

УДК 621.039.562.3

РОЛЬ ОТДЕЛЬНЫХ ФАКТОРОВ В РАЗВИТИИ АВАРИИ
НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

*Адамов Е.О., Доморадов А.Е., Миронов Ю.В., Никитин Ю.М.,
Черкашов Ю.М. (НИКИЭТ)*

Непосредственно после аварии на четвертом энергоблоке Чернобыльской АЭС в НИКИЭТе и других исследовательских центрах был выполнен большой объем рас-

четных и аналитических исследований ее развития и значения отдельных факторов в этой ситуации. К этому процессу присоединились зарубежные исследовательские центры, где, в частности, для моделирования теплогидравлических процессов циркуляционного контура аварийного реактора использовали современные общеконтурные программы типа Relap 5, Retran 02 и др. [1].

За прошедшие годы некоторые программы, в частности последние версии кода Kelap 5, стали стандартным инструментом исследования безопасности реакторов в отечественных исследовательских центрах. Был выполнен также подробный физический анализ состояния реактора перед аварией, позволивший более точно оценить его физические характеристики [2] и возмущающее воздействие стержней СУЗ старой конструкции [3]. Одновременно были разработаны и апробированы на некоторых задачах эффективные расчетные схемы контура многократной принудительной циркуляции (КМПЦ) РБМК, основанные на выверенной информации об его конструкционных параметрах. Успехи в этих направлениях позволяют вернуться к численному исследованию возникновения и развития аварии на более высоком информационном уровне.

В настоящей статье приводятся первые результаты такого анализа, выполненного с использованием программы Relap 5/mod 2 [4], стандартная версия которой является наиболее распространенным в зарубежной практике инструментом исследования безопасности ЯЭУ. В этом коде достаточно развита система описания теплогидравлических процессов пароводяных потоков объединена с шестигрупповой точечной моделью кинетики реактора. Учитывая ограничения, связанные с точечным характером модели кинетики, тем не менее можно ожидать, что в условиях глобальных изменений параметров теплоносителя в реакторе такой подход способен дать достоверные оценки пороговых величин.

В статье рассматриваются две задачи: во-первых, для предаварийного состояния реактора исследуется воздействие на систему срабатывания аварийной защиты АЗ-5 и кратковременного ввода в зону положительной реактивности в процессе движения стержней аварийной защиты, во-вторых, изучаются последствия отключения турбогенератора и работа на выбеге двух из четырех работавших главных циркуляционных насосов (ГЦН) каждой петли.

В соответствии с логикой программы Relap 5/mod 2 контур РБМК-1000 разбивается на отдельные объемы, для каждого из которых решаются уравнения сохранения массы и энергии. Уравнениями баланса количества движения описываются другие расчетные объекты-связи, соединяющие центры соседних объемов.

В расчетной схеме моделировали две симметричные части КМПЦ. В одной петле выделялся один раздаточно-групповой коллектор, 42 топливных канала которого были распределены на пять групп эквивалентных каналов различной мощности. Схема нодализации контура и описание входящих в нее элементов приведены в работе [5].

Весь КМПЦ описывался 229 объемами и 244 связями. В это число включены также девять элементарных объемов, моделирующих газовые зазоры в графитовой кладке реактора. Для каждого тракта с топливными каналами четыре объема моделировали водяные коммуникации, девять — топливный канал и шесть — пароводяные коммуникации. В каждой половине реактора четыре ГЦН разделены на две равные группы, одна из которых работала с номинальной частотой вращения, а для другой в задаче с выбегом турбогенератора можно было задавать переменную частоту вращения.

В уравнениях кинетики, реализованных в алгоритме кода Kelap 5, эффект реактивности зависит от изменения плотности теплоносителя в каждом объеме, моделирующем активную зону, с весовым фактором, который обусловлен плотностью потока нейтронов и долей активной зоны, моделируемой этим объемом. В представленных расчетах использована обобщенная зависимость реактивности от плотности, полученная на основе уточненных пространственных нейтронно-физических расчетов активной зоны четвертого энергоблока Чернобыльской АЭС для его состояния непосредственно перед аварией [5] и отличающаяся от рабочих характеристик монотонным

ростом реактивности при падении плотности теплоносителя. Эта зависимость была задана в качестве универсальной для каждого элементарного объема активной зоны.

Вклад в реактивность доплер-эффекта в зависимости от температуры представлен в табл. 1, коэффициент реактивности по температуре графита принимался равным $9,26 \cdot 10^{-6}$.

Распределение энерговыделения по высоте активной зоны принималось асимметричным с максимумом в нижней половине зоны и коэффициентом неравномерности энерговыделения, равным 1,4.

