

Суммарная протечка теплоносителя во второй контур, рассчитанная по удельной активности трития в теплоносителе и воде второго контура

Цикл	Активность трития, Бк/кг		Суммарная протечка, кг	Примечания
	в теплоносителе первого контура	в воде второго контура		
n	$4,1 \cdot 10^8$	$2,6 \cdot 10^3$	0,12	
$n + 1$	$2,4 \cdot 10^8$	$1,4 \cdot 10^4$	1,05	Турбогенераторный режим. Ввод в работу реактора ($0 \rightarrow 20\%$)
$n + 2$	$3,1 \cdot 10^8$	$5,4 \cdot 10^3$	0,33	Турбогенераторный режим. Ввод в работу реактора ($0 \rightarrow 30\%$)
	$2,5 \cdot 10^8$	$9,3 \cdot 10^3$	0,66	Турбогенераторный режим. Ввод в работу реактора ($0 \rightarrow 20\%$)

протечку. Это предположение было подтверждено анализом проб шихты из ионообменных фильтров второго контура после окончания кампании, в которых зафиксировали ^{137}Cs и ^{134}Cs . Согласно расчетам суммарная масса теплоносителя, поступившего во второй контур за период загрузки ионообменных фильтров, составляла ~ 20 кг.

Таким образом, можно сделать вывод, что разработанные методы, обладая такими возможностями, как высокая чувствительность обнаружения протечки ($0,05$ кг/ч), количественная, а не качественная оценка суммарной протечки, независимость радиометрического метода от режимов эксплуатации паропроизводящей установки, позволяют расширить информативность и обеспечить надежность контроля межконтурной герметичности для диагностики и мониторинга состояния контурного оборудования. Использование предложенных методов в совокупности с штатными дает возможность создать измерительно-информационную систему непрерывного и дискретного контроля герметичности парогенераторов транспортных ЯЭУ в целях его совершенствования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Холупкова Г.И. Технологический радиационный контроль. — В кн.: Машиностроение. Энциклопедия. М.: Машиностроение. Машиностроение ядерной техники, 2005, т. IV, кн. 2, с. 136—142.
2. Бредихин В.Я., Раков В.Т., Змитродан А.А. Способ контроля межконтурной герметичности судовой ядерной энергетической установки с водным теплоносителем. Патент РФ № 2203510. — Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 2003, № 12, с. 234.
3. Бредихин В.Я., Раков В.Т. Способ контроля герметичности парогенератора ядерной энергетической установки. Патент РФ № 2191437. — Там же, 2002, № 29, с. 417.
4. Раков В.Т. Совершенствование контроля герметичности парогенераторов судовых ядерных энергетических установок. — Ядерные измерительно-информационные технологии, 2005, № 1(13), с. 17—20.
5. Делайе Дж., Гио М., Ритмюллер М. Теплообмен и гидродинамика двухфазных потоков в атомной и тепловой энергетике. Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1984.

Поступило в Редакцию 22.07.11

УДК 621.039.534

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАССОПЕРЕНОСА ПРИМЕСЕЙ В ХОЛОДНЫХ ЛОВУШКАХ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ

*Кумаев В.Я., Алексеев В.В., Козлов Ф.А., Пирогов Э.П.
(ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск)*

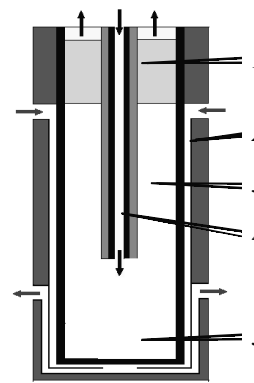
Математическая модель процессов в холодной ловушке. Для описания очистки натрия использована система уравнений многокомпонентной среды, включающая в себя уравнения гидродинамики, сохранения и переноса тепловой энергии, физико-химической кинетики примесей, сохранения и кон-

вективно-диффузионного переноса компонентов примеси [1—3]. В уравнениях переноса компонентов примеси с учетом расслоения учитываются диффузионные процессы. Уравнение для определения концентрации примеси в двумерной цилиндрической области имеет вид

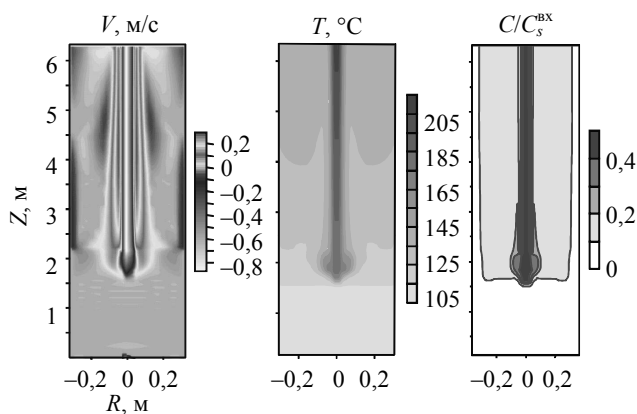
$$\frac{\partial C^n}{\partial \tau} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r C^n U) + \frac{\partial}{\partial z} (C^n V) = - \frac{\partial}{\partial z} (C^n \Delta w^n) + \sum_{p=1}^N Q^{np} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r D^n \frac{\partial C^n}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} D^n \frac{\partial C^n}{\partial z},$$

