

УДК 666.7:621.039.58

АЛИ КАЛВАНД, С.В.ШИРОКОВ, И.В.КАЗАЧКОВ

## СИСТЕМА ЛОКАЛИЗАЦИИ РАСПЛАВА НА РЕАКТОРАХ ВВЭР-1000 НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

### Введение

Безопасность остается во всем мире приоритетной задачей при эксплуатации существующих и создании новых АЭС [1,2]. Под безопасностью АЭС обычно понимают такие их свойства, которые позволяют предотвратить или ослабить отрицательное воздействие радиоактивных веществ и ионизирующего излучения на персонал, население и окружающую среду. Для укрепления позитивного отношения общественности к ядерной энергетике необходима разработка АЭС с реакторами, обеспечивающими существенное повышение уровня безопасности. Это может быть достигнуто путем качественного улучшения свойств "внутренней самозащищенности" и широкого применения пассивных элементов (понятия "активные" и "пассивные" элементы соответствуют документу [3]) в системах безопасности, при одновременном упрощении и удешевлении проектных решений и повышении единичной мощности энергоблоков.

Современный уровень науки и техники позволяет уверенно прогнозировать скорое практическое внедрение таких технологий АЭС, для которых невозможна ситуация с тяжелым повреждением реактора, которая может стать причиной недопустимых выбросов радиоактивных веществ в окружающую среду. Эта технология получила название "Атомная энергетика, свободная от катастроф" или "АЭС четвертого поколения". Атомная электростанция, оснащенная такими технологиями в сочетании с конкурентоспособными экономическими характеристиками, будет служить надежным источником энергии.

### 1 Проблема локализации расплава и устройства для ее осуществления

Процент протекания тяжелой аварии может сопровождаться не только разрушением активной зоны или ее расплавлением, но и разрушением корпуса реактора, хотя это событие крайне мало вероятно. Эта стадия протекания тяжелой аварии является наиболее опасной, так как в случае нарушения целостности герметичной оболочки в результате воздействия на нее высокотемпературного и химически активного расплава в окружающую среду будут поступать не только газообразные, аэрозольные радиоактивные продукты, но также жидкие и твердые компоненты расплава. В этих условиях сохранение целостности (прочности и плотности) герметичной оболочки является первостепенной задачей. С точки зрения обеспечения целостности герметичной оболочки наиболее опасными являются два специфических момента протекания тяжелой аварии:

- момент разрушения корпуса реактора;
- период прямого воздействия расплава на герметичную оболочку.

Момент разрушения корпуса реактора является специфически опасным из-за сильных термомеханических воздействий на оборудование и строительные конструкции, расположенные внутри герметичной оболочки, которые, разрушаясь, оказывают опасное воздействие на саму герметичную оболочку. Момент прямого воздействия расплава на герметичную оболочку наступает после разрушения расплавом железобетонных конструкций внутренних помещений, расположенных на пути движения расплава к герметичной оболочке. В процессе взаимодействия расплава с конструктивными материалами и строительными конструкциями выделяются газы. Эти газы оказывают различное воздействие на герметичную оболочку:

- увеличивают давление в герметичной оболочке;
- увеличивают тепловое и динамическое воздействие на герметичную оболочку при диффузионном горении или взрыве газовых смесей;
- интенсифицируют процессы выноса радиоактивных аэрозолей;
- ускоряют процессы разрушения строительных конструкций.

Таким образом, на внекорпусной стадии тяжелой аварии должны быть предусмотрены меры для локализации расплава с целью предотвращения его воздействия на оборудование и строительные конструкции внутри герметичной оболочки и на саму герметичную оболочку. Обзор и детальный анализ проблемы по материалам зарубежных работ дан в [1,2]. Настоящая работа посвящена одному из вопросов, касающихся данной проблемы, связанному с разработкой устройств локализации расплава во время тяжелых аварий на АЭС. Рассматривается устройство ловушки расплавленного ядерного топлива, разработанной Россией, которое нашло заинтересованность специалистов и признано одним из наиболее перспективных для систем пассивной защиты от тяжелых аварий.

Целью статьи является анализ данного устройства и определение основных нерешенных задач моделирования теплогидравлических процессов в этом устройстве, которые могли бы послужить для его обоснования и возможного улучшения в будущем.

