

А. А. Чуклин, Д. В. Шевелев

Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности, г. Севастополь, Украина

Влияние учета рециркуляции в парогенераторе на динамику переходных процессов реакторной установки, рассчитанных с помощью кода Melcor

Рассматривается вопрос моделирования энергоустановки с использованием кода Melcor. Сравниваются две модели энергоустановок с парогенератором, заданным одним объемом и заданным тремя объемами. Разделение объема парогенератора выполняется для оценки влияния рециркуляции пароводяной смеси второго контура на процессы, проходящие в реакторной установке.

Ключевые слова: численное моделирование, Melcor, парогенератор, рециркуляция, атомные электрические станции, безопасность, тепломассообмен.

О. О. Чуклін, Д. В. Шевельов

Вплив урахування рециркуляції в парогенераторі на динаміку перехідних процесів реакторної установки, розрахованих з використанням коду Melcor

Розглядається питання моделювання енергоустановки з використанням коду Melcor. Порівнюються дві моделі енергоустановок з парогенератором, заданим одним об'ємом і заданим трьома об'ємами. Поділ об'єму парогенератора виконується для оцінки впливу рециркуляції пароводяної суміші другого контуру на процеси, що проходять в РУ.

Ключові слова: чисельне моделювання, Melcor, парогенератор, рециркуляція, атомні електричні станції, безпека, тепломасообмін.

© А. А. Чуклин, Д. В. Шевелев, 2011

Расчетная программа Melcor разработана в Национальной лаборатории Sandia (США) по заказу US NRC и является интегральным кодом, предназначенным для моделирования всего спектра явлений, сопровождающих протекание тяжелых аварий на АЭС с легководяными реакторами от момента возникновения исходного события до достижения конечного состояния.

В рамках региональных проектов МАГАТЭ RER/9/004 и RER/9/020 программа Melcor была принята к использованию для АЭС с реакторами ВВЭР-440 и ВВЭР-1000.

Отличительной чертой программы является ее универсальность, позволяющая моделировать запроектные режимы и целый ряд процессов, специфичных для тяжелых аварий, в том числе деградацию активной зоны, перенос и поведение радионуклидов, образование, распространение и горение водорода, процессы в бетонной шахте реактора, поведение тепловых структур и т. п. Развитый аппарат позволяет проводить логическое моделирование условий работы и автоматического переключения систем и оборудования.

Для безопасной и качественной работы АЭС необходимо знать параметры энергоустановки при ее нормальной эксплуатации и в аварийных режимах. Получение информации с реальных объектов о протекании аварийных ситуаций невозможно. Для решения этой задачи используют математические коды, например RELAP/SCDAP и Melcor. Моделирование аварии требует учета широкого круга взаимосвязанных явлений. Для получения достоверных данных необходимо корректно смоделировать энергоустановку. Разбивка энергоустановки на элементы должна быть обоснованной.

Melcor по своей структуре является модульным кодом, включающим около двадцати различных «пакетов», моделирующих отдельные группы физических процессов и объединенных общей идеологией взаимной передачи данных [1]. В частности, в рамках пакета «гидродинамики контрольных объемов» (CVH) выполняется расчет нестационарных теплогидравлических процессов, протекающих в контрольных объемах, элементов первого и второго контуров энергоблока или помещения гермооболочки.

При моделировании теплогидравлических процессов моделируемые объекты представляются в виде взаимосвязанных расчетных элементов («контрольных объемов») с сосредоточенными параметрами. Контрольные объемы соединены между собой «путями течения», по которым происходит перемещение среды. Взаимосвязь контрольных объемов и пространственная неоднородность параметров отражаются при помощи соответствующих нодализационных схем. В пределах контрольного объема рассчитываются процессы обмена энергией и массой между входящими в него компонентами (вода, пар, неконденсирующиеся газы и др.) с учетом всех притоков и оттоков энергии и массы извне. На каждом временном шаге уравнения сохранения массы и энергии решаются для каждого контрольного объема, для каждого пути течения решается уравнение сохранения импульса, после чего проводится проверка интегрального баланса энергии и массы, а также условий сходимости полученного решения. В пределах смежных пакетов (к примеру, пакета тепловых структур) рассчитываются другие процессы и задаются дополнительные граничные условия для решения базовой системы уравнений. Не описанные аналитически переменные определяются на