где C^n — концентрация компонента n примеси; n, p — номер переносимых примесей; τ — временная координата; r, z — радиальная и осевая координаты области; U, V — радиальная и аксиальная проекция вектора скорости среды соответственно; D^n — коэффициент диффузии компонента n примеси, равный сумме коэффициентов молекулярной и турбулентной диффузии; Δw^n — осевая проекция скорости расслоения (скорости относительного движения) компонента n примеси в потоке натрия; Q^{np} — массовый источник компонента n , образующегося из компонента p примеси. Принимаются следующие допущения. Примесь существует в среде в виде раствора и твердых частиц. Среда считается несжимаемой с зависимыми от температуры теплофизическими свойствами. Растворенная примесь и твердые частицы не влияют на гидродинамику, теплообмен и теплофизические свойства натрия. Твердые частицы переносятся потоком натрия и могут двигаться относительно среды в вертикальном направлении под действием силы тяжести. Твердые частицы возникают при концентрации растворенной примеси выше критической. Частицы образуются мгновенно, концентрация растворенной примеси снижается до концентрации насыщения тоже мгновенно. На распределение концентрации растворенной примеси и частиц влияет молекулярная, броуновская и турбулентная диффузия. На твердых поверхностях растворенная примесь кристаллизуется со скоростью, которая равна диффузионному потоку, пропорциональному разности концентрации примеси и насыщения. Скорость осаждения твердых частиц на поверхности определяется диффузионным потоком частиц, пропорциональным концентрации частиц дисперсной фазы. Система уравнений многокомпонентной среды решается конечно-разностными методами [4, 5].

Расчет скорости, температуры, концентрации растворенной примеси для холодной ловушки быстрого реактора. Для расчетной области холодной ловушки, приведенной на рис. 1, рассчитывали скорость течения, температуру и концентрацию растворенной примеси в натрии (рис. 2). Расчетная область охватывала часть ловушки от входа натрия в рабочую полость до дна зоны отстоя и включала в себя подводную натрий трубу, рабочую полость, кольцевой канал с охлаждающим аргоном, фильтр, изоляционные материалы и газовые полости. В качестве исходных данных задавали температуру натрия и аргона на входе, давление аргона, коэффициент теплоотдачи к аргону. На входе в рабочую полость в



Р и с. 1. Расчетная модель холодной ловушки: 1 — фильтр; 2 — изоляция; 3 — рабочая полость; 4 — труба, подводная очищаемый натрий; 5 — отстойник; ↑, → — место подвода, отвода натрия и охлаждаителя



Р и с. 2. Изолинии вертикальной проекции скорости течения натрия, температуры и концентрации растворенной примеси в рабочей полости: V — вертикальный компонент скорости; T — температура натрия; C/C_s^{bx} — концентрация насыщения растворенной примеси на входе в опускную трубу; C/C_s^{bx} — относительная концентрация растворенной примеси в рабочей полости

качестве граничных условий задавали концентрацию растворенной примеси, отнесенную к концентрации насыщения при входной температуре. Задачу решали методом установления стационарного состояния из заданного начального. В качестве начального приближения принимали следующие параметры: концентрация растворенной примеси равна концентрации на входе в ловушку, скорость натрия и аргона равна нулю, температура во всей расчетной области равна температуре натрия на входе.

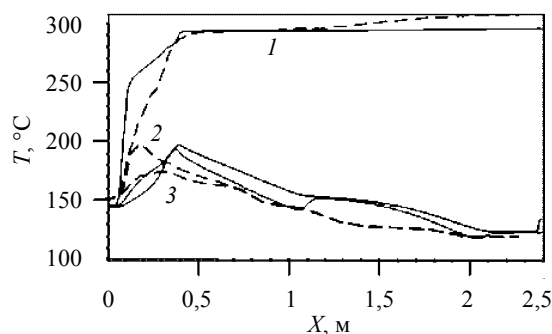
Расчеты выполняли в предположении, что наличие примесей в потоке натрия не влияет на гидродинамику и теплообмен в расчетной области. При расчете процессов с большей длительностью необходимо учитывать влияние отложений на гидродинамику потока натрия и теплообмен. Такой учет предусмотрен в разработанном алгоритме и расчетном коде. Перенос и осаждение примесей рассчитывали после предварительного нахождения установившейся скорости и температуры. Длительность процесса уста-

новления принималась равной 5 ч расчетного времени. После установления стационарного режима по температуре и скорости течения теплоносителя на входе в ловушку задавали концентрацию оксида натрия, и счет времени начинали с нуля.

