

В. И. Борисенко

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины

МОДЕЛЬ РЕАКТИВНОСТНОЙ АВАРИИ РБМК-1000

В работе [1] представлены результаты модельного определения нейтронно-физических характеристик (НФХ) основных типов уран-графитовых реакторов, разработанных в СССР. Отмечено, что при проектных параметрах эксплуатации энергетических реакторов АМ-1, АМБ-100, АМБ-200 и ЭГП-6, а также промышленных уран-графитовых реакторов (ПУГР) одна из важных НФХ – температурный коэффициент реактивности (ТКР) по температуре теплоносителя является отрицательным. А в РБМК-1000, при проектном обогащении топлива до ~2,0 %, ТКР по температуре теплоносителя – положительный. Одна из «основных» причин – выбор проектантом, так называемой «рабочей точки» на зависимости коэффициента размножения нейтронов $K_{эф}$ от плотности теплоносителя в области «перезамедленных» нейтронов.

В РБМК попадание «рабочей точки» в область «перезамедленных» нейтронов, при проектном обогащении топлива обеспечивается применением большего шага топливной решетки равного 25 см, по сравнению с другими типами уран-графитовых реакторов, например, в ПУГР - 20÷22 см.

В работе Генерального конструктора РБМК [2], представлена зависимость $K_{эф}$ от плотности теплоносителя, см. Рис.1.

В соответствии с моделью РБМК-1000, представленной в работе [1], для свежего топлива обогащением 2,0 %, максимальный ввод реактивности при изменении плотности теплоносителя от 0,8 до 0,4 г/см³ составляет ~ 0,6 %, а при обогащении топлива ~ 1,15 %, что учитывает выгорание топлива РБМК-1000 ЧАЭС-4 на момент аварии 1986 г., максимальный ввод реактивности при изменении плотности теплоносителя от 0,8 до 0,2 г/см³ составляет ~ 3,6 %, см. Рис.2.

Таким образом, сравнивая результаты, представленные на Рис.1 и Рис.2, а также сравнивая результаты моделирования НФХ и экспериментальных данных, полученных на различных РБМК [1], можно «сделать вывод» о достаточной корректности модели для ее возможного применения для исследования и динамического поведения РБМК.

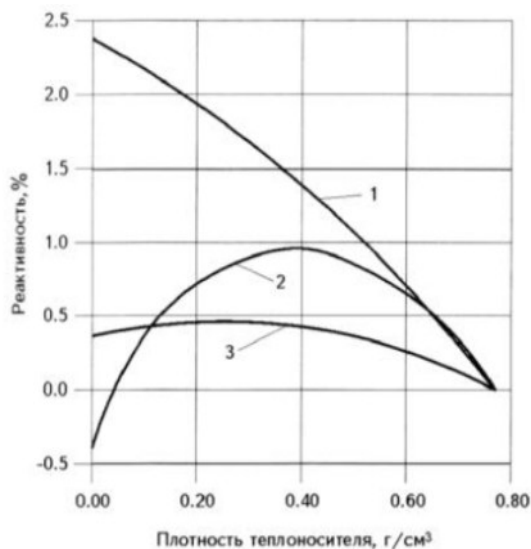


Рис.1. Зависимость реактивности от плотности теплоносителя [2]:
 1 – действительная зависимость в момент аварии (ЧАЭС-4);
 2 – проектные расчеты;
 3 – состояние после внедрения мероприятий по повышению безопасности.

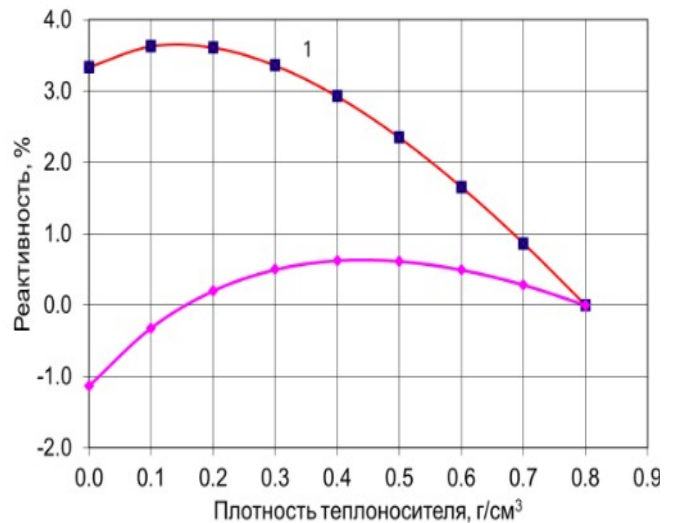


Рис.2. Зависимость реактивности от плотности теплоносителя [1]:
 1 – зависимость при обогащении топлива 1,15 %;
 2 – зависимость при обогащении топлива 2 %.

В ряде публикаций в том числе и на сайте PRoAtom и в комментариях к публикациям акцентируется внимание на отдельных НФХ и других факторах, значительно влияющих на ход аварийного процесса на ЧАЭС-4. Наиболее часто упоминаются: «паровой эффект», «концевой эффект», влияние ксенона, кавитация ГЦН и др. Рассмотрим изменение в модели основных параметров РБМК: нейтронной мощности, температуры топлива и теплоносителя при ряде постулируемых событий во время аварии: изменение температуры и плотности теплоносителя на входе в реактор, нажатие кнопки АЗ-5, а также возможные другие факторы, например, разгерметизация трубы технологического канала.

Необходимо отметить, что процессы, происходящие в реальном РБМК, достаточно сложные: это и изменение агрегатного состояния теплоносителя по высоте активной зоны, и значительные пространственные (высотные прежде всего) изменения профилей энергораспределения, а также влияние положения ОР СУЗ, разная длина коммуникаций от раздаточных коллекторов до входа в технологические каналы и многое другое. В работе [10] представлены модели с детальным описанием нейтронных и тепловых процессов в РБМК-1000 «накануне» аварии, и показано, что «спусковым механизмом» аварии стал конструктивный дефект стержней СУЗ.

В настоящей работе представлены результаты возможного хода аварийного процесса в РБМК-1000, полученные на основе модели [1], в которой «легко» моделируются и другие сценарии последовательности событий, а также влияние исходных данных в диапазоне их возможного изменения.

Подтверждением того, что результаты динамических расчетов на основе модели [1] будут представительными являются:

- приемлемая корректность расчета НФХ, полученных на статической модели [1];
- информация о применении аналогичной модели [3], применяемой для анализа динамических процессов в ВВЭР-1000.

Модель ВВЭР-1000 [3] применялась для описания ряда переходных процессов со срабатыванием ускоренной предупредительной защиты (УПЗ) на ВВЭР-1000. По сравнению с другими результатами моделирования процессов со срабатыванием УПЗ, в том числе и по трехмерным программам [4, 5] модель [3] более точно описывает экспериментальные результаты по изменению нейтронной мощности после УПЗ, см. Рис.3.

