

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В КОНТУРАХ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С РЕАКТОРОМ ТИПА БН С УЧАСТИЕМ РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ГЛАВНЫХ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ НАСОСОВ

**Е.Ю. Анишев, В.С. Горбунов**

*ОАО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород*



На основании моделирования теплогидравлических переходных процессов рассмотрены преимущества плавного регулирования расхода теплоносителя в главных контурах АЭС на быстрых нейтронах.

За счет поддержания оптимальных параметров пара на турбинах и более «мягкого» протекания переходных процессов повышается экономичность блока, снижаются термические напряжения и температурные градиенты в корпусных конструкциях реакторной установки.

**Ключевые слова:** моделирование, переходные процессы, атомные электростанции, электропривод главных циркуляционных насосов.

**Keywords:** simulation, transient, nuclear power plant, reactor coolant pump drive.

На тепловых электростанциях введение систем регулирования в технологических системах является в настоящее время главным решением проблем энергосбережения и повышения эффективности блока. На атомной станции, кроме экономической целесообразности, должны быть решены вопросы технического обоснования введения регулирования расхода с точки зрения эксплуатационной безопасности и надежности обеспечения всех основных и аварийных режимов установки. В стационарных режимах наличие системы плавного регулирования расхода теплоносителя позволяет повысить экономичность и надежность работы теплообменников, парогенератора и турбины в режимах «скользящих» параметров пара, снижая при этом термические напряжения в конструкциях [1].

С учетом вентиляторного характера нагрузки, а также значительной доли мощности электроприводов главных циркуляционных насосов (ГЦН-1, ГЦН-2) от общей мощности потребителей собственных нужд блока имеется возможность снизить уровень потерь собственных нужд и повысить КПД станции за счет снижения частоты вращения и потребления мощности на частичных уровнях мощности блока. В переходных режимах задачей регулируемого электропривода является снижение тепловых и гидравлических ударов в оборудовании и создание условий,

способствующих развитию естественной циркуляции теплоносителя в главных контурах.

Проблема возникновения термических напряжений в металлоконструкциях в стационарных и особенно в нестационарных режимах наиболее актуальна для быстрых реакторов. Это обусловлено высокой энергонапряженностью активной зоны и более высоким уровнем перепадов температур в теплопередающих поверхностях, а также использованием более высокотемпературных нержавеющих конструкционных сталей со сравнительно низкой теплопроводностью и высоким коэффициентом термического расширения.

Анализ режимов работы систем регулирования расхода первого и второго контуров блоков типа БН показывает, что ГЦН-1 и ГЦН-2 весьма активно маневрируют во всех переходных и стационарных режимах блока. Изменение частоты вращения ГЦН происходит плавно с минимально установленными ступенями и определенной выдержкой по времени, необходимой для ограничения колебаний температуры в теплонапряженных узлах и теплообменного оборудования, а также влияния параллельно работающих насосов друг на друга. Изменения частоты вращения ГЦН-1 и ГЦН-2 зависят от режимов их работы и происходят в соответствии со статическими характеристиками реакторной установки (РУ).

Диапазон регулирования частоты вращения ГЦН-1 и ГЦН-2 составляет 1:4, при этом минимальная частота вращения определена условиями работы гидростатического подшипника насосов.

Наличие возможности плавно подрегулировать расход теплоносителя индивидуально в каждой петле позволяет устранить нежелательный перекоп гидравлического сопротивления по петлям за счет конструктивной несимметрии петель теплообмена реактора, а также поддерживать оптимальные энергетические параметры турбин.

Имея возможность плавно регулировать расход теплоносителя главных контуров, мощность реактора, расход питательной воды, поданной на парогенератор, можно плавно с соблюдением заданных ограничительных градиентов поднимать температуры теплоносителей, выдерживая при этом оптимальные для турбины параметры пара.

Степень участия систем регулирования оборотов ГЦН в режимах реактора иллюстрируется на основных режимах установки типа БН:

**Пуск установки** (вывод на мощность), нормальное маневрирование и плановый останов установки.

Пуск реактора до минимально-контролируемого уровня производится системой управления и защиты реактора при постоянном расходе ГЦН-1 и ГЦН-2.

Подъем мощности сопровождается повышением температуры натрия на выходе из реактора при пропорциональном увеличении расхода питательной воды. При этом температура натрия на выходе из парогенераторов поддерживается постоянной.

Частота вращения ГЦН-1 и ГЦН-2 сначала устанавливается минимальной, затем ступенчато или плавно поднимается с плавным подъемом мощности реактора  $N$  и соответствующим пропорциональным повышением расхода питательной воды  $D_{пв}$ .