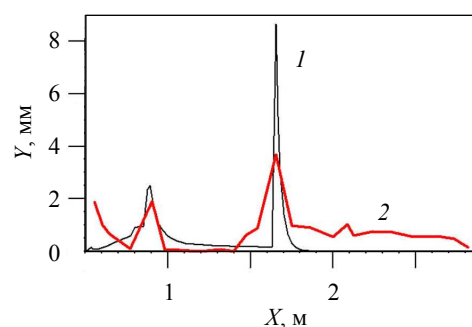
Рассмотрены процессы относительно небольшой длительности по времени 10—15 ч, что соответствует выходу системы в стационарное состояние. Отмечается сложная картина движения натрия, включающая область струйного течения, зоны рециркуляции и застойные зоны. На характер движения натрия значительно влияют силы естественной конвекции, связанные с градиентом температуры. Так, на охлаждаемой поверхности в верхней части рабочей полости движение натрия направлено вниз против основного потока. Вдоль поверхности подводящей трубы, имеющей более высокую температуру, движение направлено вверх (см. рис. 2). Скорость струйного течения затухает почти до нуля на расстоянии 1 м от выходного сопла подводящей трубы. В объеме отстойника образуется зона рециркуляции натрия с малой скоростью, равной 1—2 мм/с. На периферии зоны движение направлено вниз вдоль внешней охлаждаемой стенки, в центре зоны — вверх. Для холодных ловушек быстрых реакторов увеличение расхода охлаждающего теплоносителя, уменьшение внутреннего диаметра, толщины стенки опускной трубы снижают концентрацию оксида на выходе из ловушки на 5—25%.

Тестирование кода на экспериментальных данных, полученных на модели холодной ловушки емкостью ~40 л с охлаждением натрий-калиевым сплавом. Длительность эксперимента составляла 110 ч [3]. Сравнение показало, что отклонение расчетной температуры от экспериментальной составляет не более 7 °С, различие в толщине слоя отложений примеси на поверхностях — в среднем около 30% (рис. 3, 4).

Заключение. Тестовые расчеты показали удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными, что позволяет расчетным путем находить параметры, повышающие эффективность работы холодной ловушки, и оценивать характер проходящих в ней процессов. Так, путем проведения серии расчетов было определено, что характер распределения слоя отложений оксида и расположение пиков отложений по высоте ловушки почти не изменяются для рассмотренных вариантов исходных параметров. Очевидна также необходимость повышения точности численных расчетов, которая зависит от используемых моделей расчета коэффициентов турбулентной вязкости и диффузии примесей, кристаллизации и коагуляции, констант физико-химических процессов.



Р и с. 3. Температура по высоте ловушки на оси симметрии (1), на расстоянии 0,03 (2), 0,06 м (3) от оси симметрии: —, --- расчет и эксперимент соответственно



Р и с. 4. Распределение отложений по высоте ловушки: 1, 2 — расчет и эксперимент соответственно

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кумаев В.Я., Алексеев В.В., Козлов Ф.А. Численное моделирование массопереноса примесей в холодных ловушках реакторов БН. Тезисы докл. сем. «Технология щелочных жидкометаллических теплоносителей (Теплофизика-2009)». Обнинск, ФЭИ, 2009, с. 64—66.
2. Kumaev V., Lebezov A., Alexeev V. Development and application of MASKA-LM code for calculation of thermal hydraulics and mass transfer of lead cooled fast reactors. — In: 11th Intern. Top. Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics (NURETH-11). Avignon, France, October 2—6, 2005, p. 191/1—191/6.
3. Козлов Ф.А., Волчков Л.Г., Кузнецов Э.К., Матюхин В.В. Жидкометаллические теплоносители ЯЭУ. Очистка от примесей и их контроль. Под ред. Ф.А. Козлова. М.: Энергоатомиздат, 1983.
4. Кумаев В.Я., Астахов В.К., Лебедев А.А., Лукин А.В. Разработка кода DINCOR-DGR для численного моделирования динамики плавления элементов и корпуса реактора ВВЭР-1000 в процессе тяжелой аварии. — В сб.: Вопросы безопасности АЭС с ВВЭР. Научно-практич. сем. Санкт-Петербург, 12—14 сентября 2000, т. 1, с. 24—37.
5. Кумаев В.Я., Лебедев А.А., Пышин И.В., Алексеев В.В. MASKA-LM — код для расчета массопереноса примесей в жидкометаллических контурах. Тезисы докл. Рос. конф. «Тепломассоперенос и свойства жидких металлов (Теплофизика-2002)». Обнинск, ФЭИ, 2002, т. 1, с. 295—298.