

На правах рукописи

Башарат Али

**Повышение надежности и маневренности
энергоблоков с водо-водяными реакторами за счёт
регулирования расхода теплоносителя**

**Специальность 05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая
проектирование, эксплуатацию и вывод из
эксплуатации**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

**Санкт-Петербург
2002**

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Лощаков И. И.

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук, профессор Благовещенский А. Я.
- кандидат технических наук, Кутахов А. Г.

Ведущая организация: ОАО «Центральный котлотурбинный институт
им. И. И. Ползунова».

Защита диссертации состоится 18 июня 2002 г. в 18 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.04 в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете по адресу:

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, в аудитории 411 ПКГ.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Автореферат разослан _____ 2002 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Григорьев К.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Развитие ядерной энергетики требует решения ряда важных научных и инженерных вопросов. К их числу относятся, прежде всего, повышение безопасности, надежности, эффективности и экономичности вновь создаваемого и уже используемого основного оборудования атомных энергоблоков с водяными реакторами (ВВЭР). Решение этих вопросов должно быть связано с изучением возможности адаптации таких энергоблоков к условиям их работы в современных и перспективных энергосистемах. Эти особенности становятся наиболее важными при возрастании доли выработки энергии на АЭС с водяными реакторами в крупных энергообъединениях. В настоящее время и в будущем, несомненно, к ядерным энергетическим установкам будут предъявляться повышенные требования, связанные с маневренностью и надежностью. Условия эксплуатации должны быть такими, чтобы с повышением маневренности не ухудшалась надежность.

Имеющийся 45-летний опыт эксплуатации атомных электростанций показал, что атомные электростанции могут успешно эксплуатироваться не только в течение проектных сроков, обычно в пределах 20 - 30 лет, но и значительно больше. Когда оборудование АЭС и главные системы энергоблока близки к выработке ресурса, управление и продление срока службы ядерной энергетической установки становятся важными проблемами, представляющими интерес. При этом особое внимание следует уделить вопросу безопасности энергоблока, так как вероятность отказа оборудования увеличивается. При этом возникает необходимость исследовать условия эксплуатации энергоблока, поддерживающие продление срока службы АЭС, повышая её долговечность, безопасность. Одним из таких условий является режим эксплуатации с минимальными термоциклическими напряжениями оборудования, за счёт уменьшения циклических изменений температур и давления 1-ого и 2-ого контуров.

Таким образом, применение способов регулирования, с целью повышения надежности, маневренности и экономичности – актуальная задача.

Цель работы. Целью исследований в диссертации является определение способов регулирования энергоблоков с ВВЭР при их работе в маневренном режиме, удовлетворяющих следующим условиям:

- повышению надежности и маневренности;
- повышению экономичности;
- автоматизацией предлагаемого способа и изменением принципиальной схемы регулирования.

Научная новизна. К новым научным результатам относятся:

- анализ способов регулирования производительности главных циркуляционных насосов (ГЦН);
- анализ теплопередачи в активной зоне реактора при регулировании расхода;
- повышение долговечности и надежности оборудования, особенно парогенераторов, вследствие уменьшения амплитуды колебания температур оборудования первого и второго контуров;
- повышение маневренности за счет минимизирования изменений температур в первом контуре (ПК);
- экономия мощности, потребляемой ГЦН, т.е. увеличение КПД (нетто) энергоблока;

Достоверность и обоснованность результатов работы.

Полученные характеристики изменения основных параметров АЭС с высокой точностью совпадают с многочисленными теоретическими и экспериментальными характеристиками, полученными другими исследователями. Новые характеристики получены на апробированных таким образом моделях энергоблоков.

Практическая ценность работы. Предложенная программа регулирования может быть реализована на действующих АЭС с водо-водяными реакторами практически

без их реконструкции. При этом существенно повышаются их эксплуатационные качества.

Автор выносит на защиту:

- способ управления энергоблоков с реакторами ВВЭР (в качестве примера ВВЭР-440) с регулированием производительности ГЦН;
- исследования полученных статических и динамических характеристик энергоблока;
- принципиальную схему регулирования и анализ экономичности.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на “XXVII Неделя науки СПбГТУ”, межвузовской научной технической конференции "Состояние энергетики в Пакистане" (С-Петербург 1999 г.); на “XXIX Неделя науки СПбГТУ”, межвузовской научной технической конференции "Анализ безопасности реактора ВВЭР-440 при уменьшении частоты тока в сети" (С-Петербург 2001 г.); на международной конференции молодежного отделения ядерного общества России «Полярное сияние - ядерное будущее: безопасность, экономика и право» "Работа реактора ВВЭР-440 при уменьшении частоты в энергосистеме" (С-Петербург, 2001 г.); на международной конференции молодежного отделения ядерного общества России «Полярное сияние - ядерное будущее: безопасность, экономика и право» "Улучшение характеристик регулирования энергоблока АЭС с ВВЭР" (С-Петербург, 2002 г.); в журнале «Ядерная энергетика» “Регулирование энергоблоков АЭС с ВВЭР, при изменении производительности ГЦН” (№ 1, 2002); на «Sixth International Workshop on New Approaches to High-Tech: Nondestructive Testing and Computer Simulations in Science and Engineering» “Minimizing aging processes in equipment of NPP with PWR by regulating the primary coolant circulation” (St. Petersburg, 2002); на VI Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования в технических университетах» “Уменьшение малоциклового усталости оборудования АЭС с ВВЭР за счёт управления расходом

теплоносителя первого контура” (С-Петербург, 2002.); на VI Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования в технических университетах» “Уменьшение малоцикловой усталости оборудования АЭС с ВВЭР за счёт управления расходом теплоносителя первого контура” (Санкт-Петербург, 2002.); на международной научно-практической конференции «Теоретические и практические проблемы развития электроэнергетики России» “Участие АЭС с ВВЭР в регулировании частоты при аварийном дефиците активной мощности в энергосистеме” (С-Петербург, 2002).

Публикации результатов работы. Результаты диссертации отражены в восьми публикациях.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы из 115 источников. Диссертация выполнена на 141 страницы, содержит 37 рисунков и графиков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

На АЭС с реакторами ВВЭР применяют несколько программ регулирования мощности при постоянном расходе теплоносителя. Эти программы имеют свои преимущества и недостатки.

Одним из основных недостатков применяемых программ регулирования является значительная амплитуда колебаний основных параметров (температур и давления) энергоблока при переменных режимах работы. Эти колебания могут приводить к малоцикловой усталости металла энергооборудования, уменьшая, тем самым, надежность и долговечность АЭС. Один из способов, чтобы избежать этого недостатка – регулирование расхода теплоносителя через реактор при переменных режимах.

На основании обзора литературных источников сформулированы задачи исследований:

- исследование возможности регулирования расхода теплоносителя в первом контуре АЭС с ВВЭР (в качестве примера, с ВВЭР-440) в соответствии с изменением мощности;
- сравнительный анализ статических и динамических характеристик программ регулирования при постоянном и регулируемом расходе теплоносителя в ПК энергоблока;
- исследование (усовершенствование) системы автоматического регулирования энергоблока, с помощью которой возможно реализовать предлагаемую программу регулирования с переменным расходом теплоносителя, повысить надежность и маневренность энергоблоков с водо-водяными реакторами.

Изменение числа находящихся в работе петель, при изменении нагрузки блока, позволяет уменьшить необходимый диапазон изменения давления во втором контуре (ВК) и увеличить пределы регулирования мощности реактора. Испытания, проведенные на Кольской АЭС, и расчеты показали принципиальную возможность реализации подобной программы.

