

РЕГУЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГБЛОКОВ АЭС С ВВЭР ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ГЦН

Али Башарат, И.И. Лощаков

*Санкт-Петербургский государственный технический университет (СПбГТУ),
г. Санкт-Петербург*



Рассматривается регулирование энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР, основанное на согласованном изменении расхода теплоносителя в первом контуре (РТПК) при изменении мощности реактора. Предлагается изменять РТПК за счет изменения частоты тока питания ГЦН. Показано, что изменение производительности ГЦН позволяет существенно уменьшить отклонения параметров реактора от номинальных при регулировании энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР и также снизить потребляемую ГЦН мощность при уменьшении мощности блока. Реализация такого способа изменения РТПК существенно повысит срок службы оборудования за счет уменьшения термоциклических напряжений. Показано, что такой способ регулирования производительностью ГЦН обеспечивает наиболее благоприятные условия эксплуатации оборудования первого и второго контуров по сравнению с постоянным расходом теплоносителя или с отключением ГЦН.

ВВЕДЕНИЕ

По прогнозам Мирового энергетического совета и Международного института прикладного и системного анализа доля производства электроэнергии на атомных электростанциях (АЭС) к 2050 г. возрастет до 38% и уже сейчас в некоторых развитых странах, например, во Франции и Бельгии она составляет более 60% [1]. В Северо-западном регионе России на долю Ленинградской АЭС приходится более половины всей вырабатываемой электроэнергии. Отсюда следует, что АЭС должны вырабатывать электроэнергию в соответствии с суточным графиком пиковых нагрузок, и эта проблема становится актуальной.

В случае возникновения аварийных ситуаций в энергосистемах АЭС также должны принимать активное участие в ликвидации их. Опыт эксплуатации показывает, что действующие энергоблоки с ВВЭР имеют резервы для увеличения мощности сверх номинальной [2], и их нужно использовать при дефиците мощности в энергосистеме. Иными словами, АЭС должны эффективно работать не только в базисном режиме, но и на мощностях, отличных от номинальной. Так, в процессе суточного регулирования электрических нагрузок мощность энергоблоков с ВВЭР может снижаться до уровня 30% от номинальной.

При изменении мощности на АЭС с ВВЭР используются программы регулирования с постоянным (не зависящим от мощности реактора) расходом теплоносителя первого контура (РТПК). Расход теплоносителя через активную зону (АЗ) реактора обыч-

но изменяется только за счет числа включенных петель [1]. Постоянный РТПК при изменении мощности энергоблока приводит к существенному перераспределению температур в АЗ реактора, вызывая дополнительные температурные напряжения в корпусе и других элементах конструкции реактора. Эти напряжения возникают в условиях радиационного облучения, когда вероятность появления усталостных и радиационных дефектов возрастает, что, в конечном счете, сокращает срок службы энергоблока в целом [3, 4]. В качестве примера можно привести статистику отказов трубопроводов АЭС. Оказывается [5], что 54% отказов случается из-за дефектов в сварных швах, а причиной этих дефектов являются термоциклические напряжения на фоне механической вибрации и радиационного воздействия ионизирующего излучения. Кроме того программа регулирования блоков, при постоянном РТПК не экономична из-за неэффективного использования ГЦН.

Регулирование с уменьшением РТПК за счет отключения ГЦН при снижении мощности реактора экономично, но в этом случае происходят деструктивные циклические изменения в параметрах первого контура. Известно, что стартовый ток асинхронного двигателя в 5-6 раз больше, чем его номинальное значение. Отключение, а затем включение двигателя увеличивает вероятность отказа его обмотки и отрицательно влияет на срок службы двигателя [6]. Кроме этого, отключение и включение отдельных петель первого контура приводит к значительным температурным изменениям в конструкционных материалах парогенератора и реактора, что существенно влияет на его надежность и срок службы.

В настоящей работе исследуется возможность регулирования реактора с минимальными температурными колебаниями в первом и втором контурах, причем за основу берется переменный расход теплоносителя в каждой петле первого контура, соответствующий мощности реактора. Изменение коэффициента теплопередачи между первым и вторым контурами при изменении расхода теплоносителя является основой этой идеи. Принципиально эту задачу можно решить несколькими способами, например, используя преобразователи частоты питания ГЦН.

СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭНЕРГОБЛОКА

Решая основные уравнения баланса энергии и материала для первого и второго контуров, можно определить характеристики блока при различных программах регулирования и переменном РТПК. В качестве примера рассматривался энергоблок АЭС с ВВЭР-440.

Расход теплоносителя определялся из условия, чтобы отклонения температур теплоносителя на входе и выходе из активной зоны $T_{вх}$, $T_{вых}$ и давления во втором контуре p_2 от номинальных значений были минимальны, а запас до кризиса теплообмена не уменьшался. Этим условиям в диапазоне мощностей 10 – 120% удовлетворяли аппроксимации

$$g = q^{1,3} + 0,8 \cdot q^{-0,05} - 0,8 \quad (1)$$

для программы регулирования с постоянным давлением p_2 во втором контуре. Здесь $q = (Q/Q_0)$ и $g = (G/G_0)$ – тепловая мощность реактора и расход через него в относительных единицах; индекс 0 соответствует номинальному режиму.

Сравним случаи, когда расход теплоносителя постоянен и когда он меняется по закону (1) для известной программы регулирования с постоянным давлением p_2 во втором контуре. На рис. 1 показаны закономерности изменения основных параметров энергоблока в зависимости от его мощности q . Оказывается, что при изменении мощности q в интервале 1 – 0,5 (100 – 50% номинального значения) при постоянном расходе g температура на выходе из реактора уменьшается на 20°C. Значение мощности $q = 1,2$ (т.е. выше номинальной) выбрано исходя из того, что этот тип реакто-

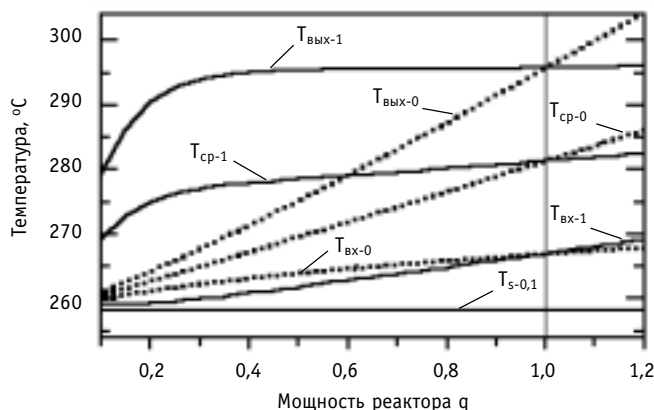


Рис.1. Изменение температуры в зависимости от тепловой мощности реактора q при постоянном давлении p_2 . $T_{\text{вых}}$, $T_{\text{вх}}$ — температуры на выходе и входе реактора; $T_{\text{ср}}$ — средняя температура в первом контуре; T_s — температура насыщения во втором контуре; температуры, имеющие индекс 0 (пунктирные линии) соответствуют постоянному расходу теплоносителя, температуры, имеющие индекс 1 (сплошные линии) — переменному

ров допускает подобные условия эксплуатации. При изменении расхода g температура $T_{\text{вых}}$ остается практически постоянной. Средняя температура при постоянном расходе g оказывается на 12°C ниже, чем при переменном, что приводит к большему перемещению органов СУЗ (для компенсации освобожденной активности), а это увеличивает аксиальную неравномерность тепловыделения. Таким образом, переменный расход g приводит к более благоприятным условиям эксплуатации энергоблока АЭС.

АНАЛИЗ КРИЗИСА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

При уменьшении расхода теплоносителя необходимо рассмотреть вопрос о кризисе теплопередачи от топлива к теплоносителю. Для расчета коэффициента запаса (КЗ) до кризиса теплообмена использовались различные приближения [7-11], определяющие критический тепловой поток:

$$K3 = \frac{q_{кр}}{q_{\phi}} \cdot \frac{1}{1 + 3 \cdot \sigma}, \quad (2)$$

где $q_{кр}$ и q_{ϕ} — критический и фактический тепловые потоки; σ — среднеквадратичное отклонение экспериментального критического потока от рассчитанного по эмпирическим формулам [7-11]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum \left(\frac{q_{\text{экс}} - q_{\text{рас}}}{q_{\text{рас}}} \right)^2},$$

где $q_{\text{экс}}$ и $q_{\text{рас}}$ — экспериментальный и рассчитанный по эмпирическим формулам критические тепловые потоки; n — число опытов, выполненных для критического теплового потока. В расчетах использовались значения $\sigma = 0,11 - 0,13$.