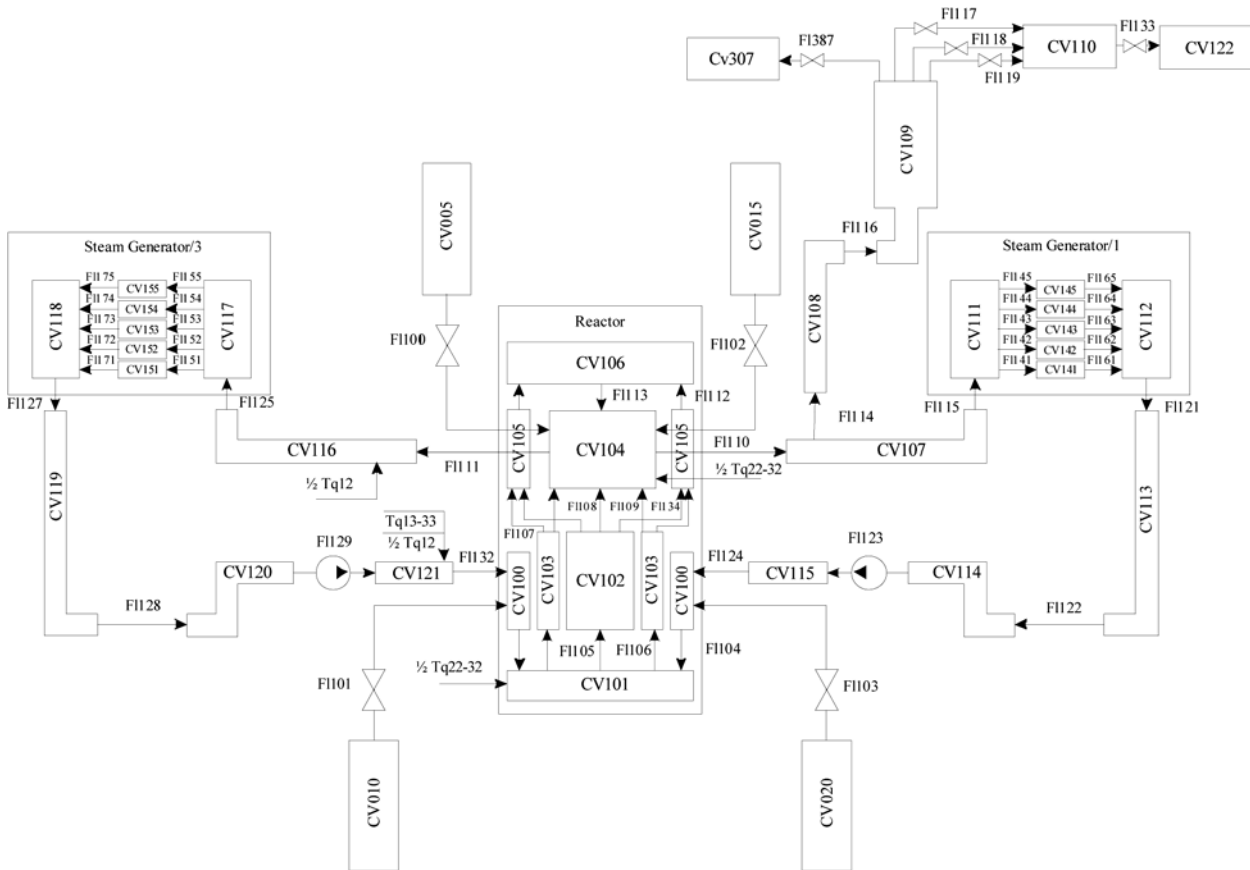


Рис. 1. Нодализация схема первого контура

основании замыкающих соотношений, как правило, полученных экспериментально.