Известно, что для оборудования ПК энергоблока более благоприятна программа регулирования с постоянной средней температурой в 1-ом контуре ($T_{\text{ср}} = \text{const}$), а для оборудования ВК — программы регулирования с постоянным давлением во ВК ($p_2 = \text{const}$). В связи с этим заслуживает внимания рассмотрение возможностей удержания постоянными как можно большее число параметров. Поскольку изменения температур приводят к процессам старения оборудования АЭС, желательно температуры в первом и втором контурах поддерживать постоянными при изменении мощности блока. Таким образом, можно исследовать изменение расхода теплоносителя в ПК при изменении мощности блока.

В стационарном режиме тепловая мощность блока q , в относительных единицах, можно определить следующими уравнениями:

$$q = \frac{f_0}{f(t_1, t_4, \pi_2)} \cdot (a_1 \cdot t_1 - a_4 \cdot t_4) \cdot u(g, q) \quad (1)$$

(баланс между первым и вторым контурами) и

$$q = \left(\frac{Cp(t_1, t_4)}{Cp_0} \right) \cdot (a1 \cdot t_1 - a4 \cdot t_4) \cdot g \quad (2)$$

(баланс между входом и выходом реактора),

где

$$a1 = \frac{T_{вых0}}{T_{вых0} - T_{ex0}}, \quad a4 = \frac{T_{ex0}}{T_{вых0} - T_{ex0}},$$

$$u(g, q) = \frac{1}{U_0} \cdot \left(\frac{1}{\alpha10 \cdot g^{0.8}} + \frac{x_m}{\lambda_m} + \frac{1}{\alpha20 \cdot q^{0.7}} \right)^{-1},$$

$$f(t_1, t_4, \pi_2) = \ln \left[\frac{T_{вых0} \cdot t_1 - Ts(p_{20} \cdot \pi_2)}{(T_{ex0} \cdot t_4 - Ts(p_{20} \cdot \pi_2))} \right].$$

В этих уравнениях $a1, a2$ – постоянные; расход теплоносителя через реактор; $t4, t1$ – температуры теплоносителя на входе и выходе из активной зоны в относительных единицах; g – относительный расход теплоносителя в ПК; q – тепловая мощность реактора; u – коэффициент теплопередачи между первым и вторым контурами в относительных единицах; Cp – теплоемкость теплоносителя в ПК; α_{10}, α_{20} – номинальные значения коэффициента теплопередачи в парогенераторе от 1-ого контура к металлу трубок парогенератора и от металла ко 2-ому контуру; x_m, λ_m – толщина и теплопроводность труб парогенератора; π_2, p_2 – относительное и абсолютное давление во ВК; $T_{вых}, T_{ex}$ – температуры теплоносителя на входе и выходе из активной зоны.

Относительные значения параметров были определены следующим образом:

$$t_1 = T_{вых} / T_{вых0}, \quad t_4 = T_{ex} / T_{ex0}, \quad q = Q / Q_0, \\ \pi_2 = p_2 / p_{20}, \quad g = G / G_0, \quad u = U / U_0$$

где индекс `0` соответствует номинальным значениям параметров.

Решая уравнения (1) и (2), можно определить параметры: $T_{вых}, T_{ex}, p_2, g$ и характеристики блока при различных программах регулирования с переменным

расходом теплоносителя в ПК. В качестве примера рассматривается энергоблок АЭС с ВВЭР – 440. Таким образом, расход g принимает вид:

$$g(g, q, t_1, t_4, \pi_2) = \frac{Cp0}{Cp(t_1, t_4)} \cdot \frac{f_0}{f(t_1, t_4, \pi_2)} \cdot u(g, q, \pi_2) \quad (3)$$

Рассматривался характер изменения параметров при $p_2 = \text{const}$ и $T_{\text{вых}} = \text{const}$. При этом, $t_1 = 1$, $\pi_2 = 1$.

Уравнение (3) можно решить, используя зависимость $t_4 = f(t_1, q, g, \pi_2)$, t_1 , и π_2 , итеративным методом. Минимальные изменения температуры t_1 в диапазоне мощностей от 100 – 40 % были получены, используя следующую аппроксимацию:

$$g = q^{1.3} + 0.8 \cdot q^{-0.05} - 0.8 \quad (4)$$

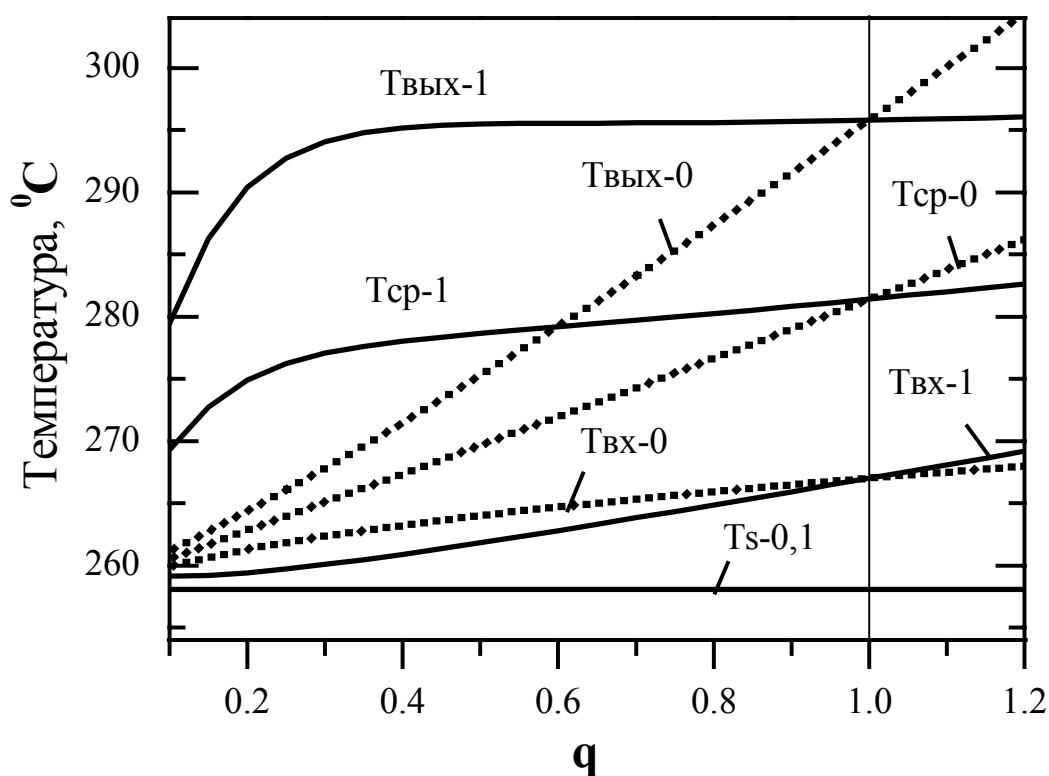


Рис.1. Изменение температур в зависимости от тепловой мощности реактора q при постоянном давлении p_2 : $T_{\text{вых}}$, $T_{\text{вх}}$ - температуры на выходе и входе реактора; $T_{\text{ср}}$ - средняя температура в ПК; T_s - температура насыщения во ВК; цифры - 0 и -1 указывают значения параметров при постоянном и переменном расходах.