Плановый останов осуществляется в обратном порядке.

**Режимы срабатывания аварийной защиты (АЗ)** предусматриваются для вывода установки из работы в аварийных ситуациях, требующих максимальной скорости снижения мощности реактора. При появлении соответствующих аварийных ситуаций формируется сигнал АЗ, в соответствии с которым

- глушится мощность реактора с помощью системы управления и защиты (СУЗ);

- ГЦН-1 и ГЦН-2 переводятся с исходных частот вращения на пониженные;
- запускаются дизельгенераторы – автономные источники питания неотключаемых ответственных потребителей.

Температура теплоносителя второго контура на выходе из парогенератора поддерживается постоянной за счет соответствующего изменения расхода питательной воды.

Производится расхолаживание установки.

**Режим предупредительной защиты (ПЗ) «отключение петли теплообмена»** предусматривается при возникновении различных аварийных ситуаций: в случаях необходимости отключения ГЦН-1 или ГЦН-2 по срабатыванию собственных защит; при течах в парогенераторах или трубопроводах второго контура; при прекращении подачи питательной воды в парогенераторы одной петли и др.

Подключение петли при работе установки на мощности возможно только при плавном регулировании частот вращения ГЦН-1 и ГЦН-2. Регулирование необходимо для обеспечения минимальных температурных разбалансов между петлями, наименьших отклонений температур в теплообменном оборудовании РУ и наименьшей разницы температур в напорной камере реактора из-за разнотемпературного натрия, поступающего со стороны работающих и подключаемой петель.

**Режим «потеря системного электроснабжения».** При обесточивании установки, работающей на мощности, по аварийному сигналу производится перевод реактора в подкритическое состояние, снижение на пониженные частоты вращения ГЦН-1 и ГЦН-2 по кривым свободного выбега. Предусмотрено использование энергии выбегающих турбогенераторов блока совместно с ГЦН-1 и ГЦН-2 и всех ПЭН. Это означает, что в течение нескольких минут как ГЦН, так и ПЭН не отключаются от генераторов, и их частоты вращения поддерживаются в соответствии с проектным алгоритмом. Далее происходит их механический выбег. В это время запускаются аварийные источники – дизельгенераторы, которые обеспечивают энергоснабжение ГЦН-1 и ГЦН-2 и аварийных ПЭН.

**Режим перегрузки.** Расхолаживание реактора при перегрузке активной зоны осуществляется с помощью ГЦН-1 и ГЦН-2, включенных на минимальные частоты вращения. В зависимости от периода времени, прошедшего после останова реактора, в отводе остаточного тепловыделения участвует от трех до одной петель циркуляции.

Однако не следует считать, что замена нерегулируемого электропривода приводом с плавным регулированием частоты вращения является простой, не требующей всесторонней оценки задачей.

Весьма затруднительно однозначно получить решение о необходимости применения плавного регулирования расхода теплоносителя главных контуров без качественной оценки алгоритмов проведения режимов работы установки и без расчетов этих режимов с оценкой температурных полей в наиболее ответственных и напряженных узлах установки.

Ввиду значительной энергонапряженности и необходимости безусловной повышенной надежности современных реакторов большой мощности уделяется повышенное внимание расчету динамики таких установок. Существуют разработанные математические модели и реализующие их расчетные программы, которые могут быть использованы для решения поставленного вопроса о способе регулирования расхода теплоносителя путем исследования температурных полей и напряженных состояний в узлах установки [2, 3].

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

**Расчет гидродинамики.** Математическая модель РУ условно представлена двумя петлями теплообмена для описания несимметричного прохождения переходных процессов. Перечень моделируемого оборудования включает в себя основные элементы и системы первого, второго и третьего контуров установки, определяющие протекание переходных процессов в данном расчетном анализе.

Гидравлика контуров описана с учетом движущих напоров естественной циркуляции и возможности изменения направления движения теплоносителей.

При математическом моделировании гидродинамики контуров были сделаны основные предположения:

- система циркуляции теплоносителя в первом контуре представлена двумя петлями с насосами, подсоединенными к общему участку (реактор);
- распределение расходов по радиусу в реакторе не учитывается;
- общий участок (реактор) представлен в виде двух каналов – активной зоны (АЗ) и бокового экрана (БЭ), связанных по входам и выходам (рис. 1а);
- перемешивание теплоносителя в напорной камере и в верхней камере смешения реактора принято идеальным; поток теплоносителя является одномерным, а теплоноситель несжимаемым;
- учитывается гидравлическое сопротивление остановленных насосов, сопротивление реактора при малых расходах описывается линейной зависимостью;
- напоры насосов описываются комплектной характеристикой;
- изменение во времени гидравлического сопротивления переключаемой запорной арматуры учитывается путем задания табличной функции гидравлического сопротивления от времени.