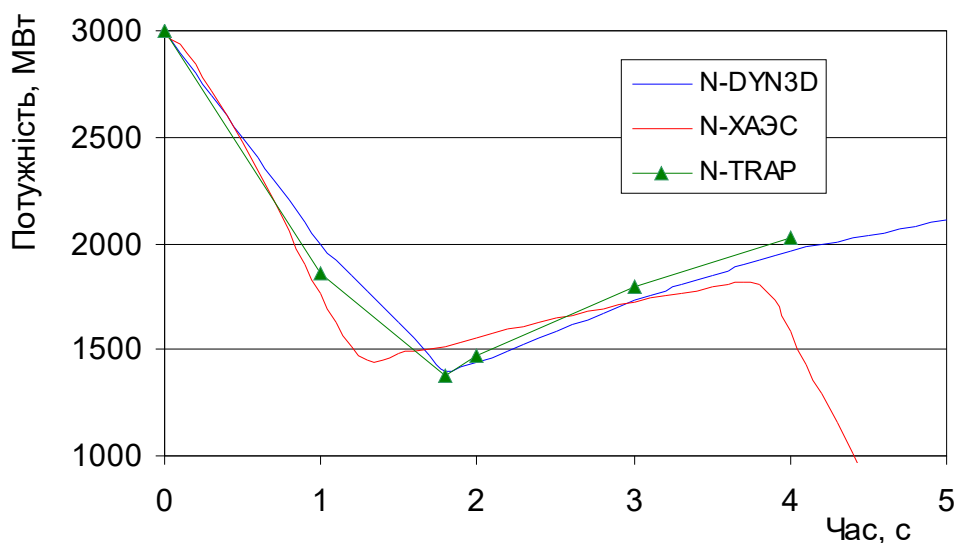


Рис.3. Изменение нейтронной мощности ВВЭР-1000 при работе УПЗ.

N-ХАЭС - измеренные данные [3];

N-DYN3D – расчетные по модели [4]; N-TRAP – расчетные по модели [5].

Описание модели критического объема активной зоны РБМК.

Исходные данные для расчета точечной модели реактора [1], получены «усреднением» параметров полячейки РБМК, состоящей из 16 топливных каналов, одного канала ОР СУЗ и одного канала дополнительного поглотителя (ДП), для компенсации избыточной реактивности при

проектном обогащении топлива (2,0 % или другое) в ТВС и до перехода на режим стационарных перегрузок (~1,0 %).

Изменение во времени поведения нейтронной мощности реактора описывается уравнениями точечной нейтронной кинетики. Без внешнего источника нейтронов и при учете шести групп ядер-предшественников запаздывающих нейтронов уравнения кинетики нейтронов точечного реактора имеют следующий вид [6]:

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{l} N(t) + \sum_i \lambda_i c_i(t) \quad (1)$$

$$\frac{dc_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{l} N(t) - \lambda_i c_i(t) \quad (2)$$

где $N(t)$ - плотность потока нейтронов (нейтронная мощность реактора);

$\rho(t)$ - реактивность; β - эффективная доля запаздывающих нейтронов;

β_i - доля запаздывающих нейтронов от ядер-предшественников i -ой группы;

λ_i - постоянная распада ядер-предшественников i -ой группы; l - среднее время

генерации мгновенных нейтронов; c_i - концентрация ядер-предшественников

i -ой группы запаздывающих нейтронов.

Влияние обратных связей в модели реактора учитываются путем определения изменения реактивности реактора $\Delta\rho(t)$ на каждом расчетном шаге, определяемой как сумма введенной реактивности за счет перемещения ОР СУЗ, изменения температуры (плотности) теплоносителя на входе в реактор, а также реактивности, выделившейся в результате действия обратных связей: изменения температуры топлива и теплоносителя, изменения концентрации ^{135}Xe и других параметров:

$$\Delta \rho(t) = \Delta \rho_{\text{СУЗ}}(t) + \frac{\partial \rho}{\partial \theta} \Delta \theta(t) + \frac{\partial \rho}{\partial T} \Delta T(t) + \frac{\partial \rho}{\partial X_{\text{e}}} \Delta X_{\text{e}}(t) + \dots \quad (3)$$

где $\Delta \rho_{\text{СУЗ}}(t)$ - реактивность, введенная за счет перемещения ОР СУЗ;

$\frac{\partial \rho}{\partial \theta}$ - коэффициент реактивности по температуре теплоносителя;

$\frac{\partial \rho}{\partial T}$ - коэффициент реактивности по температуре топлива;

$\Delta \theta(t)$, $\Delta T(t)$, $\Delta X_{\text{e}}(t)$ - соответственно изменение средней температуры теплоносителя, топлива и концентрации ^{135}Xe .

Изменение температуры топлива и теплоносителя в активной зоне реактора определено из уравнений теплового баланса для топлива и теплоносителя [7]:

$$\frac{dT}{dt} V c \gamma = q_v V - q_s S \quad (4)$$

$$\frac{d\theta}{dt} c_T M_T = q_s S - \gamma_T c_T G_T (\theta_{\text{out}} - \theta_i) \quad (5)$$

где V - объем топлива; S - площадь боковой поверхности ТВЭлов в активной зоне; c - теплоемкость топлива; γ - плотность топлива; c_T - теплоемкость теплоносителя; γ_T - плотность теплоносителя; M_T - масса теплоносителя в активной зоне; G_T - расход теплоносителя; θ_i - температура теплоносителя на входе в активную зону; θ_{out} - температура теплоносителя на выходе из активной зоны; q_v - объемное энерговыделение в топливе; q_s - тепловой поток с поверхности ТВЭла.

Уравнения (4, 5) имеют аналитические решения, для которых совместно с решениями уравнений (1-3) построена итерационная модель расчета нейтронной мощности реактора при «произвольном» внесении возмущений по реактивности, в данной модели по температуре (плотности) воды, перемещению ОР СУЗ [3].

В некоторых работах, которые также учитывают обратные связи, при определении изменения реактивности (3) наряду с ТКР по температурам теплоносителя и топлива записывают дополнительно и мощностной коэффициент реактивности, что неправильно, так как мощностной эффект именно и влияет на реактивность через изменение температуры топлива и теплоносителя.

Упрощением модели является, то, что изменение плотности теплоносителя учитывается через изменение его температуры, которая рассчитывается в соответствии с (5). Таким образом, в модели не учитывается образование пара в канале, следовательно, модель является более консервативной, а именно, моделируется меньший ввод положительной реактивности. Реальная физическая модель с изменением агрегатного состояния воды (образованием пара) сложнее в реализации. В диапазоне моделируемых диапазонов изменения давления и температуры теплоносителя: давление 6 – 9 МПа, температура теплоносителя от 270 °С до температуры насыщения при заданном давлении, не учтено образование пара частично компенсируется тем, что в модели энергия идет только на нагрев теплоносителя (5), а в «реальной» модели энергия идет на «образование пара» и на его нагрев. Учитывая, что в указанном диапазоне изменения параметров теплоносителя:

теплота образования пара – ~ 1500 кДж/кг;

энтальпия насыщенного пара ~ 2500 кДж/кг,

больше, чем энтальпия воды ~ 1300 кДж/кг, очевидно, что в модели температура теплоносителя будет «завышена», что частично и компенсирует не учтено образование пара. Удельный объем пара, в указанных диапазонах, в ~ 20 раз больше, чем у воды.

Границами применимости модели по значению средней температуры теплоносителя считаем температуру насыщения для «рабочего» давления РБМК, а по температуре топлива достижение ~ 2800 °С - температуры плавления топлива в центре топливной таблетки. Для большинства моделируемых режимов реактивной аварии сначала по времени достигается предельное значение энтальпии топлива (энергия, выделившаяся за «короткое» время, например, для топлива ВВЭР предельным значением считается 960 Дж/г), которое для топлива РБМК достигается (предположение) при достижении ~ 10 номиналов по нейтронной мощности в течении ~ 5 с (половина постоянной времени твэла). Учитывая, что модель реактора точечная, в которой рассчитываются «усредненные» параметры, в том числе и по энерговыделению, поэтому в «реальном» реакторе максимальные значения будут в 2-2,5 раза больше. Таким образом, для

значения усредненной мощности в 10 номиналов, в наиболее напряженных ТВЭлах активной зоны энтальпия топлива будет составлять ~ 1000 Дж/г за 2 с, что должно приводить к разрушению ТВЭла и технологического канала, что также выходит за рамки моделирования.