Изменяя расход теплоносителя в 1-ом контуре в соответствии с уравнением 4, были получены закономерности изменения основных параметров энергоблока в зависимости от его мощности q при постоянном давлении пара p_2 во ВК (рис.1). Из рисунка видно, что при изменении мощности в интервале 100 – 40 % , при постоянном расходе g , температура на выходе из реактора уменьшается на $\sim 25^0\text{C}$. При изменении расхода g температура $T_{\text{вых}}$ остаётся практически постоянной. Отклонение средней температуры при постоянном расходе g оказывается на $\sim 12^0\text{C}$ больше, чем при регулируемом. Отклонение температуры T_{ex} при регулируемом расходе g незначительно больше, чем при постоянном расходе.

Для исследования статических характеристик энергоблока с регулируемым расходом, принимались $T_{\text{вых}} = \text{const}$ и $T_{\text{вх}} = \text{const}$ ($t_I = 1, t_4 = 1$) т.е. $T_{\text{ср}} = \text{const}$. При этом уравнение (3) принимает вид:

$$g = q \quad (5)$$

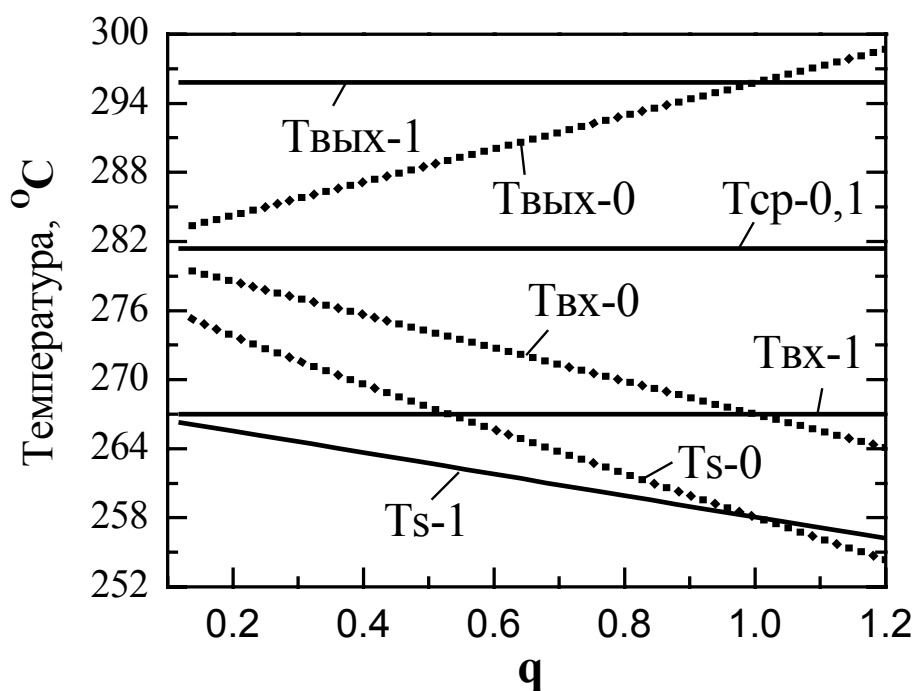


Рис.2. Изменение температуры в зависимости от тепловой мощности реактора q при программе $T_{\text{ср}} = \text{const}$: $T_{\text{вых}}$, T_{ex} - температуры на выходе и входе в реактор; $T_{\text{ср}}$ - средняя температура в ПК; T_s - температура насыщения во ВК; цифры 0 и 1 указывают значения параметров при постоянном и переменном расходах.

Изменение параметров для программы регулирования с постоянной средней температурой теплоносителя в ПК и с регулированием расхода g в соответствии с (5) показано на рисунке 2. В этом случае температура на входе и выходе из реактора при переменном расходе g не меняется, в то время как при постоянном расходе температуры на входе и выходе одновременно изменяются на $\sim 9^\circ\text{C}$ (при $0,4 < q < 1$). Кроме того, при постоянном расходе g увеличение давления во ВК на $\sim 0,6$ МПа больше, чем при регулируемом расходе.

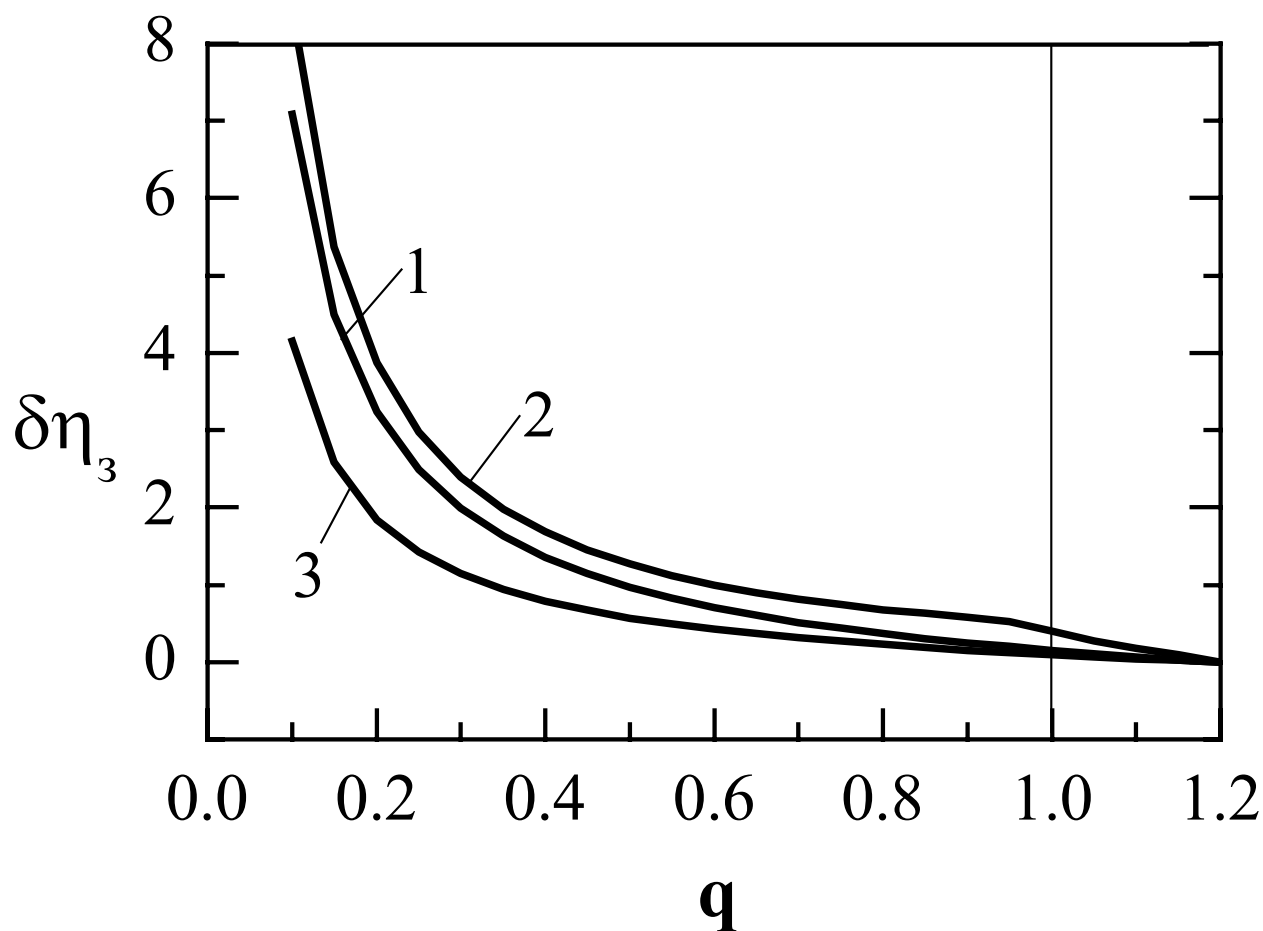


Рис. 3. Изменение коэффициента запаса до возникновения кризиса теплообмена $\delta\eta_3$ в зависимости от тепловой мощности реактора q и расхода теплоносителя в ПК (в соответствии с уравнением 4): кривые 1 – 3 соответствуют разным корреляциям критического теплового потока.