Расчетное обоснование эксплуатационных характеристик и безопасности реакторных установок с быстрыми реакторами проводится, в том числе в режимах с использованием системы аварийного расхолаживания вспомогательного теплообменника (ВТО), встроенного во второй контур (рис. 1б).

Гидравлика контуров описывается следующими системами дифференциальных уравнений.

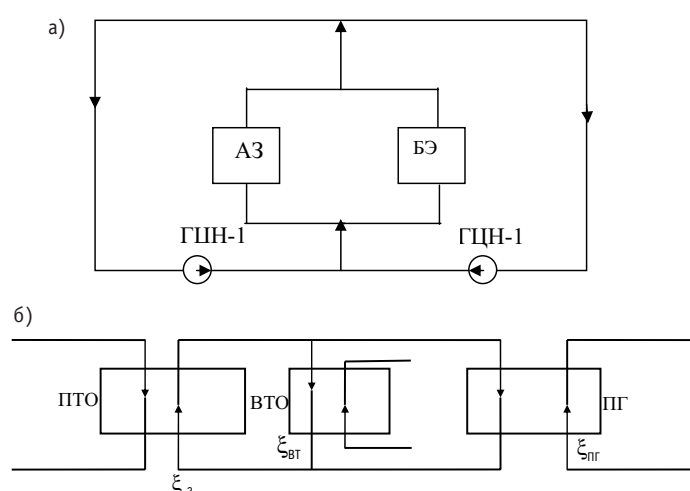


Рис. 1. Расчетные схемы гидравлики первого (а) и второго (б) контуров: АЗ – активная зона; БЭ – боковой экран; ПТО – промежуточный теплообменник; ВТО – вспомогательный теплообменник; ПГ – парогенератор

### Модель гидравлики первого контура

$$\begin{aligned} \tau_{a.з.} \dot{\xi}_{a.з.} + \tau_1 \dot{\xi}_1 &= H_1 \\ \tau_{a.з.} \dot{\xi}_{a.з.} + \tau_2 \dot{\xi}_2 &= H_2 \\ G_{a.з.}^0 \dot{\xi}_{a.з.} + G_{б.з.}^0 \dot{\xi}_{б.з.} &= \sum_{i=1}^2 (\xi_i \cdot G_i^0) \\ \tau_{a.з.} \dot{\xi}_{a.з.} - \tau_{б.з.} \dot{\xi}_{б.з.} &= H_{a.з.-б.з.} \end{aligned} \quad \begin{aligned} \xi &= \frac{G}{G_0} \\ \tau &= \left( \frac{G_0}{g} \sum_i \frac{L_i}{S_i} \right) \\ H_i &= H_{наси} + H_{ЕЦi} - \Delta p_i \\ H_{ЕЦi} &= \sum_j (\gamma h)_j \\ H_{наси} &= H_{наси}^0 \cdot f(\xi_i, \psi_i) \end{aligned}$$

(индекс обозначает номер петли).

### Модель гидравлики второго контура

$$\begin{aligned} \tau_1 \dot{\xi}_2 + \tau_2 \dot{\xi}_{ПГ} &= H_{2-ПГ} \\ \tau_1 \dot{\xi}_2 + \tau_3 \dot{\xi}_{ВТ} &= H_{2-ВТ} \\ \xi_2 &= \xi_{ВТ} + \xi_{ПГ} \\ \xi_i &= \frac{G_i}{G_{2,0}} \end{aligned} \quad \begin{aligned} \tau &= \left( \frac{G_{2,0}}{g} \sum_j \frac{L_j}{S_j} \right) \\ H_{2-i} &= H_{нас2} + H_{ЕЦ2-i} - \Delta p_i \\ \Delta p_i &= \varphi_1 \xi_2 / \xi_2 + \varphi_i \xi_i / \xi_i / \\ H_{ЕЦ2-i} &= \sum_j (\gamma h)_j \\ H_{нас2} &= H_{нас2}^0 \cdot f(\xi_2, \psi_2) \end{aligned}$$

(индекс  $i$  относится к трассе ВТО или ПГ)

где  $\psi_1 = \frac{\omega_{1нас}}{\omega_{1,0нас}}$ ,  $\psi_2 = \frac{\omega_{2нас}}{\omega_{2,0нас}}$  – частоты вращения ГЦН-1 и ГЦН-2 в относительных единицах;

$\omega_{1нас}$ ,  $\omega_{2нас}$  – частоты вращения насосов в петлях 1 и 2 контуров;