К тому же, при достижении более, чем 10-ти кратного увеличения значения нейтронной мощности от номинальной, предполагается, что наряду с разрушением топлива и вследствие разгерметизации канала происходит падение давления и плотности теплоносителя, охлаждение графита, которые приводят к дополнительному вводу положительной реактивности, и, соответственно, к еще большему росту мощности. Поэтому из всевозможных вариантов моделирования для рассмотрения выбираем, только те, которые в течении ~ 10 сек после нажатия кнопки АЗ-5 приводят к более, чем 10-ти кратному росту нейтронной мощности, в единицах номинальной мощности.

Геометрические и материальные характеристики технологического канала, ТВС и ТВЭла стандартные для 2-го поколения РБМК-1000 (ЧАЭС-4).

Диапазоны возможного изменения эффективности ОР СУЗ $\Delta\rho_{\text{СУЗ}}$ и ТКР в модели:

- ТКР по температуре топлива в диапазоне $-0,8\text{E-}5$ до $-1,5\text{E-}5$ $^{\circ}\text{C}^{-1}$. Это проектные значения, приведенные в [8, 9];
- ТКР по температуре теплоносителя в диапазоне $+0,5\text{E-}4$ до $+2,0\text{E-}4$ $^{\circ}\text{C}^{-1}$. Нижнее значение ТКР теплоносителя соответствует проектному значению (кривая 2 Рис.1), верхнее значение соответствует модельному значению кривая 1 Рис.2).

«Эффективность» ОР СУЗ («концевой эффект») в нижней части активной зоны при перемещении ОР СУЗ вниз на 1,25 м (на всю высоту водяного столба в канале СУЗ) составляет до $\sim +1\beta$ [1, 10], по оценке Карпана [9] $+0,6\beta$.

Тепловая постоянная времени ТВЭла РБМК определяется для энергетических уровней мощности РБМК и равна ~ 10 с. Диапазон изменения постоянной времени ТВЭла по другим источникам составляет 8-13 с [11].

В «установившемся» режиме перед испытаниями:

Тепловая мощность 200 МВт $\sim 6\%$ $N_{\text{ном}}$.

Температура теплоносителя на входе в реактор – 270 $^{\circ}\text{C}$.

Это еще одно консервативное допущение. Как известно, накануне аварии температура на всасе в ГЦН составляла более ~ 280 $^{\circ}\text{C}$ и запас до насыщения, в некоторые моменты, был даже меньше 1 $^{\circ}\text{C}$. Таким образом, очевидно, что чем меньше запас до температуры насыщения, то тем быстрее начнется парообразование в канале:

при уменьшении расхода теплоносителя при постоянной мощности;

при увеличении мощности, а, следовательно, за счет более раннего проявления положительной обратной связи по пару, рост мощности будет более ранним, по сравнению с модельной температурой теплоносителя в 270 °С. К тому же 270 °С является проектной температурой теплоносителя на входе в активную зону.

Модель «учитывает» следующие внешние воздействия:

0,0 с - закрытие стопорных клапанов турбины и начало выбега ГЦН;
10,0 с – за счет уменьшения расхода теплоносителя увеличение температуры (уменьшение плотности) теплоносителя $\Delta\Theta$ на $5\div 20$ °С в течение 10,0 с;
20,0 с - нажатие кнопки АЗ-5 и движение ОР СУЗ эффективностью $\Delta\rho_{СУЗ}$ в активную зону со скоростью 40 см/с в течение 3-х с.

За время 3 с (с 20-й по 23-ю секунду в модели) при движении ОР СУЗ вниз со скоростью 40 см/с графитовые вытеснители полностью вытесняют столб воды высотой ~1,25 м внизу активной зоны, в части которой, как предполагается и произошли основные процессы, определившие ход и последствия аварийного процесса [10]. На 23-й сек все внешние воздействия в модели прекращаются, что соответствует «заклиниванию» всех ОР СУЗ, и нейтронная мощность реактора изменяется в соответствие с действием обратных связей по температурам топлива и теплоносителя.

В модели не учитывается возможное влияние между частями активной зоны по высоте. Рассматривается минимально возможный критический объем в нижней части активной зоны при среднем обогащении топлива 1,15 % на момент аварии, который соответствует ~64 технологическим каналам (8x8 – четыре полячейки РБМК) и высотой ~ 1,5 м.

В ряде публикаций и некоторых комментариях на сайте рассмотрены вопросы влияния на ход аварии изменения концентрации ^{135}Xe . Информацию о влиянии на ход аварии можно найти в ряде работ, например, [10]. Можно отметить только, что влияние изменения концентрации ^{135}Xe за 30-50 с моделируемого процесса практически несущественно, оно в **десятки!** раз меньше влияния ТКР, поэтому в модели не учитывается.

В одном из комментариев ее автор, предлагал учитывать «мгновенное» улетучивание из активной зоны ксенона при разрыве оболочек твэл. Во-первых, разрыв всех оболочек твэлов уже за рамками модели и не представляет интереса - такому «пациенту» не помочь, а, во-вторых, не весь объем РБГ находится под оболочкой твэла, чтобы туда попасть от места рождения в объеме топливной таблетки, необходимы и время, и температуры.

И так все необходимые исходные данные модели описаны, рассмотрим некоторые результаты.

На Рис.4-6 представлены результаты изменения мощности, реактивности и средних температур теплоносителя и топлива при значениях ТКР:

$$\frac{\partial p}{\partial \theta} = +0,0002 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}; \quad \frac{\partial p}{\partial T} = -0,00001 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1},$$

что соответствует наиболее консервативным предположениям о значениях ТКР, приводящих к «наихудшим» результатам - максимальный рост мощности.

