

выборе оптимальных параметров реакторной установки. Кроме того, заслуживают тщательного расчетно-теоретического исследования остальные подходы, представленные в работе.

Авторы признательны А.М. Дегтяреву за помощь и сотрудничество, Д.В. Хмельницкому за замечания по тексту статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Status** of Molten Salt Reactor Technology. IAEA Meeting, 31 October — 3 November, 2016.
2. **Molten** Salt Reactors and Thorium Energy. Ed. by Thomas J. Dolan. Sawston: Woodhead Publishing, Cambridge, 2017.
3. Пономарев Л.И., Белоногов М.Н., Волков И.А. и др. Быстрый жидкосолевого реактор на основе эвтектики LiF—NaF—KF как сжигатель Np, Am, Cm. — См. настоящ. вып., с. 123—132.
4. Ганев И.Х., Лопаткин А.В., Орлов В.В. Гомогенная трансмутация Am, Cm, Np в активной зоне реактора типа БРЕСТ. — Атомная энергия, 2000, т. 89, вып. 5, с. 355—361.
5. Ганев И.Х., Лопаткин А.В., Орлов В.В. Гетерогенная трансмутация Am, Cm, Np в активной зоне реактора типа БРЕСТ. — Там же, с. 362—365.
6. Лопаткин А.В., Орлов В.В. Влияние спектра нейтронов на характеристики трансмутационных цепочек Np, Am и Cm. — Там же, 2006, т. 100, вып. 6, с. 428—433.
7. Ignatiev V., Feynberg O. Progress in development of Li, Be, Na/F molten salt actinide recycler and transmuter concept. — In: Intern. Congress on Advanced in Nuclear Power Plants. France, 13—18 May 2007, Paper 7548.
8. **Advanced** Reactor Technology Options for Utilization and Transmutation Actinides in Spent Nuclear Fuel. TECDOC-1626. Vienna: IAEA, 2009, p. 170—301.
9. Игнатъев В.В., Фейнберг О.С., Загнитко А.В. и др. Жидкосольевые реакторы: новые возможности, проблемы и решения. — Атомная энергия, 2012, т. 112, вып. 3, с. 135—143.
10. Ignatiev V., Feynberg O., Gnidoi I. e.a. Molten salt actinide recycler and transforming system without and with Th—U support. Fuel cycle flexibility and key material properties. — Ann. Nucl. Energy, 2014, v. 64, p. 408—420.
11. Дегтярев А.М., Мясников А.А., Коляскин О.Е. и др. Жидкосольевой подкритический реактор-сжигатель трансплутониевых изотопов. — Атомная энергия, 2013, т. 114, вып. 4, с. 183—188.
12. Fiorina C., Cammi A., Franceschini F., Krepel J. MSFR TRU-burning potential and comparison with an SFR. — In: Global 2013: Nuclear Fuel Cycle Conf., 2013, p. 813—822.
13. Chengang Yu, Xiaoxiao Li, Xiangzhou Cai e.a. Minor actinide incineration and Th—U breeding in a small FLiNaK molten salt fast reactor. — Ann. Nucl. Energy, 2017, v. 99, p. 335—344.

Поступила в Редакцию 11.10.18

УДК 621.039.522

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ТОПЛИВНОГО КОНТУРА ЖИДКОСОЛЕВОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА С АКТИВНОЙ ЗОНОЙ ПОЛОСТНОГО ТИПА

Игнатъев В.В., Фейнберг О.С. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва),
Смирнов В.П., Ванюкова Г.В., Лопаткин А.В. (АО «НИКИЭТ», г. Москва)
e-mail: ignatiev_vv@nrcki.ru