$L_i$ ,  $S_i$  – длина и сечение  $i$ -го участка трассы;

$G_0$ ,  $\xi$  – номинальный и относительный расход теплоносителя соответственно;

$H_{1,2} = H_{нас1,2} + H_{ЕЦ1,2} - \Delta P_{1,2}$ ;  $H_{a.з.-б.з.} = H_{ЕЦ1,2}^{a.з.-б.з.} - \Delta P_{a.з.} + \Delta P_{б.з.}$ ;

$\Delta P_{1,2}$  – сопротивление трассы первой и второй петель с учетом сопротивления обратного клапана в ГЦН первой и второй петель (индекс «нас» обозначает насос; индекс ЕЦ – обозначает «естественная циркуляция»);

$g$  – ускорение свободного падения;

$\gamma$  – плотность теплоносителя;

$h_j$  – высоты участков разбиения контура циркуляции;

$f(\xi_i, \psi_i)$ ,  $f(\xi_2, \psi_2)$  – комплектная характеристика ГЦН-1 и ГЦН-2;

$H_{наси}^0$  – номинальный напор насоса первого контура;

$\varphi_i$  – местные сопротивления трасс, включающих ПТО, ПГ и ВТО соответственно.

Скорость вращения ротора электропривода определяется из закона сохранения момента импульса, записанного в виде

$$J_{нас}^j \frac{d\omega_n^j}{dt} = M_j^{ДВ} - M_{нас}^j - M_{ПОТ}^j,$$

где  $j$  – индекс электродвигателя;  $J_{нас}^j$  – суммарный механический момент инерции ротора электродвигателя и рабочего колеса насоса, навешенного на вал ротора электродвигателя;  $\omega_n^j$  – частота вращения ротора электродвигателя;

$M_j^{ДВ}$ ,  $M_{нас}^j$  – моменты сил, развиваемые электродвигателем и рабочим колесом на-

соса соответственно;  $M_{\text{пот}}^j$  – момент сил трения в подшипниках и уплотнениях электродвигателя и навешенного на его вал оборудования.

**Теплогидравлическая модель активной зоны** представлена в виде трех расчетных каналов: один моделирует усредненную ТВС, другой – максимально напряженную ячейку, третий – ТВС бокового экрана.

При математическом моделировании были приняты основные допущения:

- математическая модель для всех каналов одинаковая;
- теплоноситель несжимаем;
- твэл трехслойный (наружный слой – оболочка, промежуточный – газовый зазор, внутренний – топливо);
- перетечка тепла во внутреннюю полость топливного стержня отсутствует;
- тепловыделение сосредоточенно в топливе (в оболочке и газовом зазоре оно отсутствует);
- предполагается, что газовый зазор не имеет массы, а имеет только термическое сопротивление (температурная зависимость термического сопротивления зазора между топливом и оболочкой твэла при этом не учитывается);
- осевые перетечки тепла во всех слоях твэла и в теплоносителе не учитываются;
- распределение температуры по толщине оболочки линейное;
- гидродинамика представлена в одномерном приближении.

Для расчета нестационарного поля температур цилиндрического твэла с принадлежащей ему долей теплоносителя решают уравнения в частных производных: для топливного стержня; для оболочки; для теплоносителя; граничные условия; начальные условия.

Замыкающие соотношения записываются для границ топливо-оболочка, оболочка-теплоноситель.

Теплопередача между натрием и оболочкой рассчитывается с использованием свойств натрия и значений соответствующих коэффициентов теплопередачи. Учитывается изменение температуры по толщине оболочки, обусловленное теплопроводностью. Учитывается наличие зазора между топливом и оболочкой. При расчете температуры топлива учитываются изменения его теплофизических свойств, в том числе теплопроводности.

В программе предусмотрен расчет максимальной температуры оболочки твэлов с учетом факторов перегрева.

**Промежуточный теплообменник.** Основные допущения:

- ПТО представлен одной эквивалентной теплообменной трубкой;
- теплоноситель несжимаем;
- осевые перетечки тепла в теплоносителе не учитываются.

Нестационарное температурное поле в теплообменнике с цилиндрической стенкой описывается системой трех уравнений энергии в частных производных: для первого теплоносителя, движущегося внутри трубы; для цилиндрической стенки; для второго теплоносителя, омывающего трубку; граничные условия. Учитывается зависимость теплоемкости и удельного веса натрия от температуры.

Математическая модель динамики теплообмена в ВТО аналогична математической модели ПТО без учета теплообмена с окружающей средой.

**Парогенератор.** Математическое описание динамики парогенератора получено для противоточного течения сред. Закон сохранения массы и закон сохранения энергии представлены в частных производных.