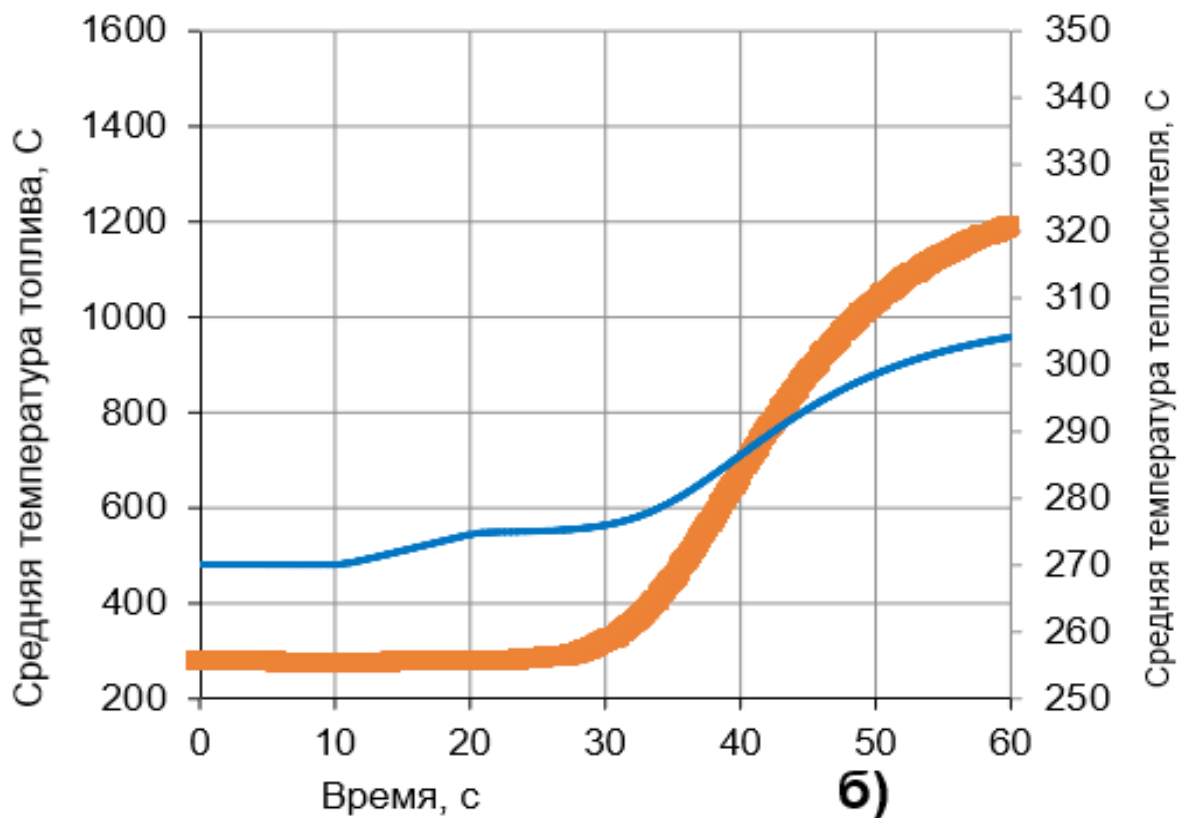
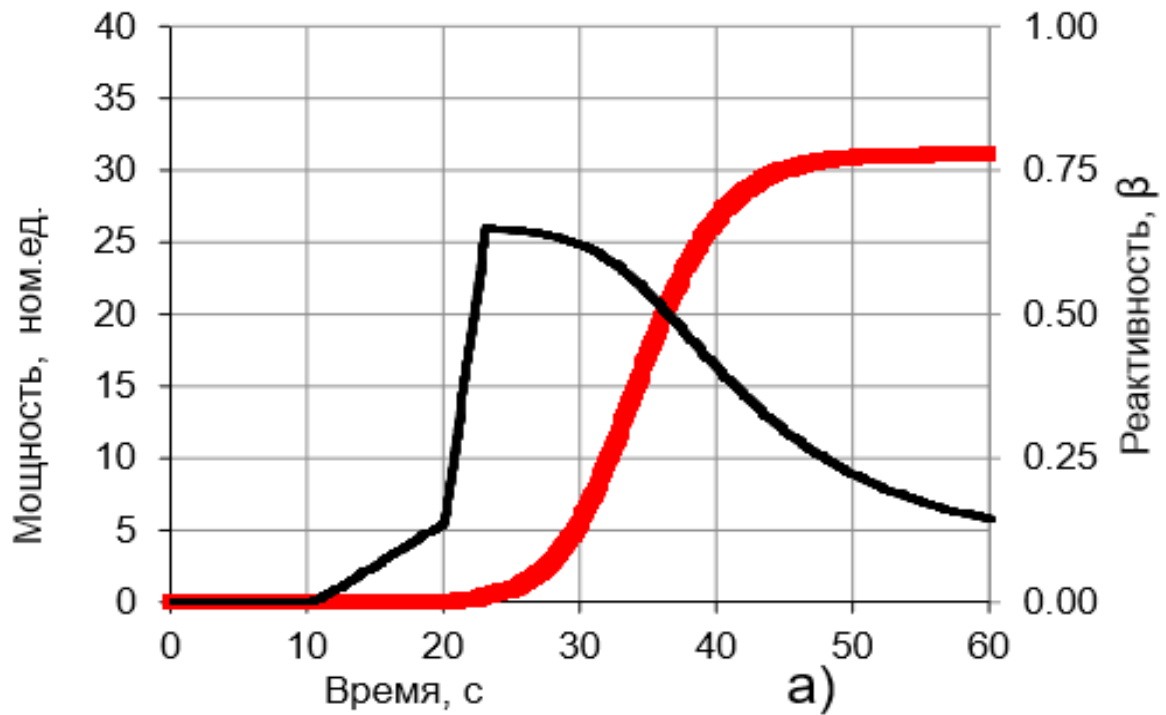


Рис.4. Изменение мощности (более толстая линия) и реактивности а), температуры теплоносителя и топлива (более толстая линия) б) при $\Delta\Theta = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta\rho_{\text{суз}} = 0,5\ \beta$

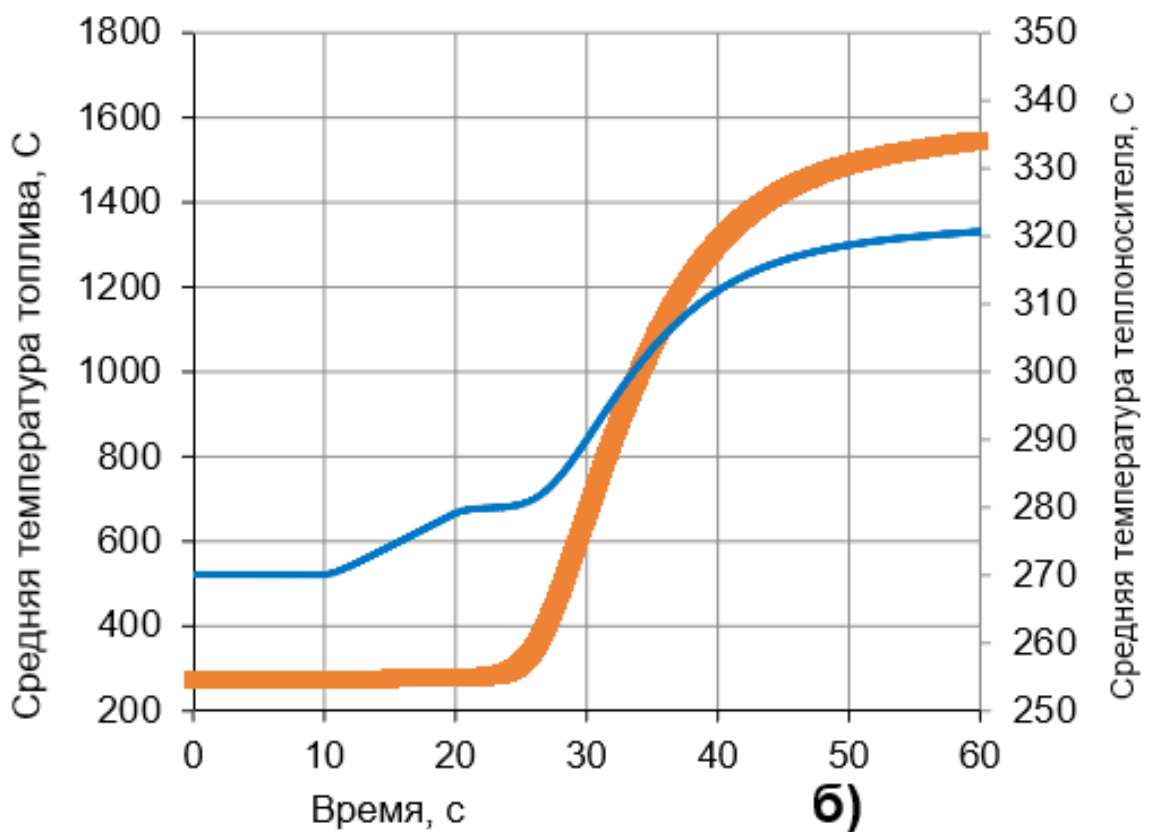
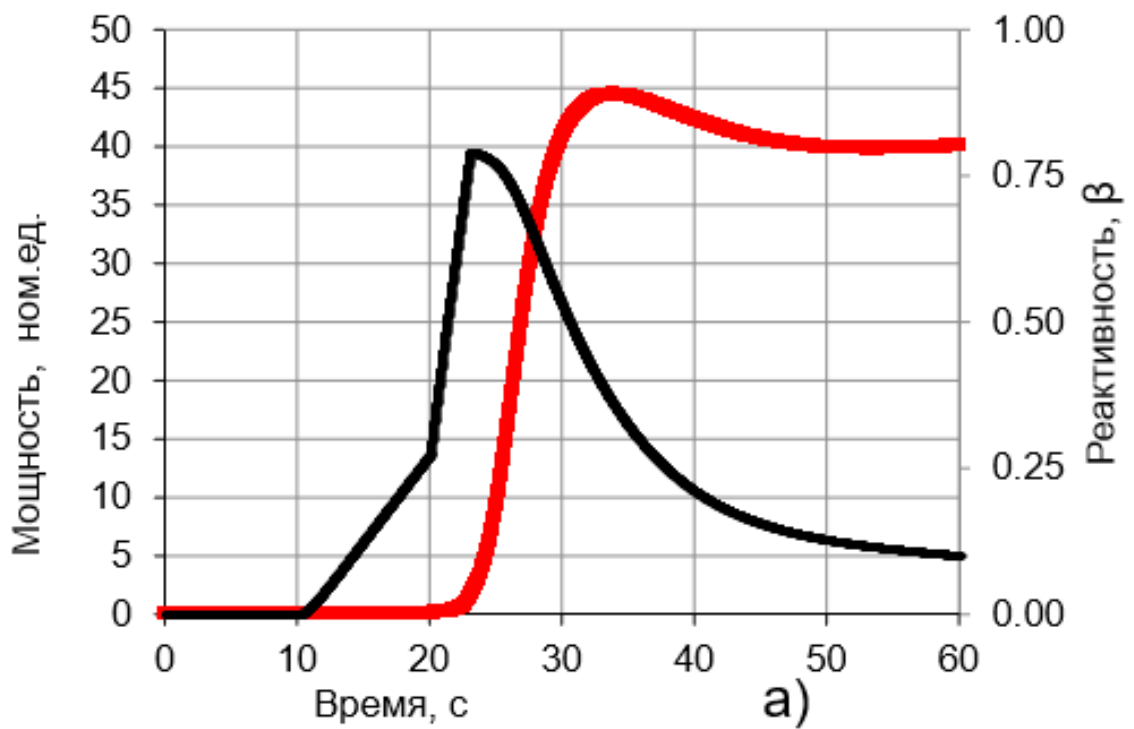