Одна из важнейших эксплуатационных характеристик активной зоны, обеспечивающая безопасность работы энергоблока, — запас до кризиса теплообмена. Изменение коэффициента запаса до возникновения кризиса теплообмена $\delta\eta_z$ в зависимости от тепловой мощности реактора q и расхода теплоносителя g в ПК определялся следующим образом:

$$\delta\eta_z = \frac{\eta_z - \eta_{z0}}{\eta_{z0}} = \frac{q_k \cdot q_{\phi 0}}{q_{k0} \cdot q_{\phi}} - 1 \quad (6)$$

где q_{ϕ} , q_k — фактический и критический тепловые потоки; индекс '0' относится к номинальным значениям тепловых потоков.

Для расчёта $\delta\eta_z$ использовались разные приближения, определяющие критический тепловой поток. Расчеты показали, что при изменении расхода коэффициент запаса до возникновения кризиса теплоотдачи увеличивается (рис.3).

Известно, что самый экономичный способ регулирования расхода — изменение частоты вращения двигателя ГЦН. Этот способ можно реализовать с использованием преобразователя частоты. При этом мощность $N_{нэ}$, потребляемая насосом, может быть выражена через расход g :

$$N_{нэ} = N_{нэ0} \cdot g^3 \quad (7)$$

По мнению некоторых авторов, при уменьшении мощности энергоблоков АЭС можно отключить часть ГЦН, чтобы сэкономить энергию и уменьшить диапазон изменения параметров.

Рисунок 4 подробно показывает экономию электрической энергии в диапазоне от 100 до 60 % номинальной мощности. Здесь предполагалось, что один ГЦН можно отключить при уменьшении мощности на ~15 % (отключение одного ГЦН уменьшает расход через реактор на 12-13 %). При уменьшении мощности до 60 % частотное регулирование расхода теплоносителя дает около 80 % экономии электрической энергии потребляемой ГЦН, а отключение двух ГЦН дает только ~ 34 % экономии.

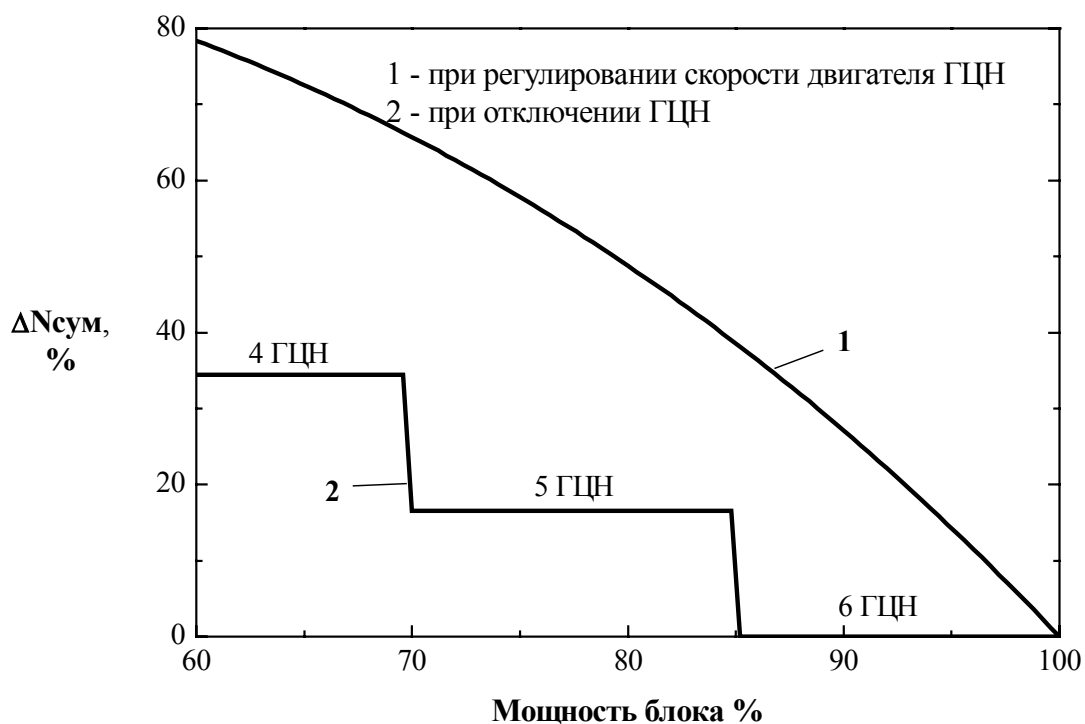


Рис.4. Экономия электрической энергии $\Delta N_{\text{сум}}$ (% номинальной мощности) потребляемой ГЦН, вследствие регулирования расхода теплоносителя в ПК при работе блока на мощности, меньшей номинальной.

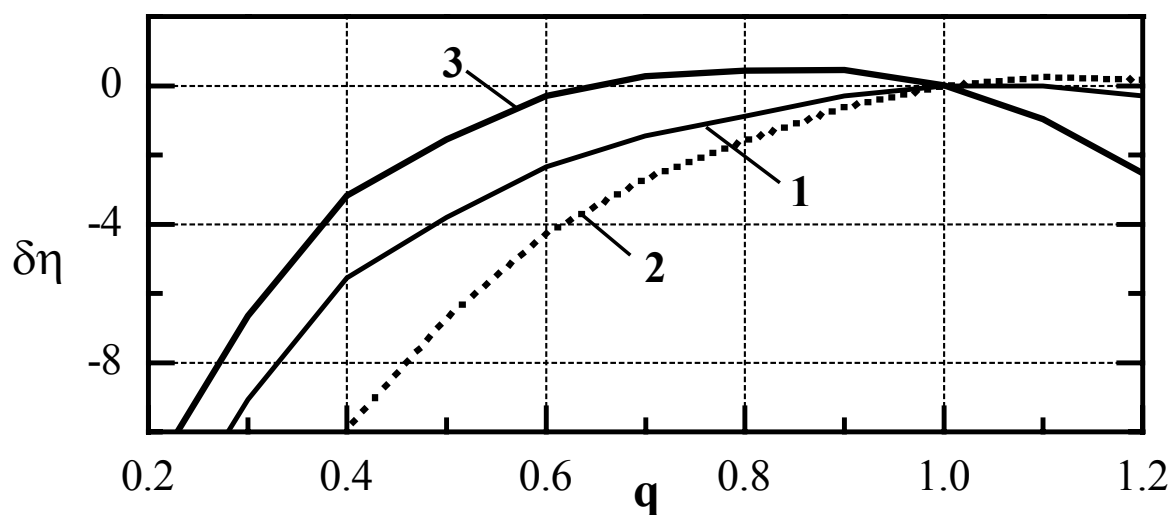


Рис. 5. Зависимость относительного отклонения КПД блока $\delta\eta$ от тепловой мощности q : 1,2- КПД брутто и нетто при постоянном расходе теплоносителя; 3 - КПД нетто при регулировании расходом теплоносителя.

Рассматривается изменение КПД энергоблока при снижении его мощности с помощью программы регулирования с постоянным давлением во ВК. Из рисунка 5 видно, что снижение мощности при постоянном расходе теплоносителя приводит к уменьшению КПД брутто и нетто энергоблока. Если же снижение мощности происходит при регулируемом расходе, то в диапазоне от 100 % до 60 % номинальной мощности КПД нетто блока не уменьшается. Это достигается, благодаря уменьшению затрат электроэнергии на собственные нужды (ГЦН).