При разработке расчетной модели в качестве основы использовались ранее разработанная модель для анализа запроектной аварии под версию программы Melcor 1.8.3, базы данных по ядерной паропроизводящей установке (ЯППУ) для программы RELAP5 [2], а также дополнительная справочная литература и рабочие материалы по модели для анализа тяжелых аварий при помощи кода RELAP/SCDAPSIM/Mod3.4 [3]. Предпосылкой к применению описываемой ниже нодализации является то, что она была опробована при использовании аналогичных одномерных теплогидравлических кодов, в частности RELAP, ATHLET.

Первый контур рассматриваемых моделей задается 37 контрольными объемами, которые соединены 52 путями течения (рис. 1).

Так как программа ограничена в количестве контрольных объемов, тепловых структур и других элементов, то четыре циркуляционные петли моделируются двумя петлями (одиночная и тройная). Объединение трех петель в одну также приводит к упрощению расчетных процедур. Одиночная петля используется для задания разрыва трубопровода первого контура [4].

Сравниваемые модели отличаются моделью парогенератора (ПГ). В первой модели парогенератор задан одним объемом, во второй разбит на три объема. Разделение объема парогенератора выполняется для оценки влияния рециркуляции пароводяной смеси второго контура на процессы, проходящие в нем.

В первой модели второй контур ЯППУ представлен 10 контрольными объемами, соединенными 14 путями течения (рис. 2).

Второй контур парогенератора моделируется упрощенно и включает два контрольных объема CV200 (ПГ одиночной петли) и CV201 (ПГ тройной петли).

Для моделирования работы главной паровой задвижки (ГПЗ) и быстродействующего запорного отсечного

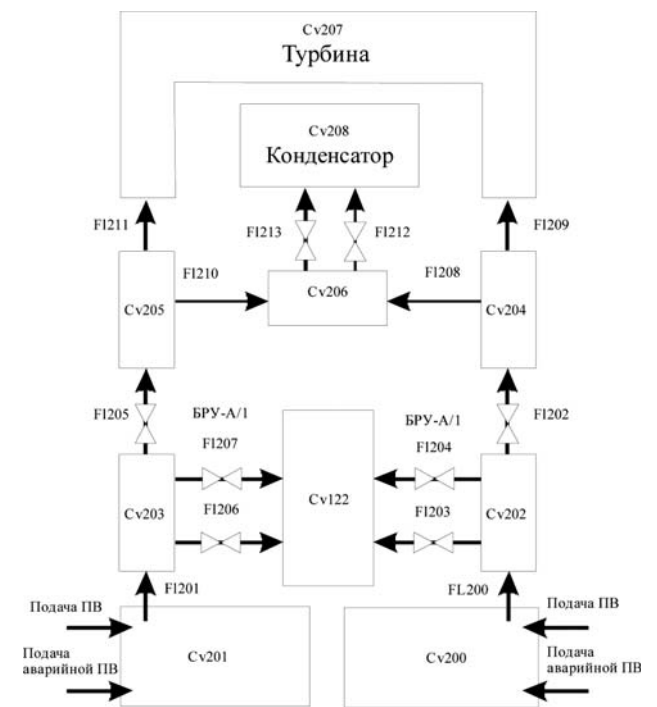


Рис. 2. Нодализация схема второго контура с ПГ, заданным одним объемом (без рециркуляции)