Таблица 1. Вклад в реактивность доплер-эффекта

t , к		T , К	
273,15	0	1000	-1,93
300	-0,101	1200	-2,31
500	-0,744	1500	-2,83
650	-1,14	1800	-3,30
800	-1,50	2000	-3,60

Одна из проблем расчетного моделирования ситуации состояла в том, что реактор непосредственно перед началом эксперимента явно находился в нестационарном состоянии как в нейтронно-физическом, так и теплогидравлическом отношении. Однако неопределенности этого состояния не допускают задания его мгновенного состояния в качестве исходного для программы типа Relap 5. Поэтому в расчетах в качестве начального задавалось устойчивое стационарное состояние с параметрами реактора, близкими к зафиксированным в момент времени, отстоящий в представленных далее расчетах на 47 с от момента аварии. При этом возникает некоторая неопределенность в задании начальных параметров, поскольку в силу нестационарности состояния энергоблока записанные в системе ДРЭГ

параметры не удовлетворяют стационарным уравнениям баланса массы и энергии для реактора в целом. В этих условиях задачей численного анализа является по сути исследование устойчивости некой компактной области стационарных состояний, близких в некотором отношении к возмущающему воздействию различных факторов.

Анализ влияния срабатывания аварийной защиты на дальнейшее развитие процессов проводился в предположении, что в нулевой момент времени срабатывает аварийная защита АЗ-5 при отсутствии прочих внешних воздействий на реактор. Вводимая стержнями СУЗ реактивность принималась по данным [3]. Результаты расчетов показаны на рис. 1. Ввод положительной реактивности стержнями СУЗ приводит к росту мощности реактора: на 10-й с мощность достигает максимума 810 МВт (при начальной мощности

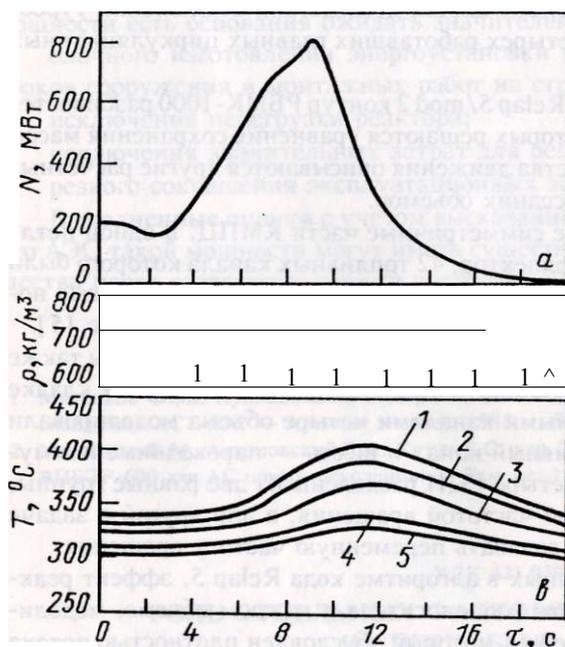


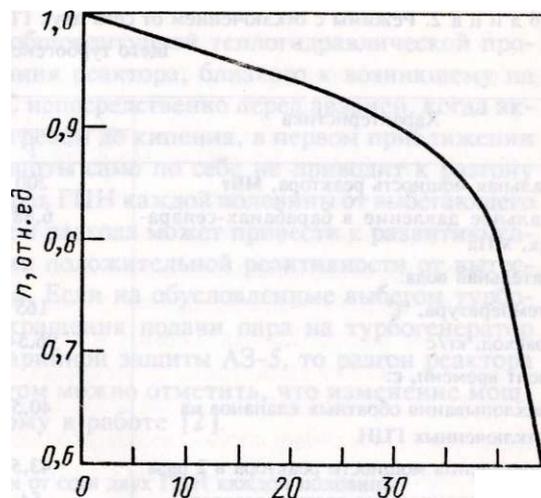
Рис. 1. Изменение мощности (а), средней плотности теплоносителя (б), максимальной температуры топлива (в) при мощности канала 153 (1), 126 (2), 100 (3), 68 (4), 47% (5) средней в контуре четвертого энергоблока Чернобыльской АЭС при срабатывании аварийной защиты АЗ-5 без изменения режима работы ГЦН

200 МВт). В дальнейшем она уменьшается, и цепная реакция затухает. Основные параметры контура, такие, как давление в барабанах-сепараторах, расход через ГЦН, оставались без изменения. Рост мощности вызвал небольшое парообразование (5—7%) по объему в активной зоне и рост температуры топлива. Максимальная температура в центре топлива канала наибольшей мощности достигается на 12-й с и составляет 414 °С, при этом оболочка твэла и труба канала остаются в нормальном режиме охлаждения.