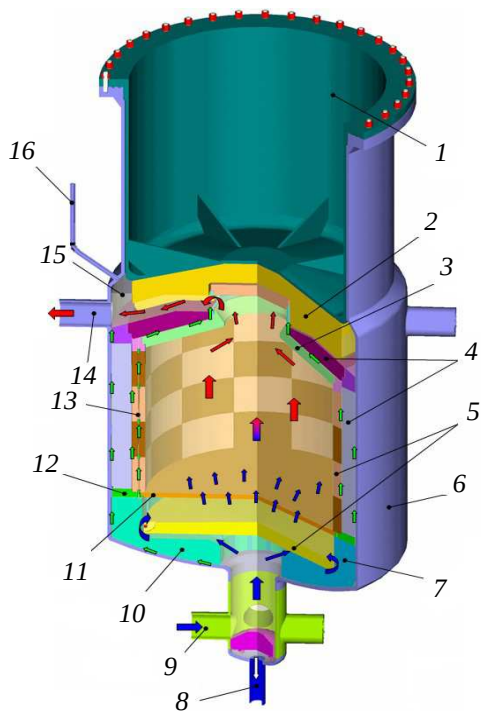
В рамках Международного форума «Поколение IV» выбраны для разработки к 2030 г. шесть инновационных реакторных технологий, одной из которых является жидкосольевой ядерный реактор с циркулирующим топливом на основе расплава солей фторидов металлов. В нашей стране предложена концепция ЖСР-С с активной зоной полостного типа (в зарубежной литературе MOSART) тепловой мощностью 2400 МВт для сжигания трансурановых элементов, остающихся после переработки отработавшего ядерного топлива тепловых реакторов [1, 2]. ЖСР-С имеет цилиндрическую активную зону диаметром 3,4, высотой 3,6 м и способен ежегодно принимать в свой топливный цикл в

составе фторидов трансурановых элементов из отработавшего ядерного топлива до 250 кг непутия, америция и кюрия. В качестве растворителя топливных материалов рассматриваются расплавы молярного состава $73\text{LiF}—27\text{BeF}_2$ и $58\text{NaF}—15\text{LiF}—27\text{BeF}_2$, совместимые при температуре до 1000 К с высоконикелевыми сплавами и графитом, поскольку их скорость коррозии по сравнению с жидкими металлами мало зависит от содержания оксидов и других примесей, имеющие сравнимые с водой теплофизические свойства и в 10^4 раз более высокую радиационную стойкость [1—4].

Важное значение в формировании концептуального облика ЖСР-С имеет теплогидравли-

ческий анализ активной зоны и реакторного контура, так как именно он позволяет определить объем циркулирующего расплава, следовательно, и топливную загрузку внутри и вне активной зоны, выбрать конструкторские решения и, в конечном итоге, техническую реализуемость и параметры безопасности.

Теплогидравлический анализ активной зоны. Температура топливной соли на входе в активную зону составляет 873 К. Согласно конструкторскому решению топливная соль подается в активную зону снизу, омывает нижний торцевой отражатель и через боковое окно поступает в нижний коллектор, из которого попадает непосредственно в активную зону (рис. 1). В верхней части топливная соль выходит из активной зоны с температурой около 988 К. Активная зона окружена боковым и торцевыми отражателями толщиной 0,2 м. Для создания бокового и торцевых отражателей активной зоны, размещенных внутри корпуса реактора, предлагается использовать мелкопористый реакторный графит или специально разработанный высоконикелевый сплав ХН80МТЮ.



Р и с. 1. Жидкосольевой ядерный реактор-сжигатель трансурановых элементов ЖСР-С: 1 — крышка; 2 — защитный блок; 3 — верхний отражатель; 4 — защитные блоки; 5 — боковой и нижний отражатели; 6 — корпус реактора; 7 — опорное ребро; 8 — дренаж топливной соли; 9 — подводной патрубков; 10 — защитные блоки; 11 — перфорированная плита; 12 — опорное кольцо; 13 — охлаждение отражателя; 14 — отводной патрубков; 15 — уровень топливной соли; 16 — газовая линия

Задачами теплогидравлического анализа являлись:

организация течения топливной соли в активной зоне в соответствии с распределением энерговыделения для снижения ее максимальной температуры;

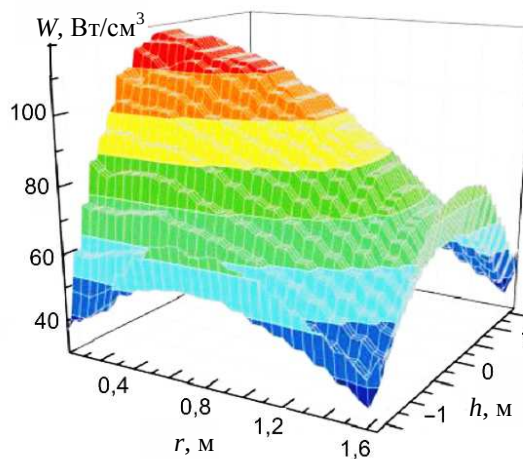
устранение возможных вихревых течений топливной соли в активной зоне;

снижение максимальной температуры отражателей.