При использовании программы регулирования с постоянной средней температурой теплоносителя характер изменения величины КПД при снижении мощности сохраняется таким же, как и при программе с постоянным давлением во ВК.

Опыт эксплуатации АЭС показывает, что при отклонении частоты, в большинстве случаев, энергоблоки отключаются от энергосистемы. Использование специальных преобразователей частоты может контролировать и минимизировать кратковременные отклонения, так как работа тиристорных преобразователей не зависит от частоты питания сети. Специальные преобразователи могут успешно работать при снижении напряжения до 70-80 % .

Задача синтеза системы автоматического регулирования состоит в определении регулятора, который мог бы автоматически воздействовать на преобразователь частоты с тем, чтобы с изменением мощности реактора и температуры на выходе из реактора изменялась частота питания ГЦН и, тем самым, расход теплоносителя в ПК.

Задача состоит в регулировании расхода теплоносителя ПК в соответствии с мощностью реактора и температурой на выходе реактора. Введем в схему (рис.6) четыре дополнительные связи, обозначенные пунктирными линиями:

- от регулятора нейтронной мощности реактора к регулятору расхода теплоносителя ПК;
- от датчика температуры на выходе реактора к регулятору расхода теплоносителя ПК;

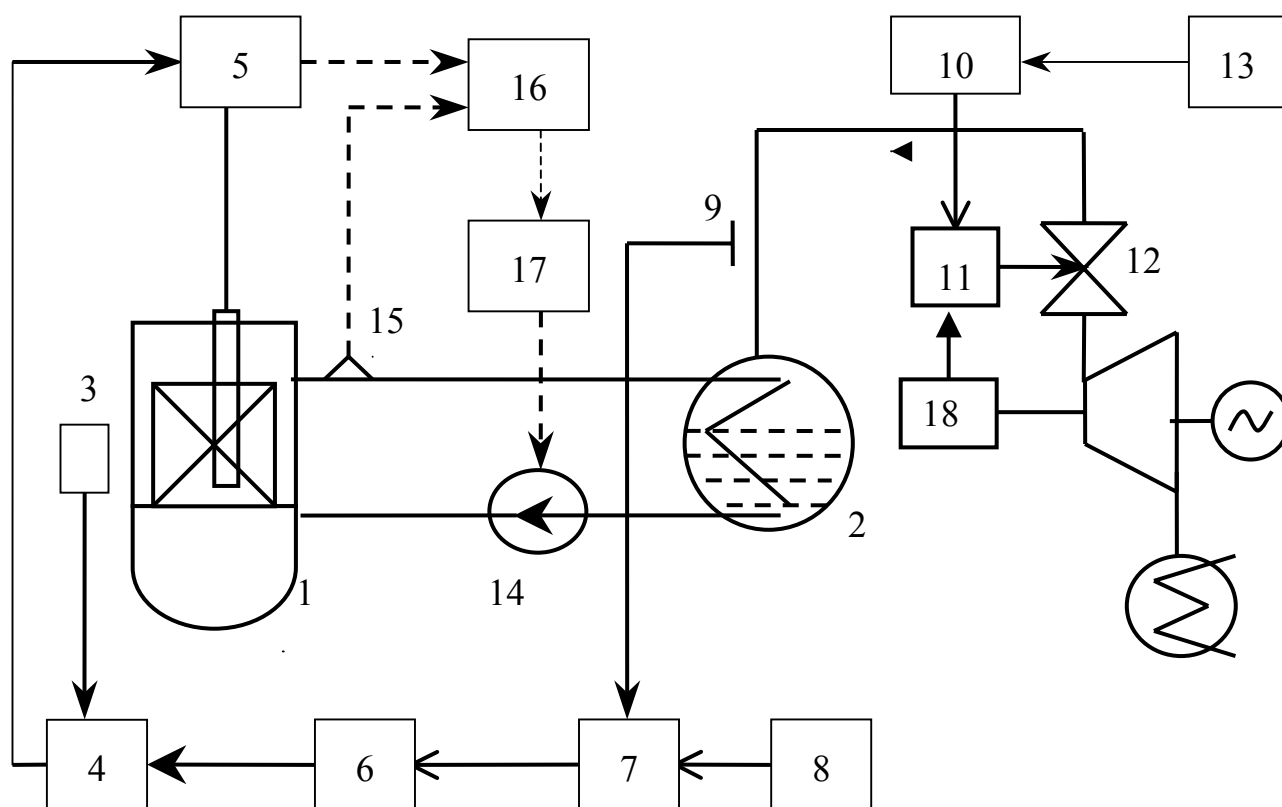


Рис.6. Принципиальная схема регулирования энергоблока с ВВЭР при постоянном давлении во ВК с регулированием расхода теплоносителя ПК (первичное управление турбиной): 1- реактор; 2- парогенератор; 3- ионизационная камера; 4 - регулятор нейтронной мощности реактора; 5 - приводы регулирующих стержней; 6 - задатчик регулятора мощности реактора; 7 - регулятор давления пара во ВК; 8 - задатчик регулятора давления пара во ВК; 9 - датчик давления; 10 - механизм управления турбиной; 11 - сервомотор; 12 - регулирующие клапаны турбины; 13 – регулятор мощности блока; 14- ГЦН; 15 - датчики температуры теплоносителя; 16 – регулятор расхода теплоносителя; 17 – преобразователь частоты; 18 – регулятор частоты.

- от регулятора расхода теплоносителя к преобразователю частоты;
- от преобразователя частоты к двигателям ГЦН.

Задача регулятора расхода – определить заданное значение расхода теплоносителя ПК и передать сигнал преобразователю частоты, чтобы изменять

частоту питания ГЦН. Для этой цели использовался ПИ-регулятор. Получены настройка регулятора расхода и анализ устойчивости.

Для анализа динамических характеристик энергоблока с ВВЭР-440 с регулированием расхода теплоносителя ПК разработана математическая модель, включающая уравнения тепломассообмена в реакторе, парогенераторах и оборудовании ВК. Использовались программы регулирования энергоблоком с постоянным давлением p_2 во ВК и постоянной средней температуре $T_{ср}$ в ПК.

Рисунок 7 показывает сравнения этих характеристик при программе $p_2 = \text{const}$ с постоянным расходом и при регулировании расхода теплоносителя. Считалось, что при возникновении аварийных ситуаций в энергосистеме требуется мгновенное реагирование АЭС. Закрывая регулирующий клапан турбины на 50 %, давление свежего пара во ВК и температура в ПК увеличивается. При этом регулятор давления дает сигнал регулятору нейтронной мощности, чтобы уменьшить мощность реактора (рис. 7.(а)). Рисунок 7 (б) показывает уменьшение расхода теплоносителя ПК в результате снижения мощности реактора. Из рисунка видно, что амплитуды отклонений температур теплоносителя при регулируемом расходе меньше, чем при постоянном. Так при разгрузке энергоблока до 50% температура на выходе из реактора при постоянном значении расхода быстро уменьшается ~ на 20 градусов и стабилизируется через 300 секунд, а при регулируемом расходе её значение практически не изменяется. Средняя температура теплоносителя в ПК уменьшается примерно на 10 градусов при постоянном значении расхода, а при регулируемом расходе стабилизируется на номинальном значении.

Рисунок 7 (в) демонстрирует перемещение регулирующих стержней СУЗ с изменением мощности реактора при постоянном и регулируемом расходе теплоносителя. При регулируемом расходе требуется меньшее перемещение стержней, что приводит к уменьшению аксиальной неравномерности поля энерговыделения. При постоянном расходе требуется дополнительное компенсирование реактивности, высвобождающейся из-за уменьшения температуры в ПК в результате отрицательного эффекта реактивности.