### 2 Описание устройства локализации расплава (УЛР)

УЛР разработано для Тяньваньской АЭС с реактором ВВЭР-1000 и предназначено для повышения безопасности энергоблока в процессе протекания тяжелой аварии, связанной с разрушением активной зоны и выходом расплава за пределы корпуса реактора. Устройство локализации расплава является одним из технических средств (мер), предусмотренных для управления тяжелыми авариями. Оно относится к 4 классу безопасности [3,4] и к первой категории сейсмостойкости [5], и имеет классификационное обозначение 4 в соответствии с [3]. Обоснование классификации УЛР представлено в [6]. Устройство локализации расплава при тяжелой аварии с разрушением активной зоны и корпуса реактора удерживает расплав и твердые фрагменты разрушенной активной зоны, части корпуса реактора и внутрикорпусные устройства. Локализация и охлаждение расплава осуществляется в пределах подреакторного помещения бетонной шахты неограниченное время. В течение первых 24 часов после аварии в условиях полного обесточивания АЭС локализация и охлаждение расплава обеспечивается при отсутствии дополнительной подпитки охлаждающей водой извне герметичной оболочки. Для обеспечения последующего надежного удержания расплава в устройстве необходимо обеспечить восполнение запаса воды. УЛР выполняет свои функции в режиме тяжелой аварии с выходом расплава. Во всех остальных режимах, соответствующих контрактному перечню [7], УЛР находится в режиме ожидания. Работоспособность сохраняется при нагрузках и параметрах окружающей среды всех

режимов работы АЭС вплоть до тяжелой аварии.

Если отсутствует возможность обеспечить охлаждение расплава, то герметичная оболочка будет разрушена в одном или нескольких местах. Эти разрушения могут быть произведены различными теплофизическими и физико-химическими механизмами со стороны расплава, например, излучением, химическим или термическим взаимодействием расплава с материалами, составляющими герметичную оболочку. С данными последствиями аварии и призвана бороться система локализации расплава, которая выполняет следующие основные функции:

- обеспечивает прием и размещение в своем объеме расплава и твердых фрагментов активной зоны и конструкционных материалов реактора;
- обеспечивает устойчивую передачу тепла от расплава к охлаждающей воде;
- удерживает днище корпуса реактора с расплавом при его отрыве или пластической деформации до момента выхода расплава из днища корпуса реактора;
- предотвращает выход расплава за установленные границы зоны локализации;
- обеспечивает подкритичность расплава в бетонной шахте;
- обеспечивает подачу воды в бетонную шахту и отвод пара из бетонной шахты;
- обеспечивает минимальный вынос радиоактивных веществ под герметичную оболочку;
- обеспечивает минимальный выход водорода;
- обеспечивает непревышение максимальных допустимых напряжений в конструкциях, расположенных в подреакторном помещении при статических и механических нагрузках;
- выполняет свои функции с минимальным участием оперативного персонала.

Конструкция УЛР представлена на рис. 1. УЛР состоит из следующих функциональных элементов, расположенных (сверху вниз) по направлению перемещения кориума из корпуса реактора к основанию бетонной шахты: плита нижняя; коллектор вентиляционный; корзина с наполнителем (жертвенным материалом); теплообменник секционный. Конструкция теплообменника представлена на рис. 2.

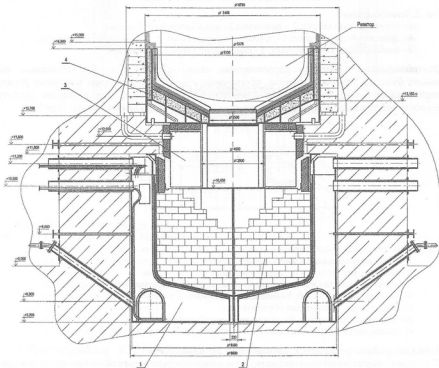


Рис.1. Устройство локализации расплава:

- 1 - теплообменник секционный; 2 - корзина с наполнителем;
- 3 - коллектор вентиляционный, 4 - плита нижняя

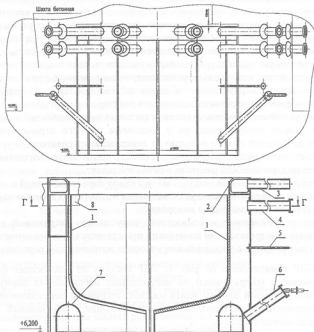


Рис. 2. Теплообменник:

- 1 - теплообменная секция; 2 - надставка; 3 - паросбросной трубопровод;
- 4 - дренажный трубопровод; 5 - трубопровод уровнемера; 6 - подводящий трубопровод;
- 7 - нижняя коллекторная вставка; 8 - подводящий короб с люком-лазом.