В соответствии с перечисленными задачами проведены теплогидравлические расчеты для активной зоны с отражателями из сплава ХН80МТЮ и графита, в которых исследовалось влияние высоты бокового окна $H_{\text{вх}}$, пористости перфорированной плиты на входе в активную зону, формы верхнего торцевого отражателя (плоский или конический) на максимальную температуру топливной соли в активной зоне, образование в ней вихревых течений, максимальную температуру отражателей.

В качестве исходных данных теплогидравлического расчета принимали трехмерное распределение энерговыделения, полученное в нейтронно-физических расчетах по программам MCNP и MCU для активной зоны ЖСР-С с отражателем толщиной 0,2 м в равновесном состоянии (рис. 2). Суммарное энерговыделение в результате $n+\gamma$ -излучения составило около 2,2 и 1,7% мощности реактора соответственно для графитового отражателя и отражателя из сплава ХН80МТЮ. Проанализированы следующие варианты охлаждения отражателей:

одностороннее — топливной солью активной зоны;



Р и с. 2. Энерговыделение в ЖСР-С с графитовым отражателем по радиусу и высоте активной зоны

двухстороннее — охлаждение со стороны активной зоны и кольцевого зазора между корпусом реактора и отражателями;

разбивка отражателя на несколько слоев и организация протока топливной соли в щелях между слоями (продольное течение);

охлаждение отражателей, представляющих собой набор кубических элементов с зазорами между ними, при этом топливная соль течет преимущественно в поперечном направлении.

В варианте с отражателем из сплава ХН80МТЮ полная тепловая мощность составит 40 МВт, максимальное энерговыделение ~ 9 МВт/м³. Оценки показали, что в первых двух вариантах охлаждения максимальный температурный перепад в слое отражателя толщиной 0,2 м с коэффициентом теплопроводности 60 Вт/(м·К) будет превышать 1500 К, поэтому эти варианты неприемлемы. Наиболее предпочтительным является вариант охлаждения пористых отражателей малым расходом топливной соли (2% суммарного), который был принят для дальнейшего анализа. Сравнительно большая площадь проходного сечения отражателя обеспечивает небольшую скорость теплоносителя $\sim 0,06$ м/с и перепад давления в слое $\sim 3,7$ кПа. Было показано, что в отражателе из элементов кубической формы с размером ребра около 70 мм и теплопередачей со всех граней теплоносителю, прокачиваемому через зазоры шириной 1 мм, максимальный перепад температуры в элементе не превысил 100 К.

Теплогидравлический анализ активной зоны с отражателями выполнен с помощью кода Flow Vision [5]. Рассматривалась сопряженная задача — теплогидравлика активной зоны и теплопроводность в отражателях. Теплообмен в отражателях рассчитывали в приближенной постановке, приводящей к консервативной оценке максимальной температуры. Задавали равномерный расход по наружной поверхности отражателей, не учитывали растечки тепла в теплоносителе. Энерговыделение по толщине отражателя аппроксимировали функцией $q_{v,r}(l)$, где l — координата, отсчитываемая от входа теплоносителя в пористый слой отражателя (от наружной поверхности). При этих допущениях распределение температуры топливной соли по толщине описывается уравнением