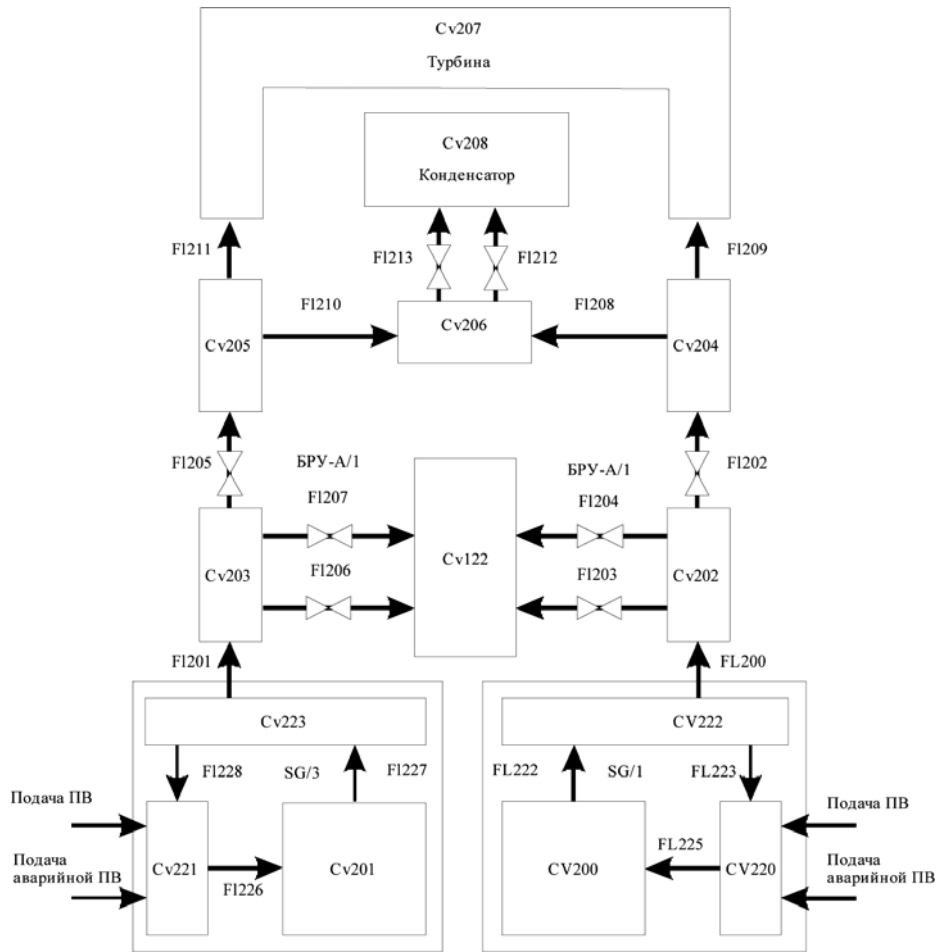


Рис. 3. Нодализационная схема второго контура с парогенераторами, учитывающими рециркуляцию

клапана (БЗОК) паропроводы свежего пара моделируются четырьмя контрольными объемами (CV202—CV205). БЗОК и ГПЗ моделируются как клапаны на путях течения FL202, 205, 209, 211, соответственно.

Главный паровой коллектор моделируется контрольным объемом CV206. Пути течения FL212, 213 моделируют быстродействующую редукционную установку сброса пара в конденсатор (БРУ-К). Данные пути течения соединяют главный паровой коллектор (ГПК) с конденсатором, который моделируется контрольным объемом CV208. Характеристики контрольного объема CV208 приняты в соответствии с характеристиками конденсатора.

Быстродействующая редукционная установка сброса пара в атмосферу (БРУ-А) и предохранительный клапан (ПК) ПГ моделируются как клапаны на путях течения FL204, 207 (одиночный и тройной БРУ-А) и FL203, 206 (одиночный и тройной ПК ПГ). Данные пути течения соединяют контрольные объемы CV202, 203 (часть паропроводов свежего пара) с контрольным объемом CV122 (окружающая среда).

Основная питательная вода моделируется как внешний источник массы/энергии в CV200, 201 с использованием контрольных/табличных функций. Вспомогательная питательная вода не моделируется. Аварийная питательная вода моделируется как внешний источник массы/энергии в CV200, 201 с использованием контрольных/табличных функций.

Парогенераторы второй модели разбиваются на три объема CV200 (201), CV220 (221), CV222 (223). Нодализационная схема второго контура представлена на рис. 3.

Контрольный объем 200 (201) отображает часть парогенератора, в которой происходит нагрев и испарение рабочего тела.

Контрольный объем 220 (221) задает часть парогенератора, в которой не происходит нагрев. Он включает объем между пучками теплообменных трубок и периферийную зону ПГ между трубчаткой и корпусом. Питательная вода в парогенератор подается через CV220 (221). Уровнемеры находятся возле корпуса, следовательно, корректно будет перевести регуляторы уровня на объем 220 (221).