На рис. 2 приведены кривые, показывающие изменение критической $N_{кр}$ допустимой $N_{доп}$ и фактической $N_{твс}$ мощностей в самой напряженной кассете (ТВС), рассчитанные согласно методике [7]. Оказалось, что для аппроксимации (1) расхода g мощность в самой напряженной ТВС остается ниже допустимой. Запас до кризиса теплообмена увеличивается с уменьшением как мощности реактора, так и расхода теплоносителя через него.

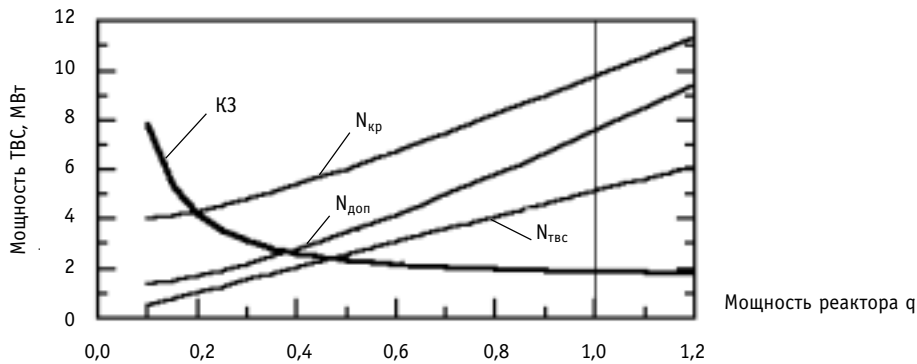


Рис. 2. Критическая $N_{кр}$, допустимая $N_{доп}$ и фактическая $N_{твс}$ мощности в самой напряженной ТВС, в зависимости от расхода теплоносителя q ; $KЗ = (N_{кр}/N_{твс})$ коэффициент запаса до кризиса теплообмена

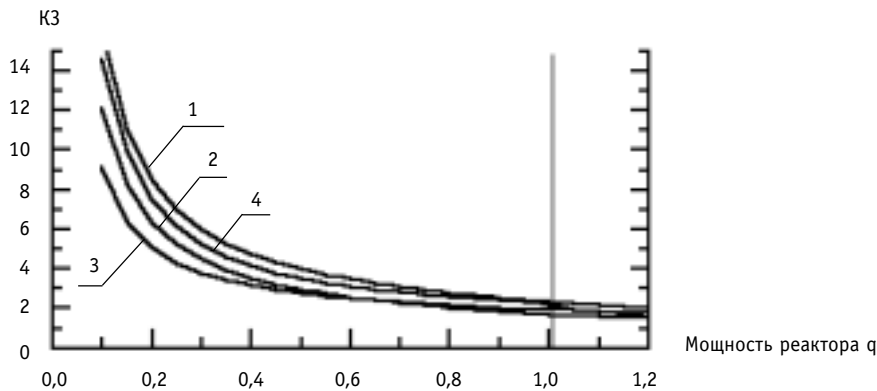


Рис. 3. Изменение коэффициента запаса до кризиса теплообмена в зависимости от изменения тепловой мощности реактора при переменном расходе теплоносителя согласно 1 - Астахову [8]; 2 - Тонг [9]; 3- Субботину [10]; 4 - Осмачкину [11]

На рис. 3 представлены результаты расчетов коэффициента запаса до кризиса теплообмена $KЗ$ согласно данным различных авторов [8-11]. Коэффициент запаса увеличивается с уменьшением мощности реактора, а значит и с уменьшением расхода теплоносителя.