Вентиляционный коллектор спроектирован таким образом, что его составные части выполняют функции тепловых экранов, обеспечивающих защиту на стадии истечения расплава тепловой защиты бетонной консоли и в основания плиты нижней. Это позволяет увеличить длительность работы тепловых защит. Вентиляционный коллектор показан на рисунке 3.

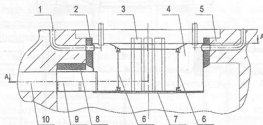


Рис. 3. Вентиляционный коллектор:

- 1 - канал подвода воздуха для охлаждения сухой защиты;
- 2 - тепловая защита торца бетонной консоли;
- 3 - опорная колонна (верхний силовой элемент фермы защитной);
- 4 - вентиляционный короб; 5 - бетонная консоль;
- 6 - гермодверь; 7 - площадка обслуживания;
- 8 - теплозащитный сектор; 9 - подводящий короб с люком-лазом;
- 10 - подводящий вентиляционный канал в стене бетонной шахты

### 3 Анализ работы устройства локализации расплава (УЛР)

В условиях нормальной эксплуатации плита нижняя обеспечивает тепловую изоляцию дна корпуса реактора и защиту от нейтронного и гамма-излучения подреакторного помещения бетонной шахты. При тяжелой аварии с разрушением корпуса реактора плита нижняя принимает поступающий из корпуса реактора расплав и направляет его в корзину с наполнителем. Плита

нижня так же воспринимает на себя динамические нагрузки, возникающие при разрушении корпуса реактора и выходе расплава, удерживает днище реактора при его отрыве или пластической деформации. Плита нижняя состоит из:

- силовых ребер и обечайек;
- тепловой изоляции (тонкие листы нержавеющей стали);
- подложки из цемента ЦКС;
- направляющего аппарата;
- тепловой защиты направляющего аппарата;
- тепловой защиты основания плиты нижней из бетона БГС;
- опорных колонн (верхний силовой элемент фермы защитной);
- спор-демпферов;
- каналов подвода воздуха к тепловой изоляции;
- биологической защиты из свинцовых плит.

В центральной части плиты нижней выполнено отверстие для прохода расплава, ограниченное направляющей обечайкой, предназначенной для ограничения диаметра разброса фрагментов расплава в процессе его стекания. В условиях нормальной эксплуатации плита нижняя обеспечивает тепловую изоляцию днища корпуса реактора и защиту от нейтронного и гамма-излучения подреакторного помещения бетонной шахты. Для выполнения этих функций плита нижняя оснащена тепловой изоляцией и биологической защитой. Тепловая изоляция и биологическая защита выполнены легко разрушаемыми, чтобы не препятствовать движению расплава. Элементы конструкции плиты нижней показаны на рис. 4.

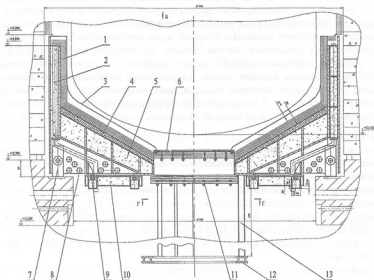


Рис. 4. Элементы конструкции плиты нижней

- 1 - тепловая изоляция периферийная;
- 2 - трубопровод подвода воздуха для охлаждения сегмента плиты нижней;
- 3 - силовое ребро; 4 - подложка; 5 - тепловая защита направляющего аппарата;
- 6 - тепловая изоляция центральная; 7 - опора-демпфер;
- 9 - крепежный элемент тепловой защиты основания плиты нижней;
- 10 - сегмент тепловой защиты основания плиты нижней;
- 11 - защита биологическая;
- 12 - кольцевая опора (верхняя часть фермы защитной);
- 13 - опорная колонна (верхний силовой элемент фермы защитной)

Функционирование УЛР во время тяжелой аварии определяется принятой концепцией локализации расплава. Концепция включает следующие характерные особенности:

- после проплавления корпуса реактора расплав кориума попадает в пространство, ограниченное сбоку и снизу водоохлаждаемыми стальными стенками секционированного теплообменника, расположенного в подреакторном пространстве бетонной шахты.