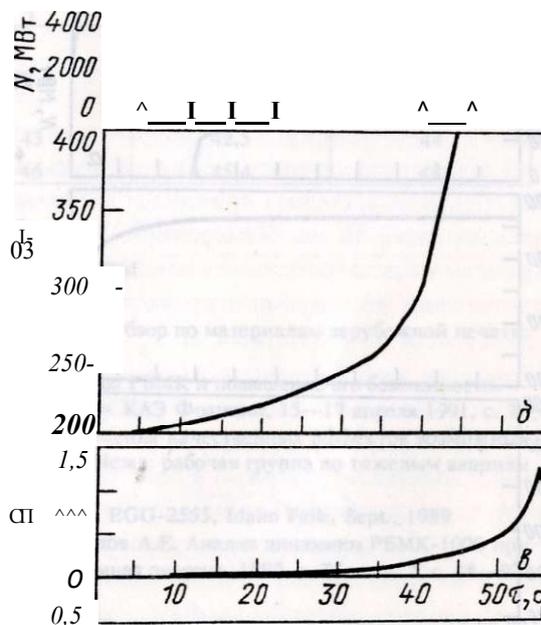
Во второй задаче предполагалось, что в нулевой момент времени прекращается подача пара на турбогенератор, два ГЦН каждой половины работают на выбеге турбогенератора, остальные — в номинальном режиме. Работу ГЦН на выбеге турбогенератора моделировали в исходных данных заданием кривой частоты вращения этих насосов (рис. 2), восстановленной по данным ДРЭГ. Расчетная кривая круто обрывается при снижении оборотов насосов, работающих на выбеге до 60% номинала, и далее расчеты могли быть продолжены уже с постоянной частотой вращения этой группы ГЦН, что, впрочем, не влияло на ход процесса, поскольку вскоре происходило захлопывание обратных клапанов выбегающих насосов (в хорошем согласии с реальным развитием процесса), и расход в каждой половине контура поддерживался лишь двумя нормально работающими насосами.

Расчеты проведены для трех исходных состояний реактора. В первых двух начальная мощность реактора была равна 200 МВт, в силу чего расход питательной воды задавался значительно выше, чем это было зарегистрировано ДРЭГ. В третьем варианте начальная мощность была понижена до 150 МВт, расход питательной воды — до 77,04 кг/с. Результаты расчетов приведены в табл. 2. Во всех рассмотренных вариантах за время ~ 1 мин происходит разгон реактора без воздействия положительной реактивности, вводимой стержнями СУЗ. Изменение основных параметров реактора для второго варианта показано на рис. 3—4.

Отключение турбогенератора приводит к уменьшению расхода через подключенные к нему насосы, что лишь частично компенсируется увеличением расхода через ГЦН, имеющие номинальные обороты. В результате уменьшения расхода через каналы при небольшом начальном недогреве циркуляционной воды до кипения происходят



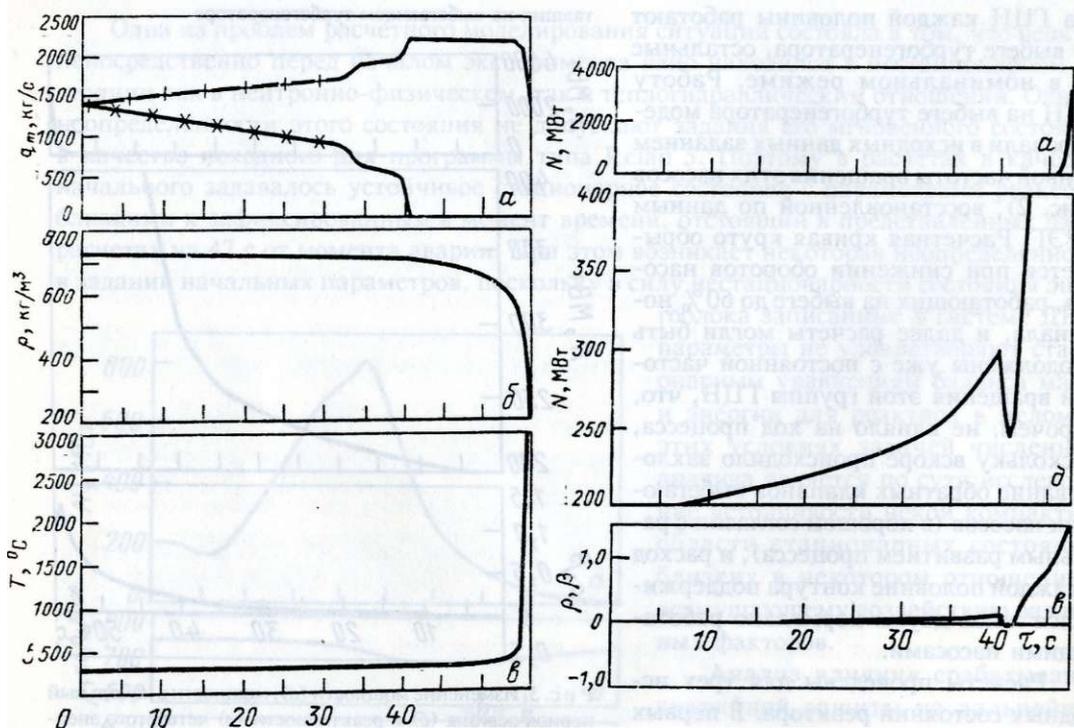
Р и с. 2. Относительная частота вращения ГЦН, работающих на выбегающем турбогенераторе



