

Верификация модели физикохимических процессов в расплаве на внекорпусной стадии тяжёлой аварии

Моисеенко Е. В., Филиппов А. С., Киселёв А. Е. ИБРАЭ РАН, Москва

МНТК-2009 ОКБ «Гидропресс», Подольск 26 – 29 мая 2009

Современные требования к безопасности АЭС

При любом сценарии развития аварии на АЭС должна быть обеспечена целостность защитной оболочки



Способ обеспечения этих требований – УЛР (СУОРАЗ)

Устройство локализации расплава – «ловушка»



Назначение: прием, локализация и захолаживание расплава при авариях с разрушением АЗ и корпуса реактора

Основные функции:

 удержание днища корпуса реактора при его отрыве или пластическом деформировании до момента выхода кориума из корпуса

 Прием и размещение кориума и материалов ВКУ
Теплоотдача от кориума к охлаждающей воде и гарантированное захолаживание расплава до его затвердевания

Побеспечение подкритичности кориума в УЛР в процессе его охлаждения

 Минимизация выхода радиоактивных веществ и водорода
защита контейнмента и бетонной шахты от термического и механического воздействия кориума

Жертвенный материал

Обеспечивает:

- Уменьшение температуры расплава за счет интегрального эндотермического эффекта при взаимодействии жертвенного материала с расплавом кориума;
- □увеличение поверхности теплообмена между кориумом и охлаждающей водой в теплообменнике, уменьшение теплового потока на его стенке и увеличение запаса до кризиса теплообмена;
- инверсию оксидного и стального стратифицированных слоев ванны расплава;
- Эуменьшение химической активности кориума за счет окисления его компонентов жертвенным материалом;
- Минимизацию выхода водорода вследствие окисления металлического циркония, содержащегося в расплаве, при взаимодействии с керамическим жертвенным материалом на начальном этапе взаимодействия кориума и жертвенного материала;

Пгарантированную подкритичность расплава.

Состав:

Сталь + AI_2O_3 + Fe_2O_3 + Gd_2O_3 + бетон



Модель химии УЛР (код HEFEST-CC)



Модель химии УЛР (код HEFEST-CC)

На фронте плавления

Окисление циркония: $Zr + 2H_2O = ZrO_2 + 2H_2 + Q$ \checkmark Fe₂O₃ + 1.5Zr = 2Fe + 1.5ZrO₂ + Q

Окисление хрома и никеля: $Cr + 1.5H_2O = 0.5Cr_2O_3 + 1.5H_2 + Q$ $Ni + H_2O = NiO + H_2 + Q$ $Fe_2O_3 + 2Cr = 2Fe + Cr_2O_3 + Q$ $Fe_2O_3 + Ni = 2FeO + NiO + Q$

Восстановление гематита: \checkmark Fe₂O₃ = 2FeO + 0.5O₂ – Q

Окисление свободного железа: ✓ Fe + 0.5O₂ = FeO + Q Fe + H₂O = FeO + H₂ + Q

В объёме



Окисление хрома: Cr + $O_2 = Cr_2O_3 + Q$

Окисление никеля: Ni + 0,5 O₂ = NiO + Q

Неопределённости в расчёте

$$\Box Fe_2O_3 = 2FeO + 0.5O_2 - Q$$

Q = ?

Зависит от технологии приготовления ЖМ Рассматриваются значения от 230,0 до 513,7 кДж/моль Fe₂O₃

Состав ЖМ: ЖКМ или ПОЖА?

ПОЖА (67% $Fe_2O_3 + 33\% Al_2O_3$): 61 т Fe_2O_3 ЖКМ (95% $Fe_2O_3 + 5\% MnO_2$) + ПОЖА: 78,4 т Fe_2O_3

Влияние неопределённостей



Q ₍₁₎ ; кДж/моль	Q ₍₂₎ , кДж/моль	Теплота, выделившаяся при окиспении	Интегральная теплота реакций, Дж	
		Zr (13,9 т), Дж	ПОЖА+ ЖКМ	ПОЖА
513,7	-621,2	6,31 [.] 10 ¹⁰	-4,24 [.] 10 ¹⁰	-1,29 [.] 10 ¹⁰
340,0	-794,9	8,08.1010	4,29 [.] 10 ¹⁰	5,35 [.] 10 ¹⁰
256,8	-878,0	8,92.1010	8,37 [.] 10 ¹⁰	8,52 [.] 10 ¹⁰
242,7	-892,2	9,06 ⁻ 10 ¹⁰	9,06 [.] 10 ¹⁰	9,06 ⁻ 10 ¹⁰
230,0	-904,9	9,19 [.] 10 ¹⁰	9,69 [.] 10 ¹⁰	9,55 [.] 10 ¹⁰

Влияние неопределённостей

Зависимость времени инверсии слоёв



Разрешение неопределённостей, верификация

Эксперименты SACR (НИТИ им. Александрова)





1. Защитный бокс. 2. Жертвенный материал 3. Расплав кориума. 4. Индуктор. 5. Холодный тигель. 6. Кварцевая обечайка. 7. Вход и выход охлаждающей воды 8. Водоохлаждаемая крышка. 9. Смотровое окно для пирометра. 10. Вход газа. 11. Газовые баллоны. 12. Газовые редукторы. 13,14,15,16 Вентили. 17. Привод 18. Сливная воронка. 19. Пирометр спектрального отношения 20. Инфракрасный пирометр. 21. Основная аэрозольная магистраль 22. Крышки смотровых окон. 23. Главный фильтр. 24. Высокочастотный генератор. 25. Вентилятор



Исходный состав

Кориум С-100:

66 % UO₂ + 19 % ZrO₂ + 15 % FeO

Жертвенный материал:

89,7 % Fe₂O₃ + 3,6 % Na₂B₄O₇ + +6,7 % M500

Скорость взаимодействия

От 1,0 до 0,2 мм/с в зависимости от фазы эксперимента и режима нагрева



Расчётная скорость продвижения фронта плавления



Для режимов нагрева 20 кВт и выше хотя бы часть точек попадает в область экспериментальных значений



Шкала значений

2.33e+003

2.11e+003

1.88e+003

1.65e+003

1.43e+003

1.20e+003

9.77e+002

7.52e+002

5.26e+002

3.00e+002

Исходный состав Кориум С-32:

76 % UO₂ + 9 % ZrO₂ + 15 % Zr

Жертвенный материал:

85 % Fe₂O₃ + 15 % Al₂O₃

После взаимодействия (14 с)

65 % UO₂ + 20 % ZrO₂ + 2 % Zr + 0 % FeO + 3 % Al₂O₃ +10 % Fe



Расчётная концентрация циркония



Можно предположить, что теплота разложения гематита в блоке, применявшемся в эксперименте составляет 230-250 кДж/моль



Пеплота разложения гематита в составе ЖМ оказывает существенное влияние на процессы, проходящие в УЛР

Расчёты, проведённые с помощью кода HEFEST-УЛР, показали результаты, близкие к экспериментальным

П Разработан экспериментально-расчётный метод, позволяющий уменьшить неопределённость, связанную с теплотой разложения гематита

Спасибо за внимание!

http://www.moiseenko.ru/doc/gp.ppt