$$t_f = t_{\text{вх}} + \int_0^l \frac{q_{v,r}}{G c_r} dl,$$

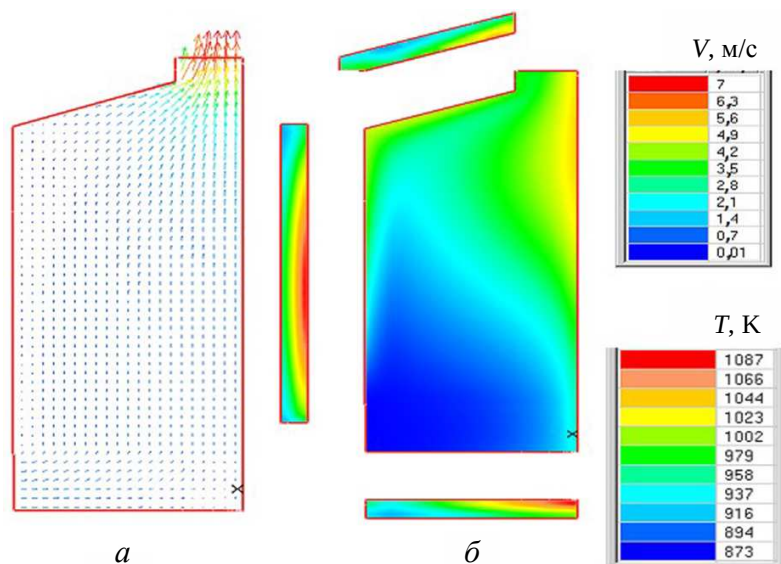
где $t_{\text{вх}}$ — температура топливной соли на входе; G — расход топливной соли в отражателях, отнесенный к площади суммарного проходного сечения; c_r — теплоемкость отражателя. Сток тепла из элемента отражателя в топливную соль вводился в уравнение теплопроводности как $-k_r(t_r - t_f)$, где k_r — объемный коэффициент теплопередачи от элемента отражателя к топливной соли; t_r — температура отражателя; t_f — температура топливной соли. Если ориентироваться на расчет максимальной температуры в каждом элементе, выражение для объемного коэффициента теплопередачи k_r можно записать в виде

$$\frac{1}{k_r} = \frac{1}{\alpha_r} + \frac{l_e^2}{8\lambda_r},$$

где α_r — объемный коэффициент теплоотдачи в зазорах между элементами; l_e — длина ребра элемента отражателя; λ_r — коэффициент теплопроводности отражателя.

Расчетное энерговыделение в активной зоне аппроксимировали функцией от координат. Система дифференциальных уравнений реализована в конечно-разностном виде со вторым порядком точности. Для решения системы линейных алгебраических уравнений использовали метод Холесского. Итерационный процесс по нелинейностям заканчивали при достижении заданной относительной точности 10^{-3} . В силу особенностей кода FlowVision, в котором отсутствует возможность непосредственного решения двумерной осесимметричной задачи, активная зона реактора рассматривалась в трехмерной декартовой системе координат на разностной сетке x, y, z ($81 \times 48 \times 48$) с суммарным числом рабочих ячеек 83 094.

Были проанализированы различные варианты организации входа-выхода топливной соли для цилиндрической активной зоны с охлаждаемыми отражателями. Средняя осевая скорость потока в активной зоне равна около 0,5 м/с. В варианте с высотой входного окна 0,1 м скорость на входе составляет около 4,4 м/с. На выходе из активной зоны в отверстии диаметром 1 м она увеличивается до 7 м/с. В этих условиях примерно на трети периферии активной зоны по радиусу формируются две вихревые рециркуляционные области, отесняющие основной поток от оси активной зоны. Причиной подобного



Р и с. 3. Скорость (а) и температура топливной соли (б) молярного состава $58\text{NaF}—15\text{LiF}—27\text{BeF}_2 + \text{AnF}_3$ в продольном сечении активной зоны с графитовым отражателем, высотой бокового окна 0,5 м и перфорированной плитой пористостью 32% на входе

распределения скорости является пониженное давление на входе в активную зону из-за большой скорости топливной соли, которое приводит к ее подосу.

Вариантные расчеты сопряженной задачи теплогидравлики (активная зона—отражатели из сплава ХН80МТЮ или графита) позволили достичь выравнивания поля скорости за счет увеличения высоты входного окна с 0,1 до 0,5 м и изменения геометрии верхнего торцевого отражателя с плоской на коническую. Выравнивание поля скорости привело к значительному снижению максимальной температуры топливной соли в активной зоне с 1385 до 1107 К. Максимальная температура радиального отражателя составила 1142 К, нижнего и верхнего — 1098 и 1085 К соответственно. Однако в нижней части на периферии активной зоны сохранилась небольшая рециркуляционная область.

