

## АНАЛИЗ ЗАФИКСИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИИ

### Анализ информации из ДРЕГ

В книге использована информация, зарегистрированная штатными и дополнительными системами регистрации, включая расчеты СЦК «Скала» и данные ДРЕГ. При расчете времени некоторых событий, таких как момент отключения «выбегающих» ГЦН, нажатие внештатной кнопки МПА и т.п., были использованы осциллограммы, записанные 26.04.86 при регистрации работы электротехнического оборудования блока.

В книге учитывалось, что регистрация одних и тех же событий системами и приборами с разными временами обработки сигнала и последующее архивирование информации в СЦК «Скала», с обработкой массивов по программам, имеющим различные приоритеты, привела к тому, что одни и те же события у разных регистраторов оказались «привязаны» к разному времени. Поэтому вначале были выбраны такие события, которые нашли отражение во всех системах регистрации (реперные), потом время наступления этих событий уточнялось по показаниям самого точного регистратора с учетом необходимых поправок. Время всех последующих событий корректировалось в соответствии с поправками, полученными от «реперных» событий.

### Анализ осциллограмм

В ходе проведения экспериментов по исследованию ТГ-8 в режиме выбега проводилась регистрация электротехнических параметров на двух шлейфовых светолучевых осциллографах Н030А.

На осциллографе № 1 с шириной ленты 120 мм регистрировались электрические параметры ТГ- 8. На осциллографе № 2 с шириной ленты 200 мм., располагавшемся в помещении приборных щитов БЩУ, осциллографировались параметры, характеризующие условия работы собственных нужд, подключенных к ТГ-8 и дизельгенераторам.

Анализировались копии подлинных осциллограмм № 1 и № 2.

На осциллограмме № 1 фиксировались параметры выбегающего турбогенератора ТГ-8:

- напряжение на статоре;
- ток статора;
- напряжение на роторе;
- ток ротора;
- частота вращения турбогенератора.

На осциллограмме №2 фиксировались следующие параметры:

- напряжение на секции 8РБ;
- ток секции 8РБ;
- напряжение на секции 8РА;
- ток секции 8РА;
- ток двигателя ГЦН-13, подключенного к секции.8РА;
- частота вращения насоса ПЭН-3;
- напряжение на секции 8РНА, подключаемой к дизельгенератору;
- ток секции 8РНА.

В соответствии с программой испытаний ГЦН-13 и 23 были подключены к секции 8РА, а ГЦН-14 и 24 к секции 8РБ.

Для взаимной привязки параметров использовалась временная синхронизация ряда событий, зафиксированных на осциллограммах № 1 и № 2, что позволяет сделать следующие выводы:

В качестве реперного события, оставившего след во всех системах регистрации параметров, следует рассматривать факт одновременного обесточивания СЦК «СКАЛА» и приборов БЩУ-0, относящихся к потребителям электропитания первой категории. Этот факт дает основание считать, что процесс осциллографирования электрических параметров на осциллографе № 2, расположенном в помещении БЩУ-О был прерван не позднее 01ч 23м 49с (по времени ДРЕГ).

Началом переходного режима в электрических цепях, сопровождаемого возмущением в величине напряжения и тока ротора, следует считать момент отключения секции 8РНА от 8РА.

Длительность переходного режима, зафиксированного на осциллограммах № 1 и № 2 до момента остановки осциллографов, составляет 42,5 секунды, а длина лент соответственно 2200 мм и 2125 мм.

По данным осциллограммы №2, в течение примерно 36с переходного процесса происходило плавное снижение тока, напряжения и частоты на секциях 8РА и 8РБ. Ток снизился до 1160 - 1150А, напряжение и частота уменьшились примерно на 20 % .

Анализ осциллограммы № 2 также показал, что через 36,2 с произошло отключение ГЦН-13, так как потребляемый им ток снизился до нуля.

Среди причин, вызывающих отключение ГЦН собственными защитами (давление в ГСП, ток

двигателей и т.д.), можно предположить, как наиболее вероятную, срабатывание защиты по снижению расхода через ГЦН (установка 5000 м<sup>3</sup>/ч).