Р и с. 3. Изменение мощности (а), мощности в начальный период разгона (б) и реактивности (в) четвертого энергоблока Чернобыльской АЭС при начальной мощности 200 МВт

Т а б л и ц а 2. Режимы с отключением от сети двух ГЦН каждой половины и их работа от выбегающего турбогенератора

Характеристика	Вариант		
	1	2	3
Начальная мощность реактора, МВт	200	200	150
Начальное давление в барабанах-сепараторах, МПа	6,88	6,42	6,37
Питательная вода:			
температура, °С	165	195	195
расход, кг/с	96,54	102,722	77,04
Момент времени, с:			
захлопывания обратных клапанов на отключенных ГЦН	40,5	41	41
повышения мощности реактора в 2 раза	43,5	43	59
неконтролируемого разгона реактора	54	51,5	69



Р и с. 4. Изменение расхода через нормально работавшие ГЦН (+), работавшие от выбегающего турбогенератора (X) (о), средней плотности теплоносителя в активной зоне (б) и максимальной температуры в центре топлива (в) четвертого энергоблока Чернобыльской АЭС при начальной мощности 200 МВт

Р и с. 5. Изменение мощности (о), мощности в начальный период разгона (б) и реактивности (в) четвертого энергоблока Чернобыльской АЭС при срабатывании аварийной защиты АЗ-5 и начальной мощности 200 МВт

парообразование в активной зоне и рост реактивности и мощности (см. рис. 4). С ростом мощности интенсивность парообразования нарастает, начинается рост давления в контуре, выталкивание воды из активной зоны, которое вызывает захлопывание обратных клапанов на раздаточно-групповом коллекторе, и далее процесс приобретает катастрофический характер.

Таким образом, проведенные на базе обшконтурной теплогидравлической программы Relap 5/мой 2 расчеты для состояния реактора, близкого к возникшему на четвертом энергоблоке Чернобыльской АЭС непосредственно перед аварией, когда активная зона заполнена водой с малым недогревом до кипения, в первом приближении показали, что срабатывание аварийной защиты само по себе не приводит к разгону реактора. В то же время работа двух из четырех ГЦН каждой половины от выбегающего турбогенератора с неуклонным уменьшением расхода может привести к развитию катастрофического процесса и без воздействия положительной реактивности от вытеснителей стержней СУЗ стагой конструкции. Если на обусловленные выбегом турбогенератора процессы на 40-й с после прекращения подачи пара на турбогенератор наложить воздействие от срабатывания аварийной защиты АЗ-5, то разгон реактора происходит на 46—48-й с (табл. 3). При этом можно отметить, что изменение мощности (см. рис. 5) аналогично приведенному в работе [2].

Т а б л и ц а 3. Режимы с отключением от сети двух ГЦН каждой половины и их работа от выбегающего турбогенератора с дополнительным срабатыванием АЗ-5

Параметр	Вариант		
	1	2	3
Момент времени, с:			
захлопывания обратных клапанов на отключенных ГЦН	40,6	40,5	40,6
повышения мощности реактора в 2 раза	43	42,5	44
неконтролируемого разгона реактора	46	45,4	48

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безбатченко Н.И. и др. Моделирование аварии на ЧАЭС. Обзор по материалам зарубежной печати. Препринт ИАЭ-4629, 1991.
2. Адамов Е.О., Черкашов Ю.М. Усовершенствование реактора РБМК и повышение его безопасности. — В кн.: Межд. конф. «Ядерные аварии и будущее энергетики». КАЭ Франции, 15—17 апреля 1991, с. 7.
3. Адамов Е.О., Вазингер В.В., Василевский В.П. и др. Оценка качественных эффектов возможных возмущений во время аварии на ЧАЭС. — В сб.: Первая Межд. рабочая группа по тяжелым авариям и их последствиям. М.: Наука, 1990, с. 48—68.
4. SCDAP/Relap 5/mod 2, code MANUAL. NUREG/GR-5273, EGG-2555, Idaho Falls, Sept., 1989.
5. Миронов Ю.В., Никитин Ю.М., Фомичева Т.И., Доморадов А.Е. Анализ динамики РБМК-1000 при разрыве напорного коллектора на малой мощности. — Атомная энергия, 1993, т. 75, вып. 2, с. 88—92.

Поступила в Редакцию 15.07.93