Перфорированная плита (распределительная решетка) пористостью 32% на входе в активную зону позволит полностью ликвидировать рециркуляционные области и снизить максимальную температуру топливной соли до 1034 К, что всего на 46 К выше средней на выходе из активной зоны. Перепад давления на перфорированной плите составит 3,7 кПа, максимальная температура бокового отражателя 1119, нижнего и верхнего — 1096 и 1063 К соответственно. Оценки показали, что для суммарного расхода топливной соли через отража-

тели на уровне 2% (200 кг/с) ширина зазоров между элементами должна быть уменьшена до 0,6 мм. Для равномерного расхода по наружной поверхности отражателей ширина щели между корпусом и отражателем должна быть не меньше 1 см.

Переход к графитовому отражателю существенно не изменил характеристики активной зоны (скорость и температуру) и отражателей (рис. 3). Максимальная температура теплоносителя в активной зоне увеличилась на 2 К и составила 1036 К. Температура бокового отражателя снизилась по сравнению с аналогичным вариантом с отражателем, выполненным из высоконикелевого сплава ХН80МТЮ, с 1119 до 1087 К, нижнего и верхнего отражателя — на 10 и 20 К соответственно.

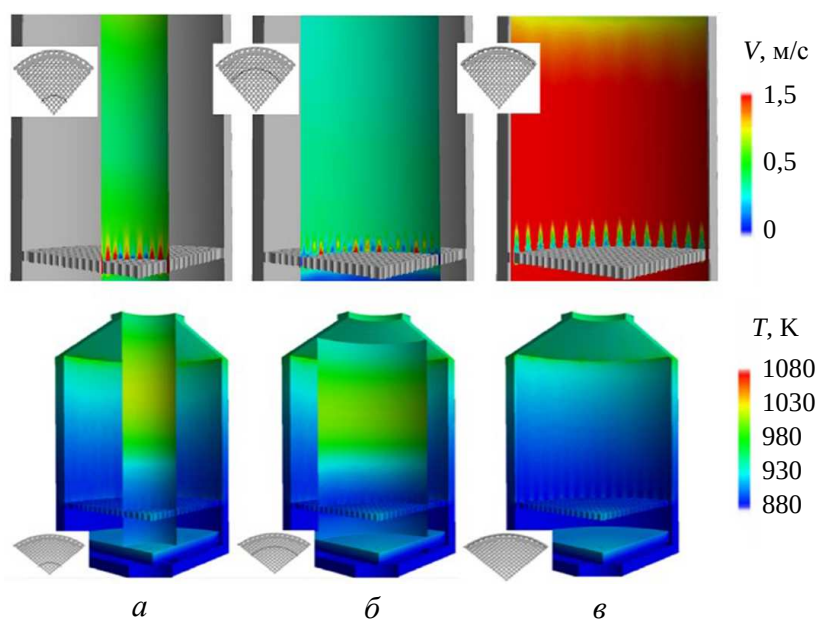
Для верификации теплогидравлических характеристик активной зоны ЖСП-С дополнительно были проведены две серии расчетов: в университете NTHU (Тайвань) с помощью кода ANSIS FLUENT [6] и в лаборатории INOPRO (Франция) с параллельным расчетом по кодам FLUENT и Open Foam [7]. В обеих сериях для моделирования турбулентного переноса также применяли стандартную двухпараметрическую $k-\epsilon$ -модель. Для моделирования одной четверти активной зоны приняты симметричные граничные условия. Теплогидравлические характеристики активной зоны ЖСП-С рассчитаны для варианта компоновки с использованием распределительной плиты и при высоте входного окна 0,5 м. В области распределительной плиты с разной пористостью использовали квадратную решетку отверстий диаметром 6, 10 и 14 см. Основная задача расчетов состояла в повышении эффективности теплосъема со стенки активной зоны в зависимости от диаметра отверстий в распределительной плите, определении скорости и температуры по высоте входного окна активной зоны, радиусу распределительной плиты и их влияния на возможность образования вихревых течений топливной соли в активной зоне.