Рис.5. Изменение мощности (более толстая линия) и реактивности а), температуры теплоносителя и топлива (более толстая линия) б) при $\Delta\Theta = 10$ С, $\Delta\rho_{\text{связ}} = 0,5 \beta$

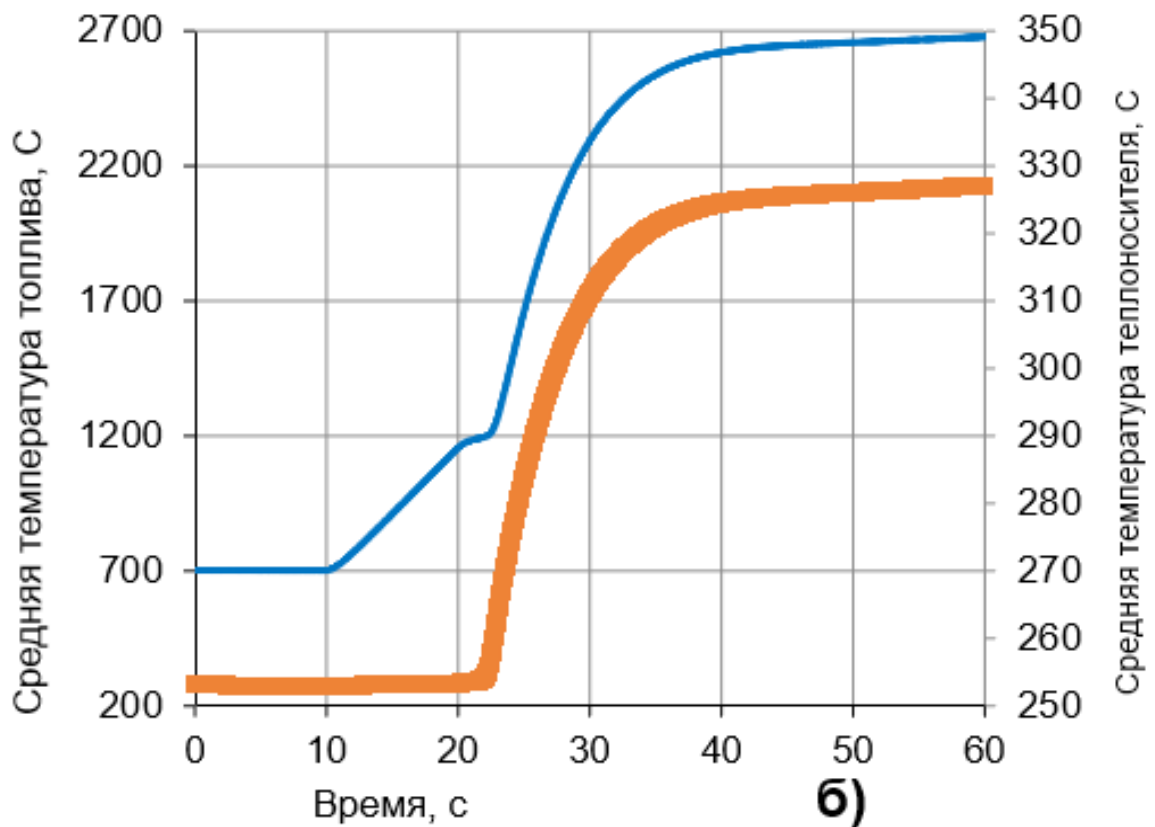
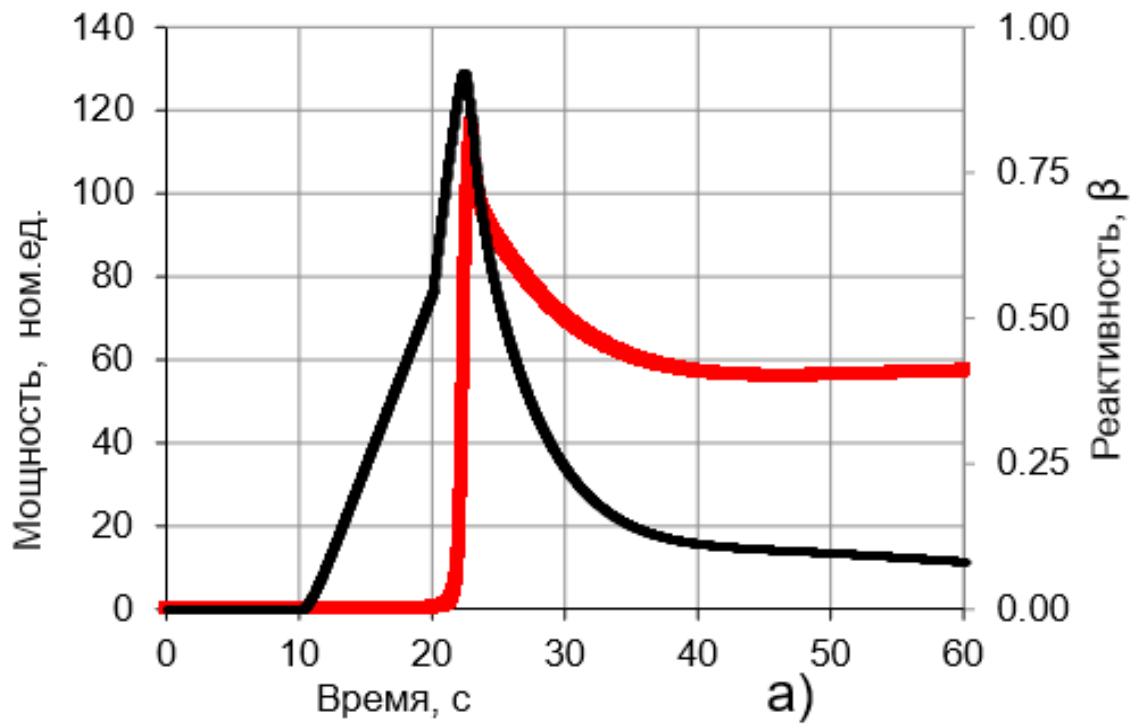


Рис.6. Изменение мощности (более толстая линия) и реактивности а), температуры теплоносителя и топлива (более толстая линия) б) при $\Delta\Theta = 20$ С, $\Delta\rho_{сuz} = 0,5 \beta$

На Рис.7 представлены результаты при значениях ТКР:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \theta} = +0,0001 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}; \quad \frac{\partial \rho}{\partial T} = -0,000012 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1},$$

что соответствует наименее консервативным предположениям о значениях ТКР, приводящих к «наилучшим» результатам – минимальный рост мощности.