Следует обратить внимание на поведение частоты вращения ТГ- 8 и соответственно подключенных к нему собственных нужд (ГЦН -13, 14, 23, 24, ПЭН-3). По данным осциллограммы № I имелось плавное снижение частоты вращения ТГ-8, которая к моменту останова осциллографа уменьшилась на 20 % , т.е. частота тока снизилась с 50 до 40 герц.

Аналогично изменяется частота вращения ПЭН-3, запитанного вместе с ГЦН-13 и ГЦН-23 от секции 8РА. Число оборотов ГЦН-13 до момента отключения также синхронно изменялась с частотой выбегающего ТГ- 8 и достигла значения 0,7 от исходной величины. После отключения от секции 8РА частота вращения ГЦН-13 начинает снижаться, и к моменту обесточивания БЩУ-О она становится равной 0,6 от номинальной.

Согласно программе испытаний была смонтирована "кнопка МПА", с помощью которой на секции 8РНА отключалось напряжение от ТГ- 8 и подавалось напряжение от дизельгенератора. Нажатие "кнопки МПА" предусматривалось осуществить одновременно с закрытием СРК ТГ-8. Дискретный сигнал о срабатывании СРК зафиксирован ДРЕГ в 01ч23м04с (сигнал мог появиться в период цикла опроса 01ч 23м 02с – 01ч 23м 04с). Точное время нажатия "кнопки МПА" документально не зафиксировано, т.к. схема кнопки не содержала цепи вывода сигнала в «Скалу». По показаниям оперативного персонала "кнопка МПА" была нажата с некоторой задержкой по отношению к моменту посадки СРК. Поскольку нажатие «кнопки» вызывает отделение 8РА от 8РНА и включение блока выбега, осциллограммы позволяют восстановить это событие с высокой точностью, т.к. это произошло за миллисекунды до зафиксированного на них отделения секции 8РНА от 8РА (01.23.6,5). И все же следует отметить, что временной ход процессов в электрических системах не всегда с достаточной степенью определенности позволяет увязать их во времени с технологическими событиями, зафиксированными на других носителях информации, включая ДРЕГ.

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что процесс отключения ГЦН начался в 01ч 23м 42с, точнее в интервале между 42-й и 43-й секундами (по ДРЕГ), или на 41 секунде, если ввести поправку с отсчетом времени по телетайпу «Скаль».

Дополнительного анализа требует поведение токов секций 8РБ и 8РНА на последних секундах записи. Нерегулярный характер изменения токов этих секций, особенно их возрастание перед концом записи, могут свидетельствовать о начале процессов заклинивания (подклинивания) электронасосов или о разрушении оборудования энергоблока [29].

Главным показателем подклинивания насосов является увеличение ими потребляемого тока, т.к. при этом двигатель не развивает активную мощность и потребляет из сети реактивный ток, близкий к величине пускового тока. Причинами подклинивания электронасосов в процессе работы чаще всего являются (наблюдались 26.04.86):

- повышенная вибрация;
- резкое изменение температуры теплоносителя [29];
- срывы (опрокидывания) потока; переход в неустойчивый режим, в точку минимального значения электромагнитного момента двигателя;
- пробой корпусной изоляции обмотки статора, приводящий к короткому замыканию и т.п.

Описание графика  
«ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ БЛОКА № 4 ЧАЭС ВО ВРЕМЯ  
АВАРИИ 26.04.86».

**Обработка исходной информации**

График построен на основе информации, зарегистрированной штатными системами энергоблока, включая расчеты СЦК «Скала» и данные ДРЕГ. При расчете времени некоторых событий, таких как момент отключения «выбегающих» ГЦН, нажатие внештатной кнопки МПА и т.п. – были использованы осциллограммы, записанные 26.04.86 при регистрации работы электротехнического оборудования блока.