При использовании распределительной плиты с диаметром отверстий 6 см наблюдали равномерный расход и сильную турбулентность потока на выходе из отверстий, а также близкую

к стенке отражателя зону рециркуляции, что привело к эффективному теплоотводу в центре активной зоны и образованию локальных высокотемпературных пятен около стенки радиального отражателя. Увеличение диаметра отверстий до 10—14 см ослабляло рециркуляцию в районе распределительной плиты, повышало температуру топливной соли в центре активной зоны и обеспечивало эффективный теплоотвод от стенки радиального отражателя. Расчеты [6] показали возможность дальнейшего снижения температуры стенки активной зоны до 985 К по сравнению с начальным вариантом за счет увеличения диаметра ближнего к радиальному отражателю ряда отверстий до 10 см. Предложено использовать отверстия диаметром 6 см до радиуса плиты менее 1,5 м и диаметром 10 см на радиусе плиты 1,5—1,7 м. Эффективная пористость плиты составила 35%. Сравнительные результаты расчета приведены в таблице, профилирование входной плиты и распределение скоростей и температуры показано на рис. 4.

Расчеты показали, что гомогенный поток может быть организован с помощью определенного выбора отверстий плиты на входе и их размера, что должно уменьшить расход на периферии и увеличить его в центральной части активной зоны. Следует также обратить внимание на механические нагрузки и потери давления на распределительной плите.

Топливный и промежуточный контур. Основные задачи ЖСП-С — создание концепции



Р и с. 4. Продольное распределение скорости (вверху) и температуры (внизу) в активной зоне ЖСП-С с топливной солью молярного состава $58\text{NaF}—15\text{LiF}—27\text{BeF}_2 + \text{AnF}_3$ и профилированной перфорированной плитой пористостью 35% на входе: а, б, в — радиальное сечение 0,5, 1,1, 1,65 м соответственно

в рамках технологических ограничений, использование материалов и оборудования с хорошо изученными свойствами. В соответствии с этими задачами в качестве прототипа схемы и оборудования топливного контура ЖСП-С был выбран разработанный в ORNL (США) проект реактора MSBR [8]. В ЖСП-С, как и в MSBR, топливная соль прокачивается через активную зону снизу вверх с помощью четырех параллельно работающих насосов. Каждый насос прокачивает соль через один из четырех теплообменников и возвращает ее в общий коллектор в нижней части корпуса реактора. Реактор имеет сварной цилиндрический корпус для работы под давлением из сплава ХН80МТЮ наружным

Температура топливной соли и стенки активной зоны ЖСП-С

Параметр	Расчетный код		
	FlowVision	ANSIS FLUENT	FLUENT Open Foam
	Молярный состав топливной соли		
	$15\text{LiF}—58\text{NaF}—27\text{BeF}_2 + \text{AnF}_3$	$15\text{LiF}—58\text{NaF}—27\text{BeF}_2 + \text{AnF}_3$	$73\text{LiF}—27\text{BeF}_2 + \text{AnF}_3$
Температура топливной соли, К:			
на входе	873	873	873
на выходе	988	988	973
средняя	933	943	923
максимальная	1034	1024	1192
Максимальная температура стенки, К	1119	985	947

диаметром 4,5 м, толщиной стенки 5,5 см, закрытый фасонной крышкой, которая соединяется с корпусом посредством герметизирующего фланца, вынесенного в область приемлемой температуры. Корпус опирается на тангенциальные опоры, закрепленные на строительных конструкциях здания. Внутри корпуса размещены опорные металлоконструкции для нижнего торцевого и бокового отражателей. Снизу по четырем патрубкам через входной коллектор диаметром 88 см подводится топливная соль. Во внутреннем объеме корпуса топливная соль проходит через кладку элементов нижней защиты, нижнего торцевого отражателя, откуда большая часть расплава поступает в центральную область, меньшая — в каналы охлаждения отражателя и зазоры между отражателем и защитой, защитой и стенкой корпуса реактора. Доля топливной соли в отражателе менее 2% объема отражателя. Пройдя активную зону и боковые элементы отражателя и защиты, она поступает в верхний сборный коллектор, откуда распределяется по четырем трубопроводам внутренним диаметром 45 см в равноценные контурные петли. Размер по осям подводящих и отводящих трубопроводов составляет 6 м. Габаритный размер корпуса по высоте составляет 11,2 м.