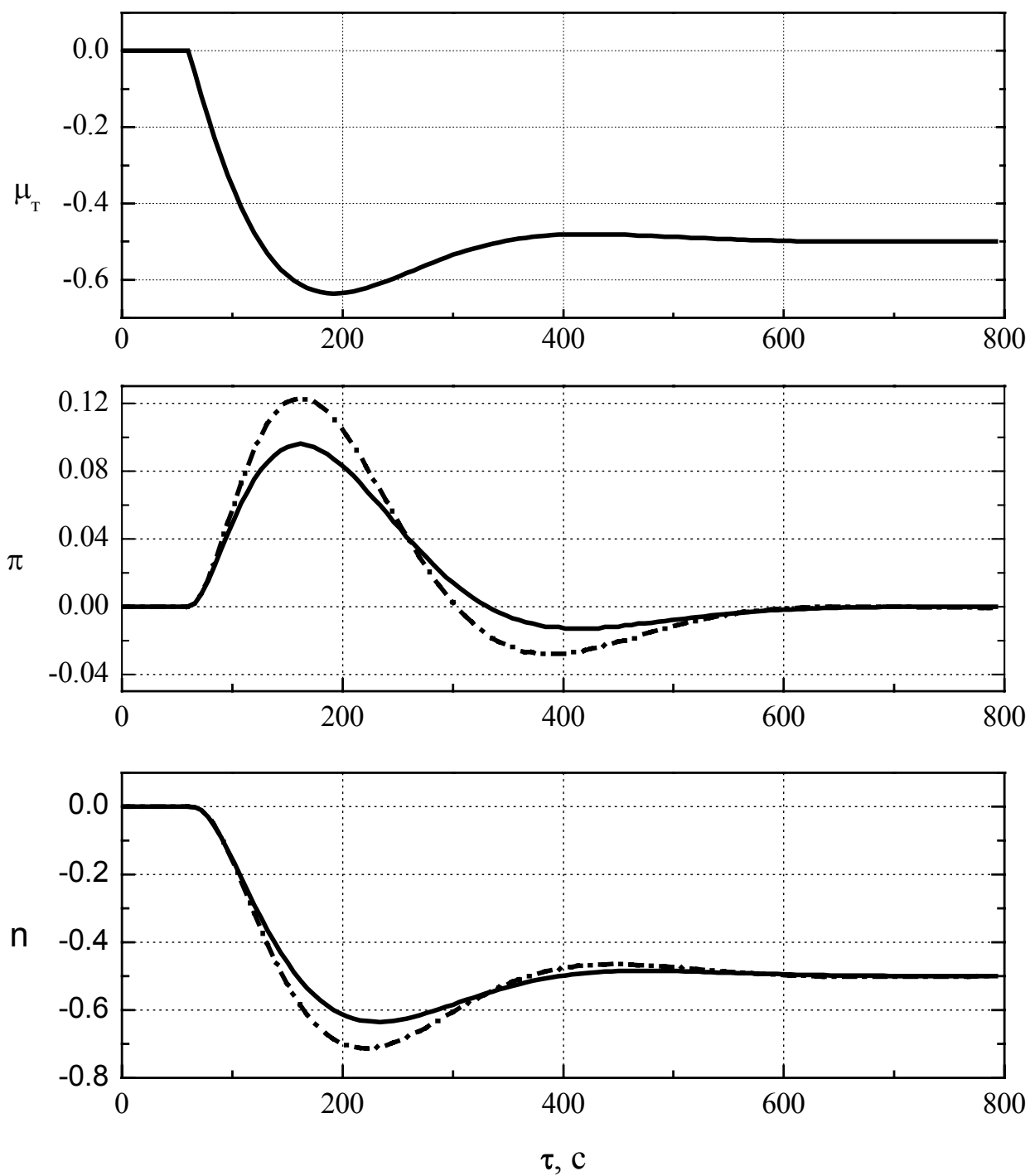


Рис.7. (а). Переходные процессы относительных отклонений перемещения регулирующего клапана μ_T , давления π пара во ВК и нейтронной мощности реактора n при быстром закрытии регулирующих клапанов турбины на 50%, используя программу $p_2 = \text{const}$ с постоянным (пунктирные линии) и регулируемым расходами.

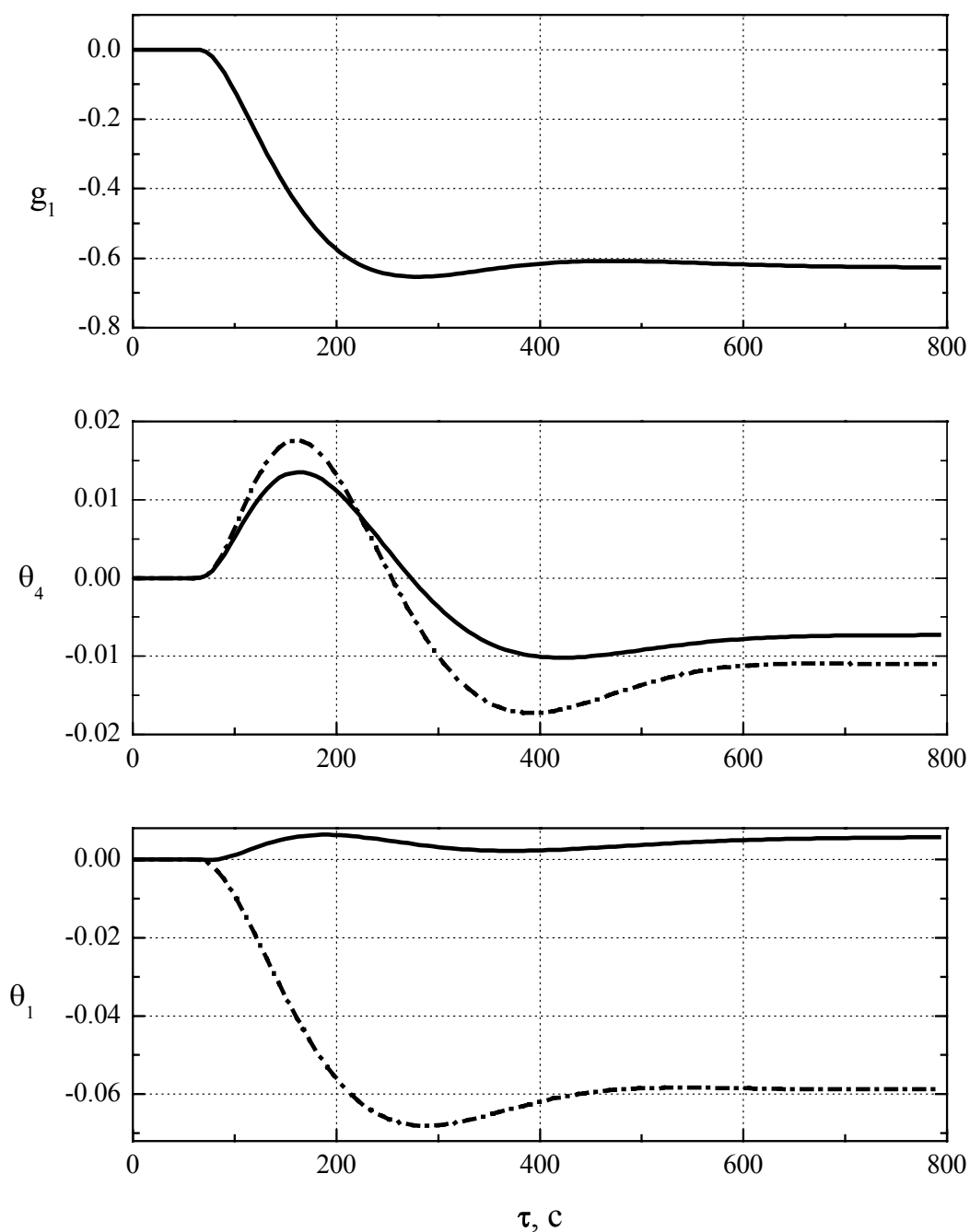


Рис.7. (б) Переходные процессы относительных отклонений расхода теплоносителя ПК g_l , температуры теплоносителя на входе θ_4 , выходе θ_1 реактора при быстром закрытии регулирующих клапанов турбины на 50%, используя программу $p_2 = \text{const}$ с постоянным (пунктирные линии) и регулируемым расходами.