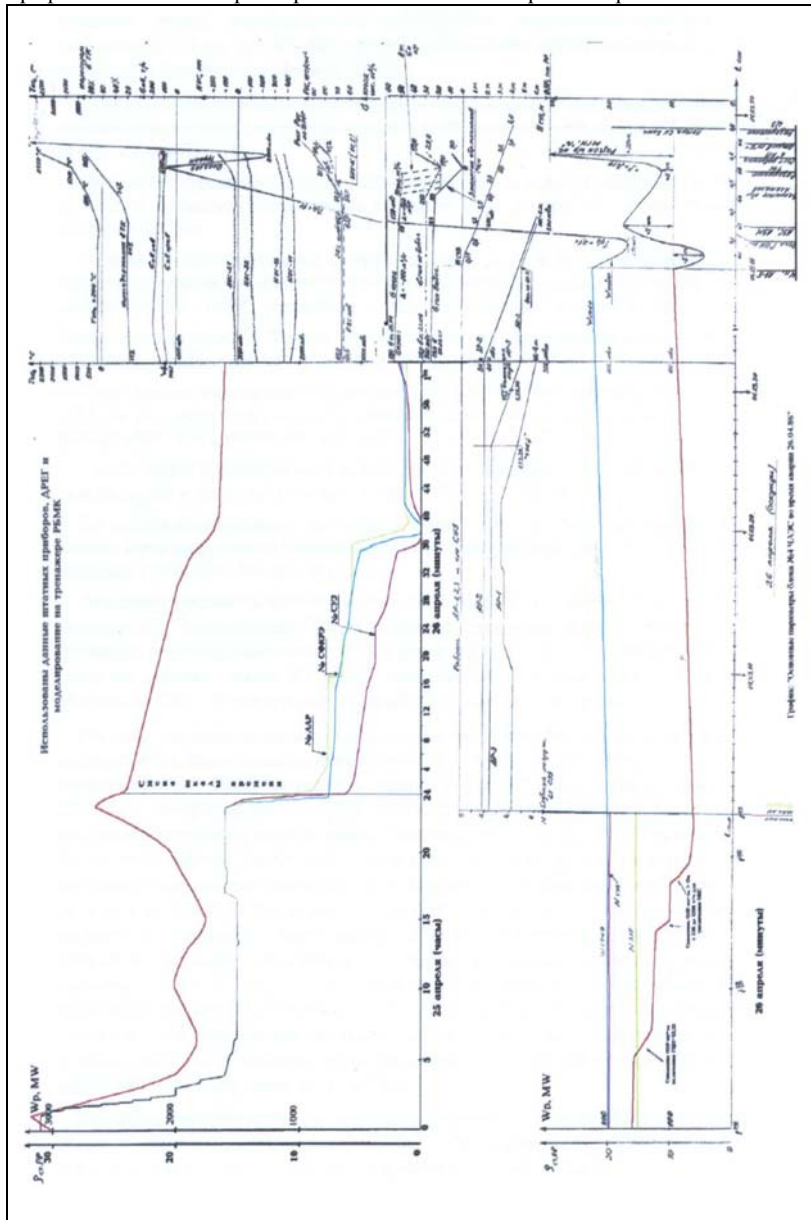
**Источники информации**

При обработке информации о мощности реактора до момента нажатия кнопки АЗ-5 (01.23.39) были использованы копии лент приборов СФКРЭ, датчиков БИК и датчиков ЛАР с учетом скорости

лентопротяжного механизма. Значение остальных параметров (ОЗР, расход по КМПЦ, расход питательной воды, давление и уровень в БС и т.д.) были получены из ДРЕГ и расчетов по программе «Призма - аналог». Значения ОЗР для периодов, когда этот параметр не рассчитывался «Призмой» (26 апреля с 0час36 мин), или считался неправильно (25 апреля с 7 до 15 часов), были восстановлены дополнительными расчетами [16].

С момента нажатия кнопки АЗ-5 изменение мощности, ОЗР, температуры топлива в твэле, величина среднего паросодержания в ТК и др. были получены в результате моделирования аварийного процесса на полномасштабном тренажере РБМК [27]. В связи с тем, что физические процессы характеризуются большой скоростью протекания, после 01ч23м39с на графике изображена только быстрая, так называемая «нейтронная» мощность. Значения остальных параметров взяты из ДРЕГ.