В каждой из четырех петель топливная соль поступает на вход четырех параллельно включенных циркуляционных насосов подачей около $1,17 \text{ м}^3/\text{с}$. Из напорной камеры насосов топливная соль, двигаясь сверху вниз в трубах кожухотрубчатого теплообменника промежуточного контура тепловой мощностью 625 МВт, охлаждается до 873 К. Выходная камера активной зоны и напорная камера циркуляционных насосов связаны с буферной емкостью, через которую под напором работающих насосов осуществляется постоянная циркуляция топливной соли для обеспечения сепарации из расплава газообразных продуктов деления. Для интенсификации сепарации объем топливной соли в буферной емкости насыщается пузырьками гелия. Здесь происходит разделение газовой и жидкой фазы с почти 100%-ной эффективностью.

Секции теплообменника промежуточного контура подключены по входу и выходу теплоносителя второго контура к кольцевым коллекторам, расположенным вне моноблока реакторного бокса. К кольцевым коллекторам под-

ключены, в свою очередь, четыре петли теплообмена, каждая из которых включает в себя циркуляционный насос центрифужного типа подачей $\sim 1,23 \text{ м}^3/\text{с}$ и два параллельно включенных по второму контуру парогенератора.

Теплоноситель второго контура отдает тепло в парогенераторе, где образуется надкритический пар давлением 24 МПа и температурой 811 К. Полный тепловой к.п.д. составляет около 44%. Специальные вентили обеспечивают перераспределение воды между парогенератором и подогревателями для обеспечения температуры пара на выходе 811 К. Такая температура необходима для предотвращения замерзания промежуточного теплоносителя в парогенераторе, что также обеспечивает высокий тепловой к.п.д. турбогенератора.

Плановое и аварийное дренирование топливной соли и теплоносителя второго контура осуществляется под действием гравитационных сил в сливные баки. Дренирование теплоносителя проводится через трубопровод, связывающий входную камеру активной зоны со сливными баками. Каждый из сливных баков имеет систему пассивного теплоотвода на основе тепловых труб и радиаторов воздушного охлаждения.

В качестве теплоносителя второго контура предлагается эвтектическая смесь молярного состава $92\text{NaBF}_4\text{—}8\text{NaF}$, которая значительно дешевле топливной соли и имеет более низкую температуру плавления 658 К. Эта композиция имеет давление насыщенных паров 33 кПа при 893 К и может работать с растворенной смесью BF_3 в гелии, выполняющем функцию защитного газа. Если фторборат натрия свободен от окисляющих примесей и воды, то согласно данным ранее проведенных петлевых коррозионных испытаний скорость равномерной коррозии сплава ХН80МТЮ при взаимодействии с ним в условиях, моделирующих работу реактора, составит менее 20 мкм/год.

В соответствии с выбранной компоновкой первого и второго контуров были оценены характеристики теплообменного оборудования для скоростных режимов движения топливной соли и промежуточного теплоносителя. Расчетные оценки выполнены при следующих допущениях:

противоточная схема теплообменника;

скорость топливной соли и промежуточного теплоносителя в контурах $v_1 = v_2 = 5$ м/с;

мощность теплообменного оборудования $2,4 \cdot 10^9$ Вт,

расход топливной соли 10^4 кг/с;

температура топливной соли на входе 873 К, на выходе 988 К;

температура промежуточного теплоносителя на входе 723 К, на выходе 893 К;

теплообменник из прямых труб диаметром 10 мм, толщина стенки 1 мм;

топливная соль течет внутри, теплоноситель второго контура снаружи труб;

теплоноситель промежуточного контура подается по центру теплообменника сверху вниз;

скорость теплоносителя промежуточного контура в опускной трубе равна скорости в подъемной части.