В программе относительно подробно учитываются основные режимы теплопередачи (участки подогрева, поверхностного и пузырькового кипения, ухудшенного

теплообмена и перегревателный). Формулы для расчета коэффициентов теплопередачи записаны в соответствии со статическими расчетами.

### АНАЛИЗ РЕЖИМОВ С РЕГУЛИРОВАНИЕМ ЧАСТОТ ВРАЩЕНИЯ ГЦН

Рассмотрим отдельные режимы работы установки, в которых наиболее эффективно наличие системы плавного регулирования расхода теплоносителя главных контуров (ГЦН-1, ГЦН-2).

#### Режимы снижения и подъема мощности РУ

Рассмотрены два варианта режима нормального маневрирования (снижения и подъема мощности): с плавным регулированием частот вращения насосов первого и второго контуров и при ступенчатом изменении частот вращения. Результаты с иллюстрацией разницы между вариантами приведены на рис. 2. Из графиков видно, что при плавном регулировании отклонения температур в активной зоне существенно меньше, чем при ступенчатом изменении частот вращения ГЦН первого и второго контуров.

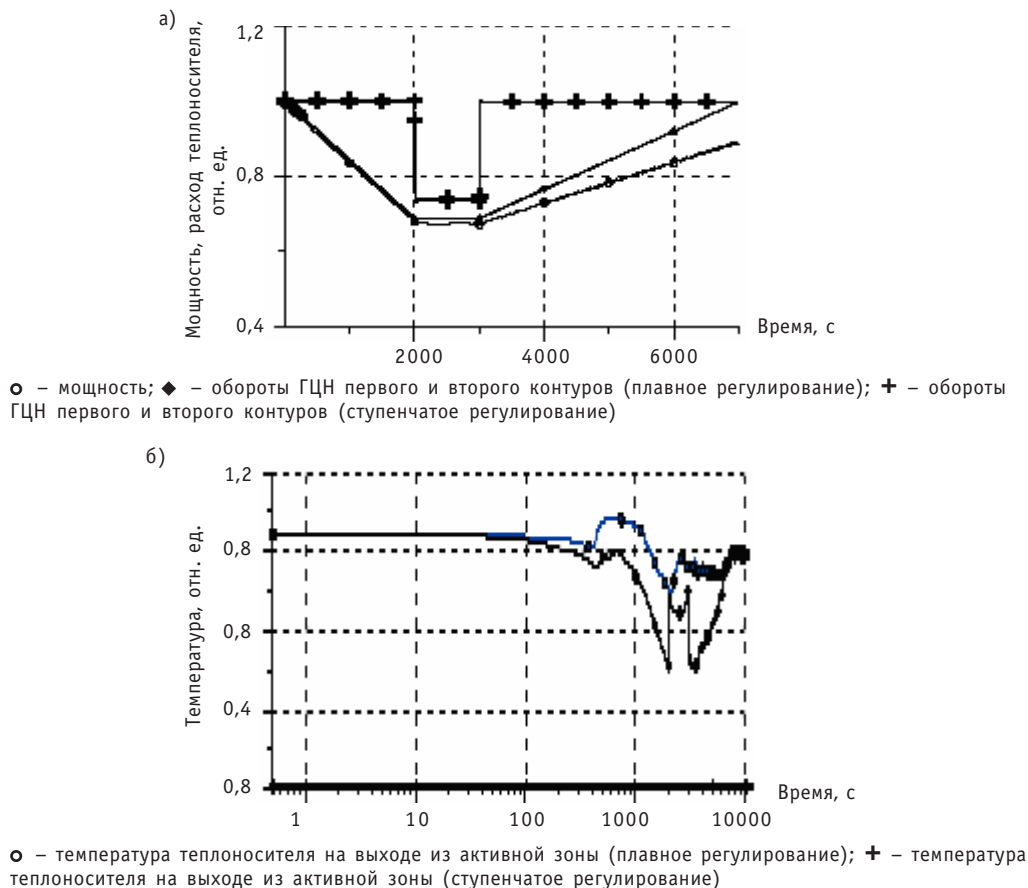


Рис. 2. Режимы снижения и подъема мощности РУ при плавном и ступенчатом регулировании расхода теплоносителя