График «Основные параметры блока 4 ЧАЭС во время аварии 26.04.86»



### Воссоздание параметров 4-го блока ЧАЭС перед аварией

Главными из этих параметров являются те, которые характеризуют состояние активной зоны и, в частности, форму нейтронного поля в реакторе. На момент окончания эксперимента «по выбегу» состояние реактора характеризуется сильным ксеноновым отравлением, проявившимся после снижения мощности реактора с 50% Нном. до уровня мощности собственных нужд (200 МВт). Запас реактивности к моменту нажатия кнопки АЗ-5 (8 стержней РР) был взят из [16]. Положение органов регулирования,

информация по форме поля энерговыделения на тот же момент были взяты из показаний датчиков системы внутриреакторного контроля СФКРЭ. Кроме того, были использованы данные о выгораниях топлива в каждом канале, полученные расчетом по программе «Призма», входящей в состав эксплуатационного программного обеспечения вычислительного комплекса «Скала». С помощью указанных данных было восстановлено распределение нейтронного потока по высоте в каждом из технологических каналов и получены все нейтронно-физические константы, необходимые для задания начального состояния модели активной зоны реактора.

### **Воспроизведение действий эксплуатационного персонала**

Действия оперативного персонала, в целом, были направлены на выполнении программы испытаний выбега турбогенератора. В подготовительной части программы, на уровне мощности реактора 50%, персоналом были проведены все необходимые подключения и переключения на технологическом оборудовании и в схемах электроснабжения, которые были необходимы для организации работ по программе «выбега». Так, например, оборудование собственных нужд и в том числе 4 ГЦН, не участвующих в «выбеге» (ГЦН-11, ГЦН-12, ГЦН-21 и ГЦН-22), было переведено на электропитание от рабочего (внешнего) трансформатора. На турбогенератор ТГ-7, не участвующий в испытаниях, была прекращена подача пара, и он был отключен от энергосистемы. После снижения мощности реактора до уровня 200 МВт (тепловых) в работу были включены еще 2 ГЦН (до этого уже работало 6 насосов). Дальнейшие действия операторов были связаны с попыткой стабилизации уровней в барабанах – сепараторах, и с оптимизацией других теплогидравлических параметров ручным регулированием подачи питательной воды.