Контрольный объем 222 (223) представляет полость парогенератора, в которой происходит сепарация образовавшегося пара, т. е. осушенный пар подается в паропровод, а капельки влаги падают вниз, попадая в CV200 (201) и CV220 (221). Контрольные объемы 200 (201) и 220 (221) соединяются между собой горизонтальным FL225 (226). Соединение 222 (227) способствует сообщению между собой содержимого объемов 200 (201) и 222 (223). Контрольные объемы 222 (223) и 220 (221) сообщаются между собой при помощи вертикального соединения FL223 (228). Отсепарированный пар в паропровод попадает из объема 222 (223) по соединению FL200 (201).

Обе модели использованы для расчета реакторной установки на 100 %-й мощности. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Расчетные параметры реакторной установки при работе на номинальной мощности

Параметр	Значение параметра	
	без рециркуляции	с рециркуляцией
Мощность реактора, МВт	3000	3000
Давление первого контура, кгс/см ²	158,9	158,7
Температура на входе в реактор, °С	289,8	290
Температура на выходе из реактора, °С	318,9	319,1
Объемный расход т/н через реактор, кг/с	18390	18980
Абсолютная отметка уровня КД, м	29,8	29,7
Давление в ПГ одиночной петли, кгс/см ²	62,8	62,8
Давление в ПГ тройной петли, кгс/см ²	63	63
Абсолютная отметка уровня ПГ одиночной петли, м	30,43	30,43
Абсолютная отметка уровня ПГ тройной петли, м	30,43	30,43

Отметки уровня в парогенераторе одиночной петли (три контрольных объема) с рециркуляцией изображены на рис. 4. Уровни в парогенераторе тройной петли тождественны уровню в ПГ одиночной петли (не выводятся на графике), что указывает на пренебрежимо малое влияние масштабирования. Отличие между значениями уровня в контрольных объемах 200 и 220 обусловлено различием паросодержания в них.

Для определения влияния рециркуляции в парогенераторе необходимо выполнить расчет и стационарного состояния, и аварийного режима. В качестве примера приводится расчет аварийного состояния — «Полное обесточивание блока, с потерей подпитки парогенераторов и теплоотвода по второму контуру».

В результате обесточивания блока формируется сигнал АЗ-1, закрывается стопорный клапан турбогенератора (СК ТГ) и отключается турбопитательный насос (ТПН), главные циркуляционные насосы (ГЦН) переходят в режим выбега. Формируются сигналы запуска дизель-генератора (ДГ), но, в силу постулируемых отказов, запуск ДГ не происходит. Наличие питания от резервной дизель-электростанции (РДЭС) также не учитывается (полное обесточивание блока). В результате оказываются неработоспособными активные системы безопасности, включая аварийные питательные насосы (АПЭН).

Также не учитывается работа БРУ-А, запитанных от источников 1-й категории надежности, ввиду ограниченной емкости аккумуляторных батарей и значительной неопределенности времени их полного разряда. Таким образом, теплоотвод на начальной стадии аварии после завершения выбега ГЦН осуществляется за счет естественной циркуляции теплоносителя первого контура к котловой воде в ПГ и далее с паром через импульсное предохранительное устройство (ИПУ) ПГ — в атмосферу.

Теплоотвод от первого контура по мере снижения уровня котловой воды в ПГ ухудшается. Это приводит к росту параметров первого контура (температура т/н и давление). Приблизительно с 4200-й секунды аварии начинается по-