- водоохлаждаемое пространство частично заполнено жертвенным материалом из специально подобранной композиции стали и относительно легких и легкоплавких оксидов.
- поступающий из реактора в УЛР расплав кориума взаимодействует с жертвенным материалом, что оптимизирует условия теплоотвода, сглаживает неопределенности, обусловленные различием сценариев протекания тяжелой аварии, и обеспечивает инверсию металлической и оксидной компонент расплава до подачи воды на его поверхность.
- для охлаждения расплава используется вода, которая самотеком поступает из шахт ревизии ВКУ и топливного бассейна. Излишки воды сливаются за пределы бетонной шахты через каналы в верхней части теплообменника. Генерируемый в теплообменнике пар отводится в пространство контейнента через каналы, размещенные над теплообменником. Запаса охлаждающей воды достаточно для ее подачи в УЛР пассивным способом в течение 24 часов полного обесточивания АЭС.
- теплообменник обеспечивает отвод тепла от ванны расплава снизу и с боковой стороны.
- обеспечение инверсии металлической и оксидной компонент перед подачей воды на зеркало расплава гарантирует отсутствие паровых взрывов, т. к. безопасность подачи воды на расплав оксидов подтверждена результатами исследований [8].
- отсутствие воды в УЛР до момента поступления в него расплава обеспечивается конструктивными мерами.

Функционирование УЛР основано на пассивных принципах. Элементы конструкции УЛР рассчитаны на работу при параметрах и нагрузках всех определенных в проекте режимов. Эффективность УЛР обоснована серией расчетных анализов и экспериментальных исследований. УЛР обеспечивает выполнение заданных функций и на сегодняшний день является одной из наиболее перспективных пассивных систем защиты от тяжелых аварий на АЭС третьего поколения. Однако остается целый ряд проблем моделирования многофазных многокомпонентных потоков, которые могли бы до конца прояснить гидродинамическую и тепловую картину системы и ответить на некоторые спорные вопросы ее поведения. Так, например, проблемы, связанные с инверсией фаз, сегрегацией примесей в расплаве, влиянием неопределенности физических свойств кориума на основные сценарии его поведения и т.д.

#### Выводы

На основе проведенного в статье анализа можно поставить следующие задачи, решение которых могло бы послужить дальнейшему обоснованию работоспособности устройства локализации расплава и, возможно, его совершенствованию:

- моделирование процесса начального входа расплава кориума в ловушку и определение основных закономерностей растекания расплава в ловушке и его охлаждения,
- моделирование динамики оплавления блоков из сплава стали и алюминия с учетом тепловой конвекции расплава для ряда варьируемых параметров кориума,
- оценка времени плавления блоков и поля температур в системе до начала затвердевания расплава кориума,
- моделирование процесса застывания кориума,
- оценка времени выделенных основных этапов поведения кориума в ловушке.

#### Литература

1. Казачков И.В. Современное состояние и некоторые проблемы моделирования тяжелых аварий на зарубежных АЭС// Ядерная и радиационная безопасность.- 2003.- № 1.- С. 25-34.
2. Ali Hasan Moghaddam, Sejed Askhademi, Ivan Kazachkov. Modelling of a corium progression in reactor vessel and containment during severe accident at NPP/ 3rd Int. Conference on Energy and Environment CIEM2007, Bucharest, 22-23 November.
3. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. ОПБ-88/97 НП-001-97 (ПНАЭ Г-01-011-97), М., 1997.
4. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-008-89, М., Энергоатомиздат, 1990.
5. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. ПНАЭ Г-05-006-87, М., Госатомэнергодзор СССР, 1987.
6. LYG-X-PD86-29-52260000-TR-0026-E. Оценка классификации устройства локализации

расплава активной зоны. СПб АЭП. 2000.

7. Контракт на строительство АЭС № LYGNPP-R-97-002/85-265-47100, Приложение 1, Часть 1, Раздел 4.
8. LYG-X-PD86-29-53140000-TR-0059-R. Обоснование эффективности устройства локализации расплава при тяжелых авариях Тяньваньской АЭС с ВВЭР-1000. СПб АЭП №, 2001.

УДК 536.248.2