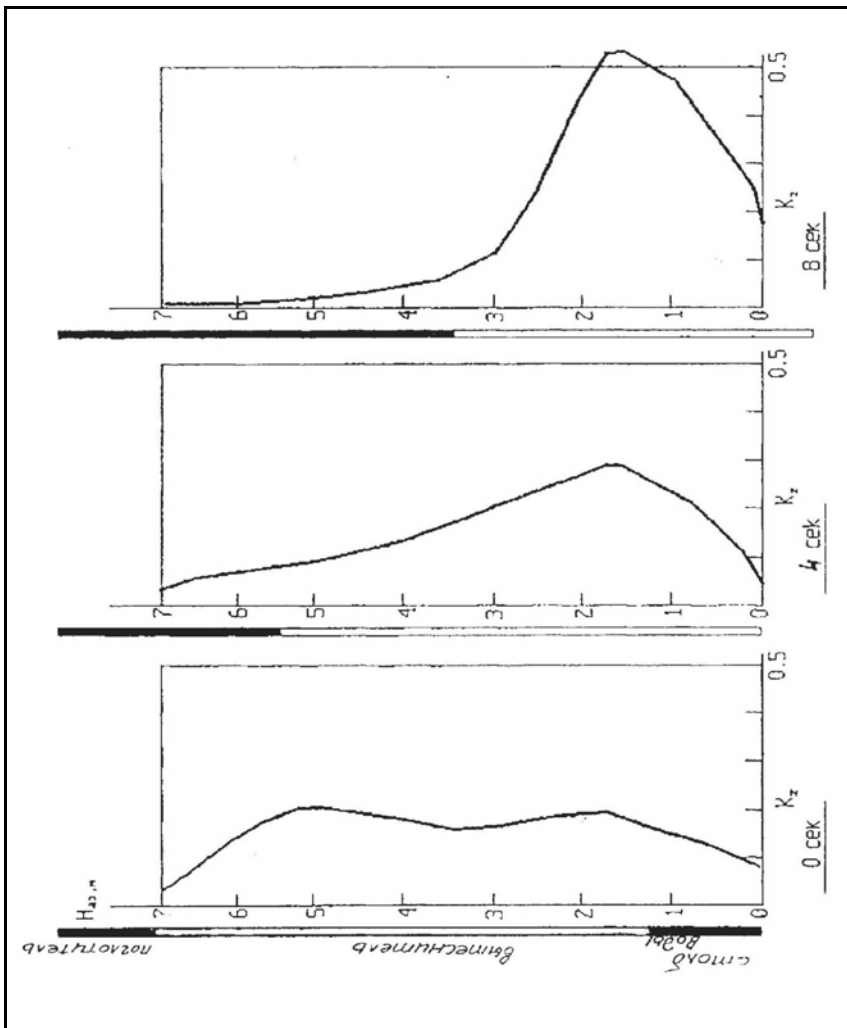
На тренажере моделировались только последние 2 минуты процесса испытаний (включая выбег, который длился менее 40 сек) и все последующие события аварии. Первыми из событий были: отключение от энергосистемы единственного находящегося в работе турбогенератора (ТГ- 8) и закрытие его стопорных клапанов от ключа на БЩУ. Этим действием была прекращена подача пара на турбину (ТГ-8), и начался совместный выбег турбогенератора и подключенных к нему четырех ГЦН (по два на каждой половине реактора). На левой половине ими были ГЦН-13 и ГЦН-14, а на правой - ГЦН-23 и ГЦН-24. Последним действием операторов был сброс стержней от кнопки АЗ-5 на БЩУ. Все дальнейшие события протекали без их участия.

Сброс аварийной защиты реактора был произведен в 01.23.39, т.е. через 35 сек после закрытия стопорных клапанов.

### **Характеристики аварийного процесса**

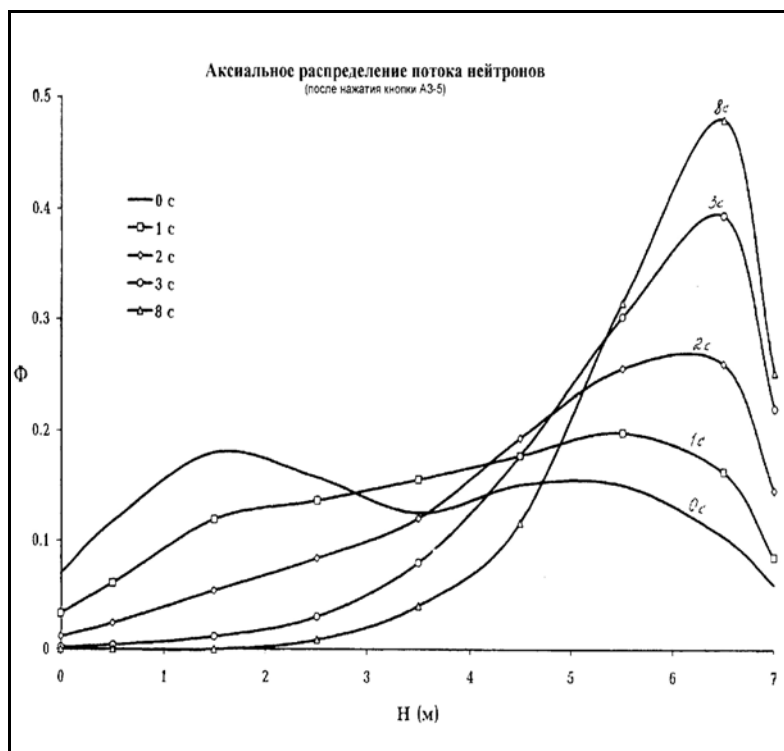
Результаты многочисленных расчетных исследований, проведенных различными авторами на высокоточных моделях, а также тщательный анализ фактических данных, зафиксированных в аварийном процессе системой регистрации технологических параметров энергоблока, дают достаточно определенную картину протекания аварийного процесса.