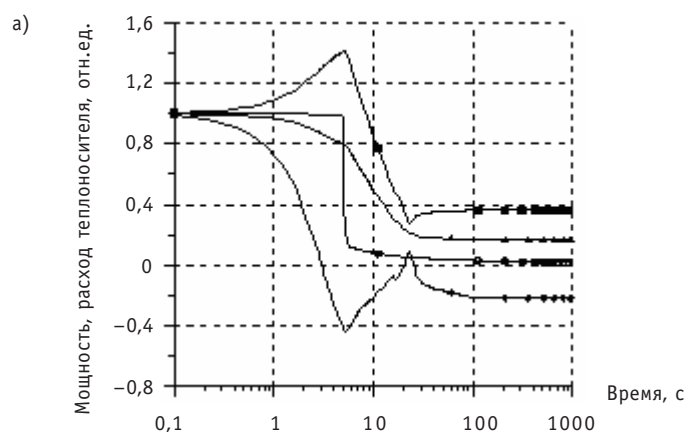
#### Срабатывание АЗ по сигналу повышения отношения мощности реактора к расходу теплоносителя через него

В качестве исходного события для расчетов было выбрано событие, приводящее к максимальным отклонениям параметров РУ в переходном процессе, – отключение одного из трех ГЦН первого контура с отказом формирования сигнала

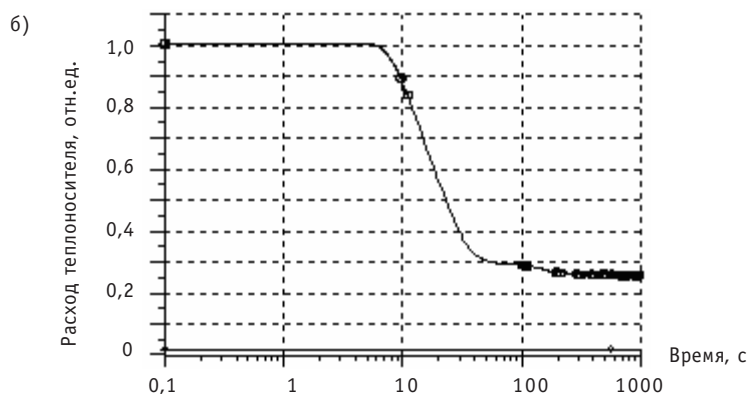


«отключение одной из трех работающих петель» при работе реактора на 100%  $N_{\text{ном}}$ . Отключение насоса приводит к уменьшению расхода натрия через реактор, а поскольку в данном случае мощность, поддерживаемая регулятором, остается на номинальном уровне, происходит формирование сигнала повышения отношения  $N/G$ .

Результаты расчета изменений основных параметров РУ в данном режиме приведены на рис. 3. Согласно выполненным расчетам, сигнал повышения отношения мощности реактора к расходу теплоносителя через него формируется в данном случае с задержкой по времени от начала переходного процесса.



○ – мощность; Δ – расход натрия через активную зону; ■ – расход натрия первого контура через промежуточные теплообменники нормально работающих петель; ◆ – расход натрия первого контура через промежуточный теплообменник аварийной петли



○ – расход теплоносителя второго контура через промежуточные теплообменники; □ – расход теплоносителя второго контура через парогенераторы; ◆ – расход теплоносителя второго контура через воздушные теплообменники

Рис. 3. Режим аварийной защиты по сигналу повышения отношения  $N/G$

Из приведенных на рис. 3 графиков видно, что в результате ввода отрицательной реактивности от стержней мощность реактора с номинального уровня снижается до уровня остаточных тепловыделений. После отключения ГЦН-1 расход в петле быстро уменьшается вплоть до опрокидывания (см. рис. 3а). Во время отработки системой управления ГЦН первого контура сигнала АЗ расход в аварийной петле увеличивается, затем вновь опрокидывается и устанавливается на заданном уровне. Расход натрия в оставшихся в работе петлях из-за уменьшения гидравлического сопротивления трассы возрастает в первые секунды переходного процесса.

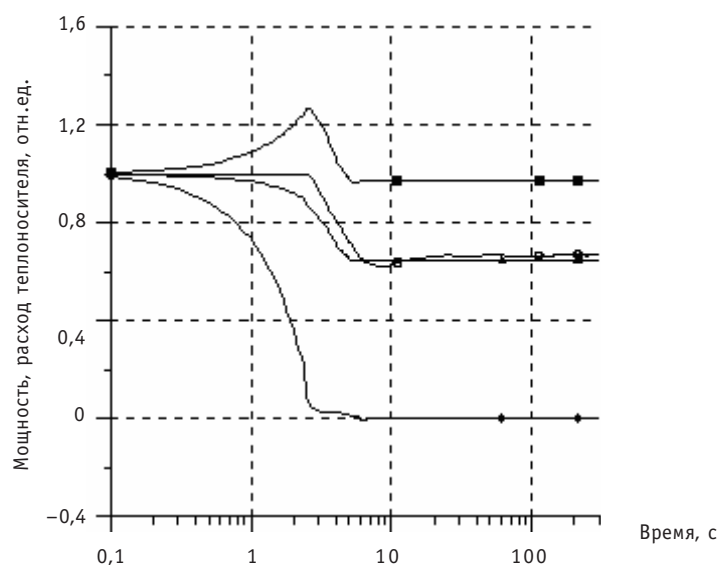


са. После перевода ГЦН-1 на пониженные обороты расход теплоносителя в этих петлях устанавливается равным номинальному для каждой петли.