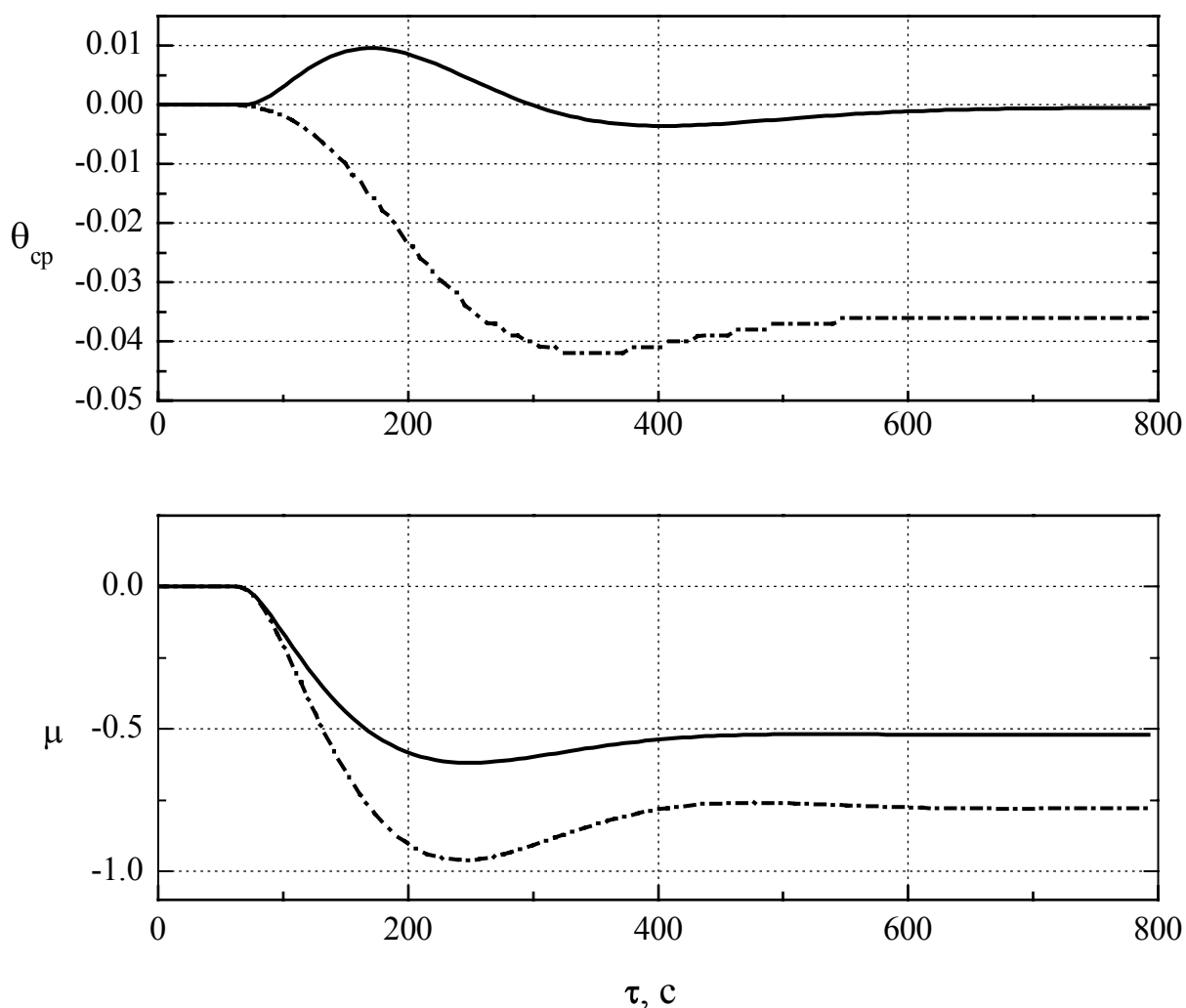


Рис.7. (в) Переходные процессы относительных отклонений средней температуры теплоносителя в ПК θ_{cp} и перемещения стержней СУЗ при быстром закрытии регулирующих клапанов турбины на 50%, используя программу $p_2 = \text{const}$ с постоянным (пунктирные линии) и регулируемым расходами.

Скорость вращения ротора насоса изменяется практически пропорционально изменению частоты питающего тока асинхронного двигателя т.е.

$$\frac{G}{G_0} = \frac{n}{n_0} = \frac{f}{f_0} \quad (8)$$

где G , n и f – соответственно, расход теплоносителя, скорость вращения ротора насоса, и частота питания двигателя. Индекс 0 относится к номинальному значению мощности насоса.