а) Началом процесса следует считать ввод стержней СУЗ в активную зону по сигналу сброса аварийной защиты. Все стержни, кроме автоматических регуляторов (АР), конструктивно состоят из двух частей: поглотителя (на основе карбида бора) и вытеснителя (на основе графита). В крайнем верхнем положении стержня РР поглотитель полностью извлечен из активной зоны, и в ней находится вытеснитель воды (рис.9, лев.). Такая конструкция стержней СУЗ уменьшает «паразитное» поглощение нейтронов в активной зоне и увеличивает эффективность стержней. При погружении стержня СУЗ в активную зону из крайнего верхнего положения в верхней части канала СУЗ материал вытеснителя (графит) замещается материалом поглотителя (карбид бора), т.е. в верхнюю часть реактора всегда вносится отрицательная реактивность. Одновременно в нижней части (рис. 9, сред.) происходит замещение воды на графит, что приводит к внесению положительной реактивности (сечение поглощения тепловых нейтронов у воды в двадцать раз больше, чем у графита). И только после того, как почти весь столб воды под вытеснителем (1,2 м) будет выдавлен, в эту область опускающимся стержнем будет вноситься отрицательная реактивность.



**Рис. 9. Распределение плотности потока нейтронов по высоте реактора после нажатия кнопки АЗ-5 (сброс всех стержней, кроме УСП)**

Введение положительной реактивности в нижней части активной зоны продолжается в течение первых трех секунд, но как только нижний край вытеснителя достигнет нижнего края активной зоны, ввод положительной реактивности прекращается (рис. 9, прав.). Знак суммарно вводимой реактивности при движении стержня СУЗ зависит от распределения потока нейтронов по высоте активной зоны и наличия в нижней части реактора поглощающих стержней (или полностью погруженных РР, или УСП). Если максимум потока находится в нижней части зоны и рядом нет введенных укороченных стержней-поглотителей (УСП), то суммарно вводимая реактивность при погружении стержня в активную зону может оказаться и положительной, и очень значительной по величине (см. рис.10).



**Рис. 10. Высотное (7 точек) распределение потока нейтронов после нажатия кнопки АЗ-5 через 1, 2, 3 и 8 сек.**

Следует отметить, что при ОЗР равном 15 (и более) стержней РР низ активной зоны практически всегда оказывается перекрыт введенными снизу стержнями УСП, которыми СИУР вынужден пользоваться для выравнивания полей энерговыделения в реакторе. И в такой перекрытой стержнями УСП нижней части реактора опасный «концевой эффект» стержней СУЗ проявляется уже в безопасных пределах.

б) Аварийный процесс в начальной фазе развивался как неконтролируемый. Быстрый рост нейтронного потока в локальной области нижней части активной зоны (с 12-го по 30-й ряд ТК), был вызван вводом в эту область положительной реактивности при массовом выталкивании вытеснителями стержней СУЗ воды (поглотителя нейтронов) из нижней части каналов СУЗ.

Реактор РБМК представляет собой большой реактор, т.е. является как бы совокупностью локальных критических масс, связанных между собой постоянными перетечками нейтронов. Форма распределения нейтронного потока в таком реакторе сильно подвержена влиянию локальных изменений реактивности, т.е. является неустойчивой. В отношении радиальных распределений этот факт хорошо известен из практики эксплуатации, так как радиальное распределение напрямую связано с мощностью каждого из технологических каналов. Что же касается аксиальной неустойчивости, то ее внешнее проявление при обычной эксплуатации и регламентной величине ОЗР не так заметно.