Расходы теплоносителя второго контура через промежуточные теплообменники и ПГ при переходе ГЦН-2 на пониженные обороты также устанавливаются равными заданному (см. рис. 3б).

### Срабатывание ПЗ по сигналу «отключение одной из трех работающих петель»

Изменение расходов при срабатывании ПЗ по сигналу «Отключение одной из трех работающих петель» при автоматической остановке ГЦН-1 приведены на рис. 4.



○ – мощность; Δ – расход натрия через активную зону; ■ – расход натрия первого контура через промежуточные теплообменники нормально работающих петель; ◆ – расход натрия первого контура через промежуточный теплообменник аварийной петли

Рис. 4. Режим ПЗ по сигналу «Отключение одной из трех работающих петель»

Согласно выполненным расчетам, сигнал, требующий остановки ГЦН-1, сформировался в данном случае с задержкой.

Из приведенных на рис. 4 графиков видно, что в результате отработки алгоритма ПЗ мощность реактора с номинального уровня снижается. После отключения ГЦН-1 и закрытия обратного клапана в аварийной петле расход в ней быстро уменьшается до нуля. Расход натрия в оставшихся в работе петлях из-за уменьшения гидравлического сопротивления трассы возрастает в первые секунды переходного процесса. После перевода ГЦН-1 на пониженные обороты расход теплоносителя в этих петлях восстанавливается.

Следует отметить, что приведенное в статье исследование целесообразности расхода теплоносителя главных контуров с плавно регулируемым электроприводами ГЦН в настоящее время в проектах обосновывается более углубленно, с привлечением высоких современных требований к материалам и их прочности в условиях предельных статических и циклических нагрузжений. Эти требования отражены в «Нормах расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭГ-7-002-86)».

На основании анализа режимов работы блока в основных и аварийных режимах могут быть разработаны и сформулированы технические требования к систе-

мам регулирования расхода теплоносителя, включая алгоритмы работ электроприводов ГЦН.

Плавный регулируемый электропривод для расхода теплоносителя главных контуров является одним из необходимых условий создания высокой технологии производства электроэнергии, особенно с учетом высокой энергонапряженности узлов реакторов на быстрых нейтронах, наличия целого ряда дополнительных преимуществ плавного регулируемого электропривода, его быстро прогрессирующего развития в мире и экономичность в условиях АЭС. Наличие плавного регулирования расхода существенно ускоряет первый пуск и освоение мощности блока, облегчает условия его эксплуатации.

Возможность плавного регулирования расхода может быть использована как в статических, так и динамических режимах, в том числе для

- поддержания параметров скользящего пара и получения высоких энергетических параметров турбины;
- выравнивания расходов по петлям с целью устранения конструктивной несимметрии петель теплообмена, иначе требуется установка дросселирующих устройств в петлях второго контура для выравнивания гидравлических сопротивлений и выходных температур;
- поддержания в допустимых пределах разности температур теплоносителя по петлям на входе в напорный коллектор реактора и для поддержания оптимальных параметров пара при отключении секций парогенератора;
- исключения работы на частотах, вызывающих вибрацию оборудования вследствие резонансов;
- выполнения целей поддержания различных технологических параметров, способствующих, например, развитию естественной циркуляции, снижению термических ударных нагрузок в режимах расхолаживания, аварийных режимах, когда электропривод включен в состав АСУ ТП всего блока [4].

Наконец, введение плавного регулирования позволяет сократить время простоя и упростить алгоритм ввода отключенной петли, так как для ввода петли останова всей установки в этом случае не требуется и осуществляется при работающих на мощности неотключенных петлях. Это позволяет считать такой режим ввода петли более экономичным и с точки зрения термоциклики более мягким.