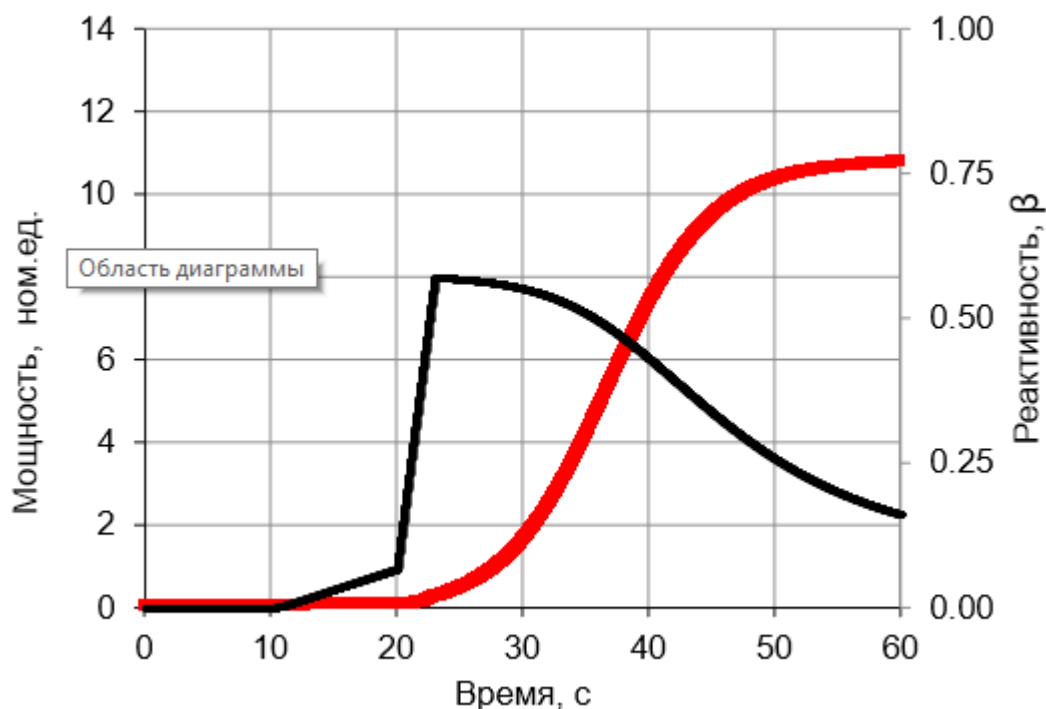


Рис.7. Изменение мощности (более толстая линия) и реактивности при $\Delta\theta = 5 \text{ C}$, $\Delta\rho_{\text{суз}} = 0,5 \beta$. Проектные значения ТКР.

При «проектных» значениях ТКР, и «подогреве» теплоносителя до $\Delta\theta = 10 \text{ } ^\circ\text{C}$ даже наличие «концевого эффекта» не приводит к разрушению топлива за время движения ОР СУЗ в течение ~ 18 сек, а следовательно, можно ожидать выполнение функции АЗ-5 и «заглушение» реактора.

Результаты «ожидаемы», и чтобы не перегружать графической информацией некоторая расчетная информация о параметрах достижения «разрушения активной зоны» сведена в Табл.1.

Таблица 1. Время достижения значения ~ 10 -ти номинальных мощностей при различных значениях ТКР, $\Delta\rho_{\text{суз}}$ - «эффективности» АЗ и $\Delta\theta$ - значениях подогрева теплоносителя с момента времени в модели 0,0 с.

Консервативные значения		«Проектные» значения
$\frac{\partial \rho}{\partial \theta} = +0,0002 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1};$		$\frac{\partial \rho}{\partial \theta} = +0,0001 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1};$

$\frac{\partial \rho}{\partial T} = -0,00001 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$			$\frac{\partial \rho}{\partial T} = -0,000012 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$		
$\Delta\rho_{\text{сюз}}, \beta$	$\Delta\Theta, \text{ } ^\circ\text{C}$	Время, с	$\Delta\rho_{\text{сюз}}$	$\Delta\Theta$	время
0,0	21	30	0,0	47	29
0,05	20	29	0,05	43	31
0,1	18	31	0,1	40	30
0,2	15	31	0,2	35	28
0,3	12	31	0,3	30	28
0,4	10	28	0,4	20	31
0,5	6	30	0,5	15	29

Таким образом, можно заключить, что в состоянии реактора РБМК-1000 на момент проведения испытаний 26.04.1986, практически постоянная мощность 200 МВт, повышение средней температуры теплоносителя на «небольшую» величину на 5-20 °С, за счет уменьшения расхода теплоносителя через активную зону (половинку) при подключении электропитания ГЦН к выбегающему ТГ, а также инициация срабатывания АЗ-5 приводят к значительному увеличению нейтронной мощности, достаточной для разрушения ТВЭЛ и топливного канала.

При этом, как видно на Рис. 4-6 реактор, при указанных значениях внешних возмущений по $\Delta\rho_{\text{сюз}}$ и $\Delta\Theta$, «даже» не переходит в режим критичности на мгновенных нейтронах, а именно: $K_{\phi} < 1 + \beta$.

Очевидно, что при еще больших возмущениях по температуре (плотности) теплоносителя, которые имели место (могли иметь) при «аварийном» отключении питания ГЦН и даже падению расхода до «0» (по некоторой информации), внесение дополнительной положительной реактивности приведет к еще большему и более интенсивному росту мощности.

Приведем еще некоторые результаты модельного исследования аварийного режима для двух вариантов:

А) – формирование АЗ-5 по сигналу отключение «последнего» ТГ. Эта защита была «заблокирована» – это практически единственное «аргументированное» критиками действий персонала нарушение «Регламента» при проведении испытаний;

Б) – проведение испытаний на мощности ~700 МВт в соответствии с Программой испытаний.

В отличие от ранее представленных результатов, где моделируется работа АЗ-5 на протяжении только 3-х с (далее стержни АЗ-5 «заблокированы»), в вариантах А) и Б) работа АЗ-5 моделируется на

протяжении 18 с, т.е. до полного введения ОР СУЗ. Эффективность «поглощающей части» ОР СУЗ в модели выбрана «минимальной» и равной по эффективности «концевому эффекту» на единицу длины ОР СУЗ.

Результаты:

А) Приведем только два результата моделирования при разных временах формирования АЗ:

На Рис. 8 представлены результаты при срабатывании АЗ-5 в момент закрытия СК ТГ. В модели это соответствует срабатыванию АЗ-5 в диапазоне времени 0-3 с, т.е. за 7-10 с до постулируемого подъема средней температуры теплоносителя за счет падения расхода ГЦН, подключенных к выбегающему ТГ.