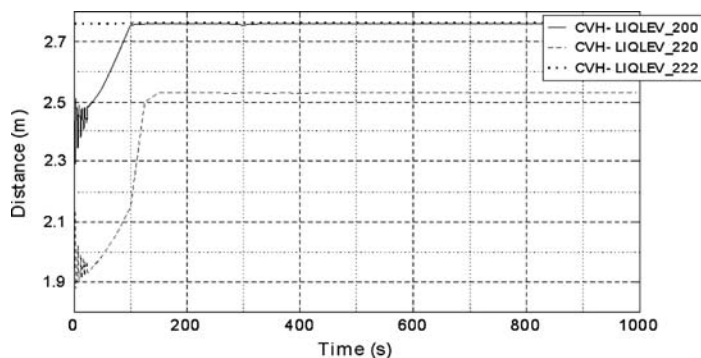


Рис. 4. Отметки уровня ПГ одиночной петли

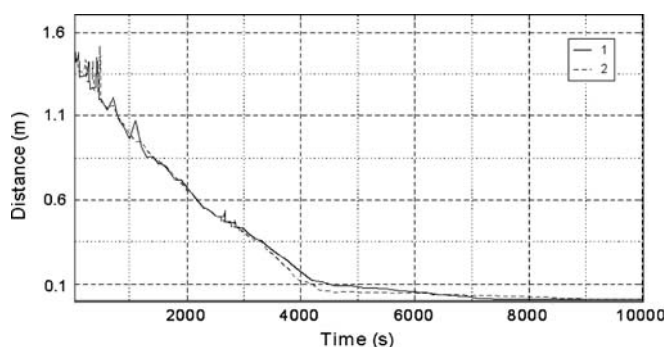


Рис. 5. Параметры уровня в ПГ: 1 — без рециркуляции; 2 — с рециркуляцией (контрольный объем 200)

теря теплоносителя первого контура за счет периодических срабатываний контрольного ИПУ компенсатора давления. Полное опустошение ПГ без учета рециркуляции завершается к 7200-й секунде аварии, а с учетом рециркуляции — к 8500-й секунде (рис. 5).

Потеря теплоносителя первого контура приводит к появлению уровня в реакторе после 5300 секунд аварии. Происходит быстрое снижение уровня т/н в активной зоне и оголение топлива к 10800-й секунде. Это приводит к разогреву топлива.

При использовании модели парогенератора без рециркуляции плавление корпуса происходит после 14800-й секунды с момента аварии, при использовании модели с рециркуляцией — после 13600 с. В соответствующие моменты времени расчеты были прекращены. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 2. Сравнительный анализ аварийного режима с полным обесточиванием энергоблока

Параметр	Значение параметра	
	без рециркуляции	с рециркуляцией
Время начала срабатывания ИПУ КД	4350	4100
Время полного опустошения ПГ	7200	8500
Время появления уровня в реакторе	5300	5600
Время завершения оголения топлива	10800	10900
Время плавление корпуса	14800 (22800)	13600

Выводы

Полученные данные хоть и близки, но имеют некоторые отличия. В частности, учет рециркуляции в парогенераторе существенно влияет на динамику опустошения и разогрева первого контура. В результате проплавление корпуса реактора в модели с рециркуляцией начинается на 1200 секунд, или почти на 9 %, раньше. Так как более реалистичная модель приводит к более жестким условиям протекания тяжелой аварии, использование ее не только целесообразнее, но и предпочтительнее при анализе и доработке стратегий управления тяжелой аварией. Недооценка аварийной подпитки ПГ или позднее ее начало могут оказать негативное воздействие с точки зрения предотвращения тяжелых повреждений зоны, тем самым создавая повышенный риск повреждения важных для безопасности элементов реакторной установки, в частности разрушения трубки ПГ. Результатом использования некорректных данных может являться принятие ошибочных решений при управлении тяжелой аварией.

Список литературы

1. Nureg/Cr-6119, Sand2000-2417/1, Melcor Computer Code Manuals Version 1.8.5.
2. База данных по ЯЭУ энергоблока № 1 ЮУАЭС (этап 3 по Договору № 06/03–06 от 6.04.2006.)
3. Nureg/Cr-6150, Inel-96/0422, Scdap/Relap5/Mod3.2 Code Manual.
4. Разработка и валидация модели RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 для анализа ТА ЭБ № 1 ЮУАЭС (этап 4 по план-заказу № 286–02–10/41 от 26.02.2010).

Надійшла до редакції 09.02.2011.