В этом случае общий объем топливной соли в четырех теплообменниках составит $6,2 \text{ м}^3$. Для входных и выходных коллекторов теплообменников необходимо еще $0,2 \text{ м}^3$ топливной соли, или $0,8 \text{ м}^3$ на четыре теплообменника, суммарный объем топливной соли в теплообменниках составит 7 м^3 . Таким образом, при тепловой мощности реактора 2400 МВт температура топливной соли на входе/выходе составит 873/988 К, расход 10 т/с, скорость 5 м/с. Расход теплоносителя промежуточного контура 9,4 т/с.

Параметры теплообменника: шаг между трубами 12,2 мм, внутренний диаметр опускной трубы 0,57 м, диаметр одного теплообменника 1,05 м, наружный диаметр труб 10 мм, суммарное число трубок 18 591, длина 6,6 м. Коэффициенты теплоотдачи на внутренней/внешней поверхности 17,1/17,7 кВт/м². Суммарный коэффициент теплопередачи в теплообменниках между топливным и промежуточным контурами 5,7 кВт/м².

Гидравлические потери, кПа: 660 в теплообменниках, 3,7 в активной зоне, 180 в трубопроводах, 840 суммарные в топливном контуре.

Распределение топливной соли по реакторному контуру ЖСР-С составит, м³: 40,4 корпус реактора, 8 теплообменник, 4 главный циркуляционный насос, 3,4 трубопроводы, 0,4 байпас вывода газообразных продуктов деления. Суммарный объем топливной соли в реакторном контуре ЖСР-С $56,2 \text{ м}^3$.

Следует отметить, что обоснование ЖСР-С во многом зависит от знания закономерностей

теплообмена топливной соли. В случае ЖСР-С теплогидравлическому обоснованию активной зоны полостного типа и топливного контура реактора предшествовало создание экспериментальной базы данных физических свойств топливной соли молярного состава $73\text{LiF}—27\text{BeF}_2 + \text{AnF}_3$ и $58\text{NaF}—15\text{LiF}—27\text{BeF}_2 + \text{AnF}_3$, которая позволила не только провести теплогидравлическое обоснование, но и была использована в том числе при расчете характеристик безопасности системы [1, 2, 4, 9].

Оптимизированная активная зона ЖСР-С мощностью 2400 МВт удовлетворяет двум важным требованиям теплогидравлики: отсутствуют рециркуляционные и застойные области и максимальная температура твердых отражателей достаточно низка, что позволяет их использовать в течение длительного периода времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Игнатьев В.В., Фейнберг О.С., Загнитко А.В. и др. Жидкосольевые реакторы: новые возможности, проблемы и решения. — Атомная энергия, 2012, т. 112, вып. 3, с. 157—165.
2. Feynberg O., Ignatiev V., Surenkov A. e.a. Advanced reactor technology options for utilization and transmutation of actinides in spent nuclear fuel: molten salt reactor with fertile free fuel. — In: IAEA TECDOC-1626. Vienna, IAEA, 2009, p. 128—168.
3. Новиков В.М., Игнатьев В.В., Федулов В.И., Чередников В.Н. Жидкосольевые ЯЭУ: перспективы и проблемы. М.: Энергоатомиздат, 1990. 102 с.
4. Khokhlov V., Ignatiev V., Afonichkin V. Evaluating physical properties of molten salt reactor fluoride mixtures. — J. Fluorine Chem., 2009, 130, p. 30—37.
5. Система моделирования движения жидкости и газа FlowVision. Версия 2.5. М., ООО «ТЕСИС», 1999—2008.
6. Chang C., Chin Pan. Numerical simulation for the design of MOSART flow distributor. — In: Rus. Sci. Sym. on Nuclear Research and Medical Application. Taiwan, NTHU, 11 January, 2011, p. 95—106.
7. Tuyen V., Rouch H. Thermal-hydraulic simulations: two core shape comparison and inlet diameter effects. — In: FP6 EVOL Project Workshop: WP2 Design and Safety. Grenoble, France, March 6—7 2012, p. 163—184.
8. Program Plan for Development of Molten Salt Breeder Reactors. Rep. ORNL-5018, 1974.
9. Ignatiev V., Feynberg O., Afonichkin V. e.a. Molten salt actinide recycler & transforming system without and with Th—U support: fuel cycle flexibility and key material properties. — Ann. Nucl. Energy, 2014, v. 64, p. 408—420.

Поступила в Редакцию 5.04.18