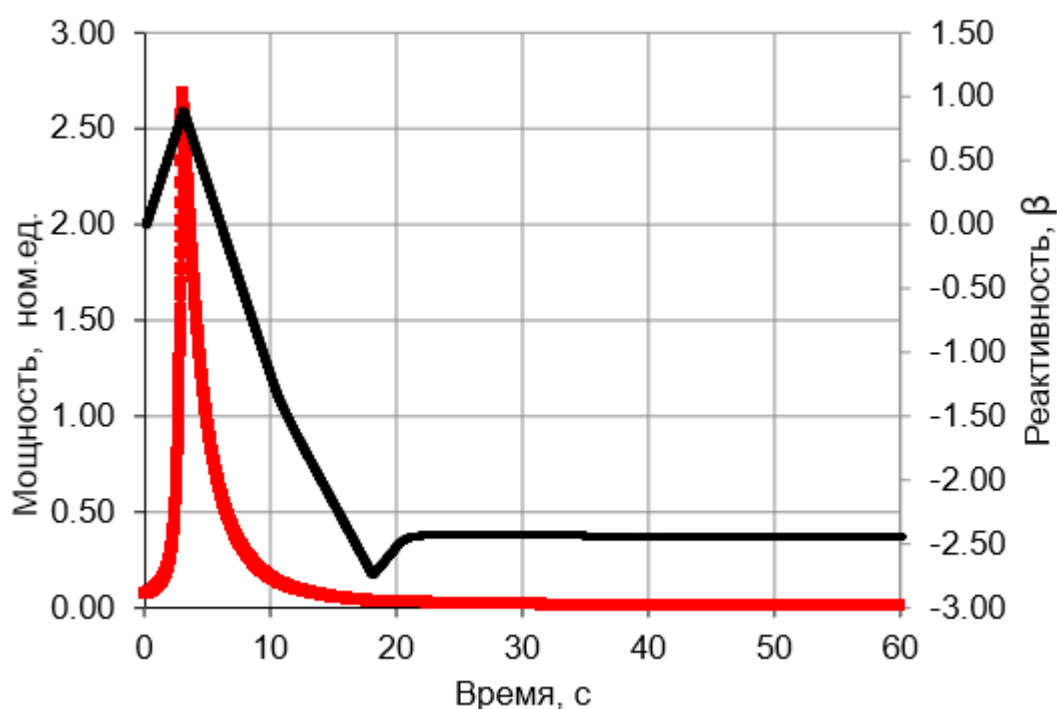


Рис.8. Изменение мощности (более толстая линия) и реактивности) при $\Delta\Theta = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta\rho_{\text{СУЗ}} = 0,9\beta$. Время срабатывания АЗ-5 в модели 0,0 с.

$$\frac{\partial\rho}{\partial\theta} = +0,0002\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}; \quad \frac{\partial\rho}{\partial T} = -0,00001\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$$

Как видим, даже для консервативных значений ТКР, максимально «возможном» значении $\Delta\rho_{\text{СУЗ}} = 0,9\beta$ и постулируемом повышении температуры теплоносителя даже на $\Delta\Theta = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ твэлы и каналы **не разрушаются !**

Если же момент срабатывание АЗ-5 совместить во времени с моментом начала падения расходов ГЦН (консервативное предположение), то и в этом случае в широком диапазоне изменения $\Delta\rho_{\text{СУЗ}}$ и $\Delta\Theta$ «наброс» мощности не приводит к разрушению твэлов, см. Рис.9.

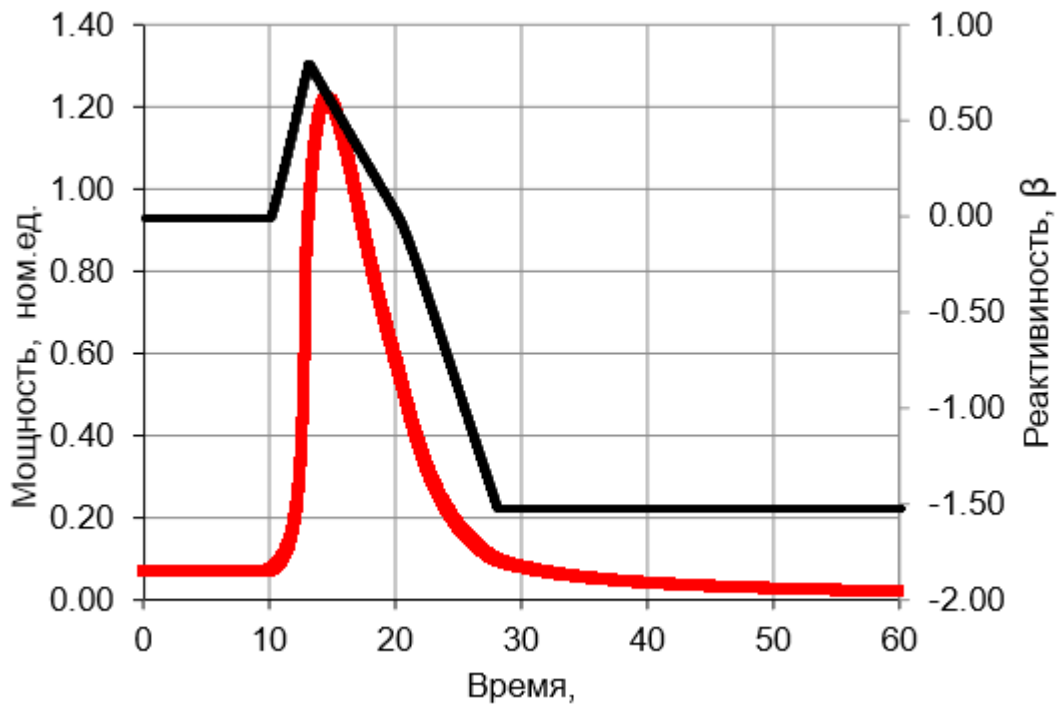


Рис.9. Изменение мощности (более толстая линия) и реактивности, при $\Delta\Theta = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta\rho_{\text{суз}} = 0,6\text{ }\beta$. Время срабатывания АЗ-5 в модели 10,0 с $\frac{\partial\rho}{\partial\theta} = +0,0002\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$; $\frac{\partial\rho}{\partial T} = -0,00001\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

Таким образом, можно «аргументировано предположить», что блокировка формирования АЗ-5 по сигналу отключения последнего ТГ существенно повлияла на ход аварийного процесса, который **мог быть и не аварийным !**

Если же принять во внимание информацию работы [10], в которых указывается на возможную эффективность «концевого эффекта» в $1,1\text{ }\beta$, то в этом случае момент формирования АЗ-5 не имеет значения, в модели по крайней мере.

Б) И еще один результат – о влиянии уровня мощности на ход аварийного процесса, которая в соответствии с Программой испытаний должна была быть $\sim 700\text{ МВт}$ ($0,22\text{ }N_{\text{ном}}$).

Очевидно, что для принятых значений НФХ, а также, что *большой* мощности будет соответствовать и большая температура топлива, которая «ответственна» за отрицательную обратную связь по реактивности, следовательно, и «реактивностные всплески» будут гаситься более оперативно.

Для примера приведем результаты моделирования для условий идентичных, представленным на Рис.4, только с одним отличием по мощности: 200 МВт на Рис.4, и 700 МВт на Рис.10.