### **Литература**

1. Анишев Е.Ю. Техничко-экономические аспекты внедрения регулируемых электроприводов главных циркуляционных насосов атомных электростанций/Сб. докладов научно-технической международной конференции «Безопасность, эффективная экономика» (МНТК-2008). – М., 2008. – С. 606.
2. Кузнецов И.А. Аварийные и переходные процессы в быстрых реакторах. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
3. Митенков Ф.М., Багдасаров Ю.Е., Букша Ю.К., Востоков В.С., Горбунов В.С., Заец Н.П., Самойлов О.Б., Кузнецов Н.А., Козырев В.Д., Ашурко Ю.М., Шейкман А.Г. Инженерные методы анализа режимов с естественной циркуляцией в установках типа БН// Атомная энергия. – 1987. – Т. 62. – Вып. 3.
4. Востоков В.С., Горбунов В.С., Заец Н.П., Тихановский В.В., Анишев Е.Ю. Способ аварийного расхолаживания многопетлевой установки с ядерным реактором и ядерная энергетическая установка. А.С. № 1816146, Б.И. № 22, 1996.

Поступила в редакцию 5.05.2010

# УДК 539.125.5.03:621.039.512

*Interval Estimation of Reactivity* \A.G. Yuferov, R.L. Ibragimov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 7 pages, 2 illustrations. – References, 13 titles.

The algorithms of an estimation of an interval of uncertainty for a reactivity meter are described on the basis of an integral equation of a kinetics.

# УДК 504.064

*Management of Remediation Measures on Radioactively Contaminated Territories with the use of Multiobjective Optimization* \S. Gritsyuk, B. Yatsalo, V. Didenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 11 pages, 3 tables, 2 illustrations. – References, 35 titles.

Optimization of the countermeasure structure on remediation of radioactively contaminated territory is considered. Multiobjective optimization is based on implementation of modified genetic algorithms and treatment of uncertain/fuzzy criteria. Geographic information system (GIS) of contaminated territory is used within the case study analysis on countermeasure optimization. This study demonstrates effectiveness of integration of multiobjective methods, genetic algorithms and GIS within the problems on environmental protection and remediation of contaminated sites.

# УДК 504.45: 546.027

*Up-to-date Content of Long-Lived Artificial Radionuclides in the Area of the Tom and Ob Rivers Impacted by the Siberian Chemical Combine Discharges* \A.I. Nikitin, I.I. Kryshev, N.I. Bashkurov, N.K. Valetova, G.E. Dunaev, A.I. Kabanov, I.Yu. Katrich, A.O. Krutovsky, V.A. Nikitin, G.I. Petrenko, A.M. Polukhina, G.N. Selivanova, V.B. Chumichev, V.N. Shkuro; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 11 pages, 5 illustrations. – References, 9 titles.

Data are presented and discussed on content of  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{239,240}\text{Pu}$  and other artificial radionuclides in water, bottom sediments and flood-plain soils of the Tom and Ob rivers part from Tomsk to the region of their confluence (through which the radioactive effluents of the Siberian Chemical Combine are transported). Data received in 2008-2009 in frames of the ISTC Project No.3547 «Analysis of radionuclide transport and assessment of radiation risk for population and environmental objects in the Ob-Irtysh river basin».

# УДК 621.039.51: 621.039.58

*Numerical-Experimental Analysis of Emergency Shut Down Cooling of VVRC Reactor at Loss of ELECTRICAL Supplying of the Circulating Pumps* \O.Yu. Kochnov, V.V. Sergeev, A.A. Kazantsev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 13 pages, 8 tables, 12 illustrations. – References, 6 titles.

Based on the experiment performed on the pool type research reactor VVRC during operation at emergency condition of shut down cooling and the data obtained on reactor IS RY RBT-6, post-test calculations of dynamics at shut down cooling of facility are carried out at loss of power supply of circulating pumps. In the paper are presented the results of calculations at shut down cooling of reactor VVRC at natural circulation mode, starting from maximal acceptable power. Calculations were carried out with using the international thermal hydraulic code TRAC designed for the analysis of technical safety for water-cooled nuclear power plants.

# УДК 621.039.5

*Simulation of Transients in the Circuits of Nuclear Power Plants with BN-type Reactors Involving Variable-Speed Drives of Reactor Coolant Pumps* \E.Yu. Anishev, V.S. Gorbunov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 10 pages, 4 illustrations. – References, 4 titles.

Based on the simulation of thermal hydraulic transients, the paper analyzes the advantages of smooth variation of coolant flow in the primary circuits of nuclear power plants with fast neutron reactors.

Maintenance of optimal turbine steam parameters and “softer” transients help to increase power unit cost effectiveness and reduce thermal stresses and temperature gradients in reactor plant vessel structures.

# УДК 621.039.5

*Parameters of Fluctuations of the Working Body at Pulse Indignations on Pressure in the Second Contour of the Atomic Power Station with VVER-1000* \R.O. Katereev, K.N. Proskurjakov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 7 pages, 6 tables, 3 illustrations. – References, 5 titles.