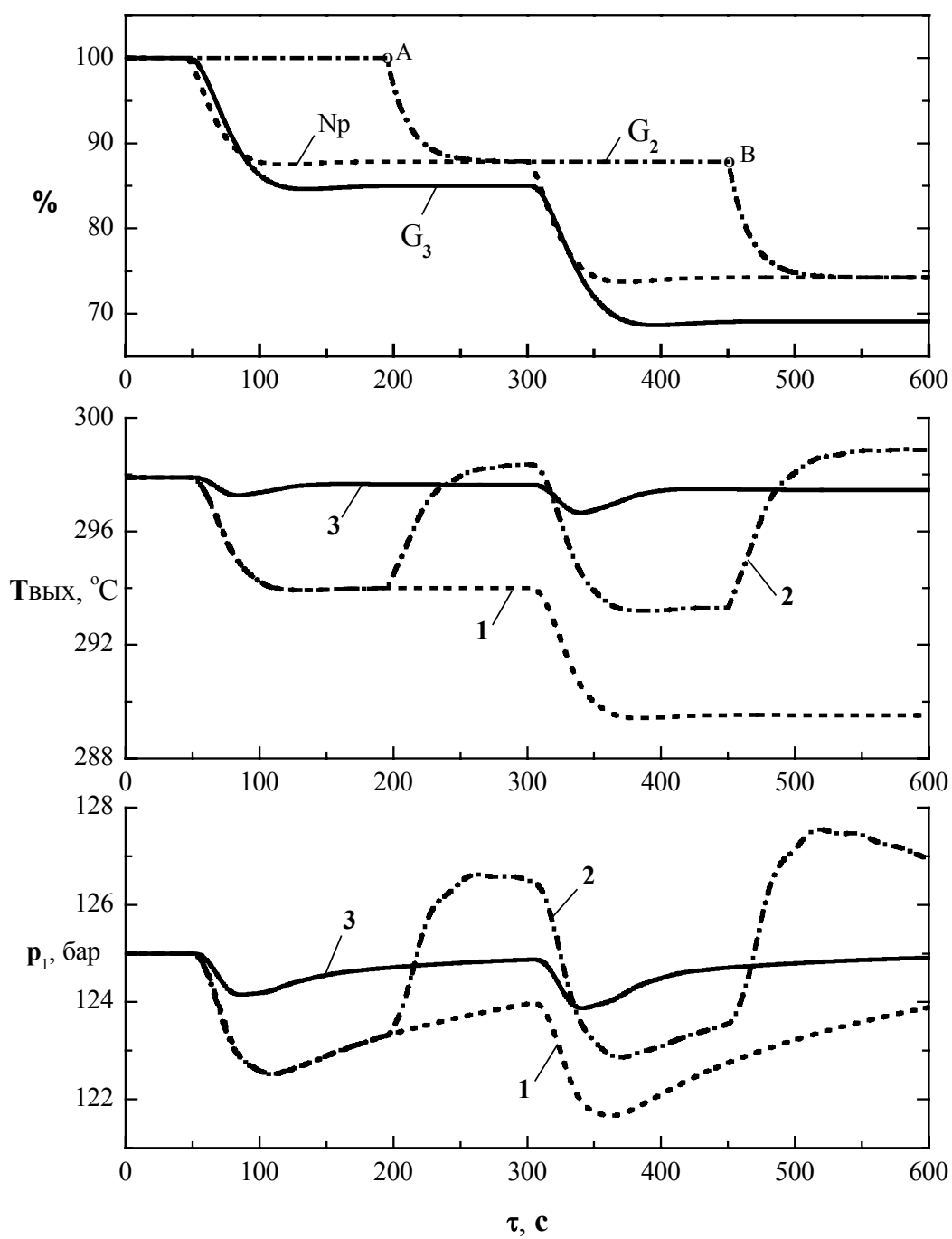


Рис. 8. Изменения расхода G , температуры $T_{\text{вых}}$ и давления в ПК при уменьшении мощности реактора N_p в зависимости от времени: 1- при постоянном расходе; 2- при отключении ГЦН; 3- при регулировании расхода в ПК с помощью изменения частоты питания двигателей ГЦН.

На рисунке 8 показаны изменения температуры на выходе из реактора $T_{вых}$ и давления в первом контуре p_1 , в зависимости от времени, для разных двух способов регулирования расхода теплоносителя. Видно, что при постоянном расходе в ПК отклонение температуры $T_{вых}$ от номинальной составляет приблизительно 8,5 °С, а отключение ГЦН приводит к циклическим изменениям температуры. Наиболее стабильное поведение температуры $T_{вых}$ достигается при изменении расхода ПК за счёт частотного регулирования производительности ГЦН, в зависимости от мощности реактора. Из рисунка 8 видно, что амплитуда колебаний давления в ПК, в случае отключения ГЦН, существенно выше, чем при изменении частоты питания ГЦН. При постоянном расходе в ПК (кривая 1) отклонение давления от номинального почти в два раза больше, чем при регулировании частоты питания ГЦН.

Заключение

1. Существующие программы регулирования с постоянным расходом теплоносителя в ПК, при изменении мощности, существенно изменяют температурное состояние оборудования энергоблока. Это приводит к термоциклическим напряжениям, которые в свою очередь, могут привести к малоцикловой усталости металлов оборудования. Чтобы одновременно повышать надежность, маневренность и экономичность АЭС с ВВЭР изменения параметров могут быть минимизированы регулированием расхода теплоносителя в ПК, при изменении мощности блока.
2. Тиристорные преобразователи частоты могут быть использованы для регулирования частоты (и соответственно напряжения) питания двигателя ГЦН, чтобы изменять вращающую скорость ротора насоса.
3. Сравнение характеристик при постоянном и регулируемом расходах для программы $p_2 = \text{const}$ показало, что при регулируемом расходе теплоносителя удается удерживать температуры $T_{вых}$ и $T_{ср}$ первого контура практически неизменными, в диапазоне изменения мощности 50% - 100% от номинальной.

4. При программе $T_{cp} = \text{const}$, с уменьшением мощности от 100% до 50%, регулирование расхода обеспечивает постоянную температуру на входе и выходе реактора и меньший рост давления (на $\sim 0.4 - 0.5$ МПа) во ВК, по сравнению с постоянным расходом.
5. Анализ условий теплоотдачи в активной зоне реактора показал, что при изменении расхода коэффициент запаса до возникновения кризиса теплоотдачи увеличивается.
6. Анализ экономичности показал, что при изменении мощности от 100 % до 60 % КПД нетто блока не уменьшается при регулировании расхода теплоносителя ВК.
7. Переходные процессы при $p_2 = \text{const}$ и $T_{cp} = \text{const}$ показали, что при переменных режимах регулирование расходом теплоносителя приводит к минимальным колебаниям температур теплоносителя в ПК.
8. Сравнение динамических отклонений температур и давления в ПК при изменении расхода теплоносителя путем регулирования частоты питания ГЦН и поочередного отключения части ГЦН показало, что регулирование частоты питания ГЦН приводит к минимальным колебаниям температуры и давления.
9. При программе $p_2 = \text{const}$ с регулированием расхода требуется меньшее перемещение стержней СУЗ, что приводит к уменьшению аксиальной неравномерности поля энерговыделения.

Основные результаты работы отражены в следующих публикациях:

- 1- Али Башарат, Иванов В.А. Состояние энергетики в Пакистане; [Межвузовская научная конференция // XXVII Неделя науки СПбГТУ: Материалы межвузовской научной конференции. СПб.: Изд-во СПбГТУ , 1999, С.112.
- 2- Али Башарат, Иванов В.А. Анализ безопасности реактора ВВЭР-440 при уменьшении частоты тока в сети // XXIX Неделя науки СПбГТУ: Материалы межвузовской научной конференции. СПб.: Изд-во СПбГТУ , 2001. С.81.
- 3- Али Башарат, Иванов В.А. Работа реактора ВВЭР-440 при уменьшении частоты в энергосистеме // Международная студенческая научная конференция «Полярное

- Сияние – 2001», Ядерное будущее: безопасность, экономика и право: Сборник тезисов докладов. М.: Изд-во МИФИ, 2001. С. 48.
- 4- Али Башарат, Лощаков И.И. Регулирование энергоблоков АЭС с ВВЭР, при изменении производительности ГЦН // Ядерная энергетика, 2002. № 1. С.53-60.
 - 5- Basharat Ali, Igor. I. Loshakov. Minimizing aging processes in equipment of NPP with PWR by regulating the primary coolant circulation // Sixth International Workshop on New Approaches to High-Tech: Nondestructive Testing and Computer Simulations in Science and Engineering. Proceedings of SPAS. St. Petersburg: Vol. 6, 2002. P. F06-F09.
 - 6- Александров Д.Н., Али Башарат. Уменьшение малоциклового усталости оборудования АЭС с ВВЭР за счёт управления расходом теплоносителя первого контура // Фундаментальные исследования в технических университетах: Материалы VI Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002. С.204.
 - 7- Али Башарат, Александров Д.Н., Лощаков И.И. Улучшение характеристик регулирования энергоблока АЭС с ВВЭР // Международная студенческая научная конференция «Полярное Сияние – 2002», Ядерное будущее: безопасность, экономика и право: Сборник тез. докл. М.: Изд-во МИФИ, 2002.
 - 8- Али Башарат, Лощаков И.И., Поршневу Г.П. Участие АЭС с ВВЭР в регулировании частоты при аварийном дефиците активной мощности в энергосистеме // Теоретические и практические проблемы развития электроэнергетики России: Материалы международной научно-практической конференции. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002.