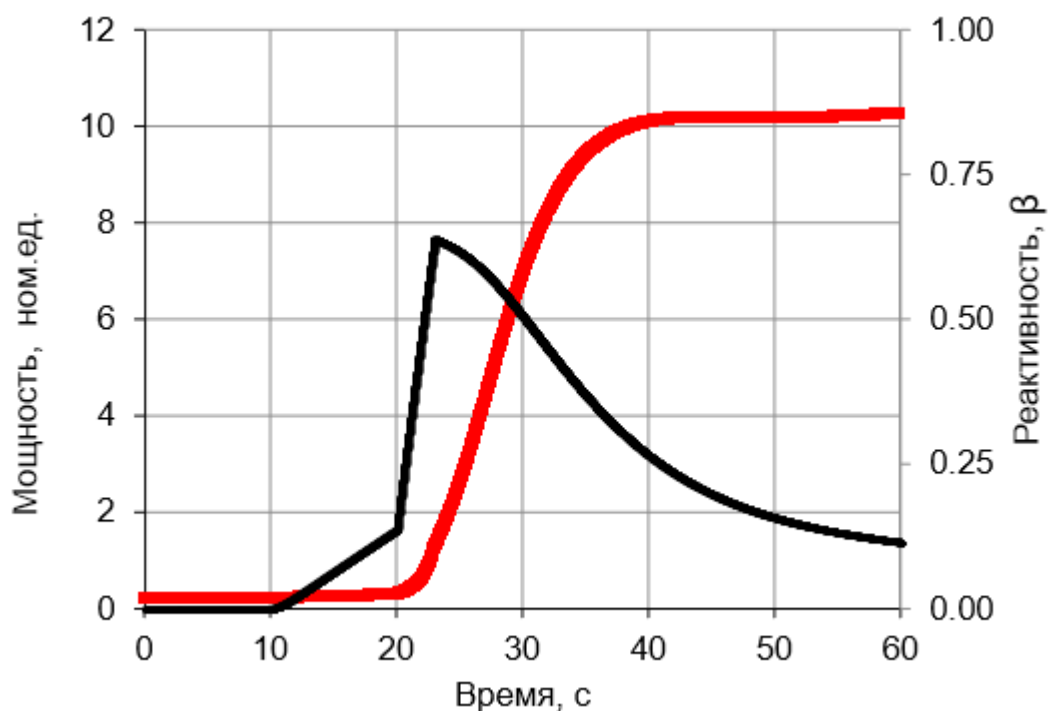


Рис.10. Изменение мощности (более толстая линия) и реактивности, при $\Delta\Theta = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta\rho_{\text{суз}} = 0,5\ \beta$. Время срабатывания АЗ-5 20,0 с. $N_{\text{нач}}=0,22\ N_{\text{ном}}$
 $\frac{\partial\rho}{\partial\theta} = 0,0002\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$; $\frac{\partial\rho}{\partial T} = 0,00001\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

Сравнивая Рис.4. и Рис.10 отмечаем, что время достижения 10-ти кратного значения в единицах номинальной мощности, составляет ~ 20 с, что больше времени работы АЗ-5, поэтому также очевидно, что проведение испытаний на уровне мощности 700 МВт, в более широком диапазоне изменения $\Delta\rho_{\text{суз}}$ и $\Delta\Theta$, по сравнению с испытаниями на уровне мощности в 200 МВт, проходило бы «более безопасно» и даже могло не привести к аварийному процессу.

Заключение.

Представленная модель реактивной аварии на ЧАЭС-4, в отличии от рассмотренных в «печати», позволяет оперативно исследовать влияние различных исходных данных по значениям ТКР, величине «концевого эффекта», внешних воздействий и времени их проявления.

В Табл.1 представлена информация, из которой следует, что при указанных параметрах ТКР, условия «разрушения» твэла (10-ти кратное превышение номинальной мощности) могут быть достигнуты и без учета «концевого эффекта» - без нажатия кнопки АЗ-5, в случае существенного падения расхода теплоносителя.

На ход протекания аварийного процесса 26.04.1986 на РБМК-1000 ЧАЭС-4, существенное влияние оказывают:

Время формирования АЗ-5 – формирование АЗ-5 в соответствии с Регламентом при отключении последнего ТГ приводит к «незначительному» выбросу мощности – до 2-3-х номиналов.

Низкое давление в БС накануне аварии 6,3 МПа, (проектное 7,0 МПа) приводит наряду с «высокой» температурой ~ 280 °С на всасе в ГЦН (проектная – 270 °С) к более раннему проявлению положительной обратной связи за счет образования пара в нижней части канала.

Также результатом проведенных исследований является тот факт, что: «удалось» спроектировать, построить и эксплуатировать реактор, который имеет:

- положительный эффект реактивности при обезвоживании КМПЦ;
- положительный эффект реактивности при обезвоживании контура охлаждения ОР СУЗ;
- положительный эффект реактивности при запаривании (вскипании теплоносителя) топливных каналов;
- положительный эффект реактивности при вводе ОР СУЗ с верхних концевиков – «концевой эффект».

За пределами изложения остались ряд вопросов, которые затрагивались в комментариях к публикациям ПРоАтома по чернобыльской тематике, а также в работе [1], например:

быстродействие эффекта Доплера при изменении температуры топлива;

возможность и условия достижения критичности на мгновенных нейтронах;

границы применимости такой формулировки о связи реактивности и мощности, которая встречается во многих публикациях по кинетике реактора, в том числе и некоторых учебниках: «при $\rho > 0$ мощность увеличивается, а при $\rho < 0$ мощность уменьшается».

Как видно из представленных в работе результатов, в реакторе с обратными связями, к которым относятся все энергетические реакторы, при работе на «энергетических» уровнях мощности при $\rho > 0$ нейтронная мощность увеличивается на начальном этапе, а дальнейшее поведение зависит от параметров обратных связей и в реакторе с отрицательными обратными связями приведет к уменьшению нейтронной мощности при все еще условии, что $\rho > 0$.

Литература.

1. Борисенко В.И. О некоторых параметрах ядерной безопасности уран-графитовых реакторов // Атомная стратегия XXI. 2017. Вып.122. С. 18-21.
2. Канальный ядерный энергетический реактор РБМК / М. А. Абрамов, В. И. Авдеев, Е. О. Адамов и др. / Под общей ред. Ю. М. Черкашова / М.: ГУП НИКИЭТ, 2006.
3. Борисенко В.И., Горанчук В.В. Определение консервативных параметров модели реактора для исследования переходных режимов работы ВВЭР-1000. // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобыля, вып. 20, научно-технический сборник, г. Чернобыль. 2013. С. 28-36
4. Технический отчет «Модернизация проектного режима работы УРБ реакторной установки ВВЭР-1000. Разработка ОАБ по модернизации режима работы УРБ». - ООО «ФИЗАР», 2008.
5. Быков М.А. Анализ показаний аппаратуры нейтронного потока в режимах со срабатыванием ускоренной предупредительной защиты для реакторных установок с реактором ВВЭР-1000 / Быков М.А, Алехин Г.В., Петкевич И.Г. // Шестая междунар. науч.-техн. конф. "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР". 06-29.05.2009. (ОКБ "ГИДРОПРЕСС", Подольск, Россия).
6. Кипин Дж.Р. Физические основы кинетики ядерных реакторов. - М.: Атомиздат, 1967. - 428 с.
7. Кузнецов И.А. Аварийные и переходные процессы в быстрых реакторах. Библиотека эксплуатационника АЭС (т. 17). - М.: Энергоатомиздат, 1987. - С. 171.
8. Информация об аварии на Чернобыльской АЭС и ее последствиях, подготовленная для МАГАТЭ. INSAG-1 / Атомная энергия, т.61, вып.5, 1986. с.301-320.
9. Карпан Н.В. Чернобыль. Месть мирного атома. 2006. <http://www.twirpx.com/file/121267/>.
10. Халимончук В. А., Кучин А. В. Моделирование Чернобыльской аварии. Ядерна та радіаційна безпека т.3 (51). 2011. с.20-28.
11. Румянцев А.Н. Чернобыль в 2009 году. <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&thold=-1&mode=flat&order=1&sid=2842>