И только при описанном выше одновременном движении вниз всех стержней СУЗ, с вводом отрицательной реактивности в верхнюю часть активной зоны, и положительной - в нижнюю, аксиальная неустойчивость распределения нейтронного потока проявляется в полной мере. При этом высотное распределение плотности нейтронного потока быстро и сильно деформируется со смещением максимума вниз. Это, в свою очередь, еще сильнее увеличивает положительную реактивность, вводимую в нижнюю часть реактора, и уменьшает отрицательную в верхней части, делая сумму вводимых реактивностей положительной. Особенно неустойчива, в указанном смысле, начальная форма аксиального распределения с двумя максимумами ("двугорбое поле"). Именно такую форму имело аксиальное нейтронное распределение на момент аварии.

в) В начальной фазе аварии оказывает влияние и отрицательный эффект реактивности по температуре топлива (Доплер - эффект). Кроме того, с какого-то момента стержни СУЗ, дойдя до положения с полным вытеснением столбов воды под вытеснителями, перестают вносить положительную реактивность в нижнюю часть активной зоны.

Суммарное действие всех перечисленных факторов приводит к следующему поведению реактивности и мощности в аварийном процессе:

- в первую секунду движения большой массы стержней СУЗ в верхнюю часть реактора вводится

отрицательная реактивность (аксиальное нейтронное распределение в реакторе еще недостаточно деформировано и в верхней части активной зоны еще есть максимум плотности потока нейтронов), что приводит к первоначальному снижению общей мощности реактора;

- затем, после быстрой и значительной деформации высотного поля с уходом максимума плотности потока нейтронов вниз, нейтронный поток, а вместе с ним и энерговыделение в нижней части ТВЭЛов начинают сильно возрастать. И сумма вводимых реактивностей (в верхнюю часть, и в нижний «слой» реактора) становится положительной. Реактивность увеличивается до тех пор, пока разогрев топлива не скомпенсирует её рост отрицательным Доплер – эффектом. Мощность, выделяемая в ТВЭЛ, также достигает максимума с некоторой задержкой по отношению к поведению реактивности, и затем начинает падать. Температура топлива и вместе с ней тепло, передаваемое в теплоноситель, все это время возрастают, но в какой-то момент Доплер-эффект достигает максимума, и далее все рассматриваемые параметры начинают снижаться. Этот процесс изменения мощности полностью затухает, если к нему не подключатся другие эффекты (например, паровой эффект).

Максимальные значения реактивности, мощности энерговыделения, температуры топлива и тепловой мощности передаваемой воде в выше описанном процессе очень сильно зависят от исходного распределения нейтронного потока в активной зоне. Так, изменение формы аксиального распределения всего на несколько процентов, т.е. в пределах погрешности показаний внутризонных датчиков, может изменить максимум энерговыделения в несколько раз.

г) Определяющее влияние на катастрофическое развитие аварийного процесса оказал положительный паровой эффект реактивности. Полный эффект от заполнения технологических каналов паром составлял к 26.04.86 г., по оценке ОЯБ, чуть больше  $5 \beta_{эфф}$ . Так как в исходном состоянии, при низком уровне мощности, технологические каналы практически полностью заполнены водой (кипение начинается на выходе из канала), то эффект даже от локального вскипания может быть достаточно большим. Положительный эффект реактивности от вскипания теплоносителя начинает проявляться по достижении реактором величины мощности примерно 500 МВт, т.е. задолго до того, как мощность реактора достигает своего номинального значения. Проявление парового эффекта начинается следующим образом. Вначале все параметры изменяются так же, как было описано выше. Но, начиная с определенного момента, даже после того как реактивность прошла максимум и начинает снижаться, тепловая мощность канала, передаваемая в теплоноситель, достигает величины, при которой происходит вскипание воды. С этого момента включается паровой эффект реактивности, и если он превалирует над Доплер-эффектом, то реактивность перестает падать и снова начинает возрастать. Мощность энерговыделения в каналах резко увеличивается, ускоряется рост температуры топлива и теплоносителя. В охлаждающей воде возрастает интенсивность кипения, что в свою очередь опять ускоряет рост положительной реактивности (за счет парового эффекта) и процесс разгоняется, приобретая взрывной характер.