2013 G.D. Gataullina, T.A. Osipova, V.A. Uzikov

¹JSC SSC RIAR, Ulyanovsk Region, Dimitrovgrad-10

²Branch of National Research Nuclear University "MEPhI"

"Dimitrovgrad Engineering Institute of Technology", Ulyanovsk Region, Dimitrovgrad

To enhance the thermo-technical reliability when irradiating stressed targets in the reactors, a channel design is considered with an ascendant coolant flow. The paper presents calculation results showing it possible to apply this channel design when irradiating targets to accumulate Mo-99.

Key words: reactors RBT-6, RBT-10/2, fission ⁹⁹Mo, channel with an ascendant coolant flow, irradiation channel, irradiation rig.

Guzyalya Gataullina, Research Fellow, Research Reactors Complex. E-mail: orip@niar.ru

Tatyana Osipova, Associate Research Fellow, Research Reactors Complex, Graduate Student. E-mail: orip@niar.ru

Vitaly Uzikov, Leading Engineer, Research Reactors Complex. E-mail: orip@niar.ru