РЕАЛИЗАЦИЯ ИЗМЕНЕНИЯ РАСХОДА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПЕРВОГО КОНТУРА

Рассмотрим теперь вопрос о том, каким способом следует изменять расход теплоносителя одновременно с изменением мощности реактора. Принципиально производительность ГЦН можно изменять частотным или количественным способом. Частотный предполагает изменение частоты и напряжения в сети питания асинхронных двигателей ГЦН. В настоящей работе предлагается частотный способ управления расходом с использованием преобразователей частоты. Согласно [12, 13] скорость вращения ротора изменяется пропорционально изменению частоты питания:

$$\frac{G}{G_0} = \frac{n}{n_0} = \frac{f}{f_0}, \tag{3}$$

где G , n и f – соответственно, расход теплоносителя через АЗ реактора, скорость вращения роторов ГЦН и частота в сети питания ГЦН; индекс 0 относится к номинальному значению мощности насоса. Для того, чтобы электродвигатель работал надежно и безопасно с хорошими показателями, необходимо также изменять напряжение при

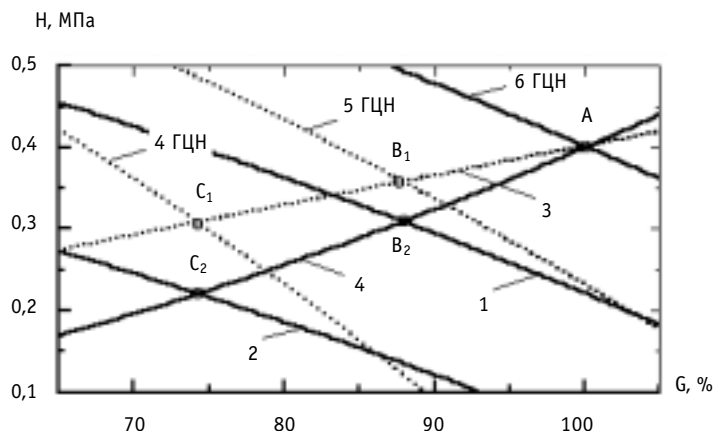


Рис. 4. Гидравлические характеристики насосов ГЦН-317 при параллельной работе 4, 5, и 6 ГЦН и 1 контура ВВЭР-440 при отключении ГЦН (3) и при изменении частоты их питания (4); H – средний перепад давления; G – расход теплоносителя через АЗ реактора; 1, 2 – характеристики 6 насосов при снижении частоты их питания до 43,9 Гц и 37,1 Гц соответственно

изменении частоты, согласно выражению [13]:

$$\frac{M}{M_0} = \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 \cdot \left(\frac{f_0}{f} \right)^2, \quad (4)$$

где M – вращающий момент; U – напряжение питающего тока.

На рис. 4 показаны напорные характеристики насосов ГЦН-317 [14], используемых на реакторах ВВЭР-440, при их параллельной работе. Точка А является рабочей в случае, когда включены все шесть ГЦН и частота питания равна 50 Гц. При отключении одного ГЦН расход через реактор G уменьшается на 12,2% (точка B_1), а при отключении двух ГЦН это уменьшение составляет 25,8% (точка C_1). Точно такие же изменения расхода теплоносителя при работе шести насосов можно получить уменьшая частоту питания ГЦН до 43,9 Гц (точка B_2) и 37,1 Гц (точка C_2) соответственно. Рабочие точки А, B_1 и C_1 получают из опытных данных [7], а точки B_2 и C_2 – расчетным путем.

ЭКОНОМИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Известно, что ГЦН потребляют значительное количество электроэнергии. Например, потребляемая мощность ГЦН-317 составляет 1,4 МВт, а у ГЦН-310 она равна 2 МВт. В целом на ГЦН затрачивается от 1 до 4% всей вырабатываемой АЭС электроэнергии [12, 14].

Поскольку потребляемая насосом мощность N пропорциональна третьей степени величины расхода G [12], а именно,

$$N = N_0 \cdot (G/G_0)^3, \quad (5)$$

можно существенно улучшить не только характеристики регулирования АЭС, но и получить значительную экономию электроэнергии. В формуле (5) N_0 и N – мощности насоса при номинальном и текущем расходах соответственно. Сравнение мощностей, потребляемых насосами ГЦН, в зависимости от способа регулирования расхода теплоносителя (отключение насоса или изменение скорости вращения двигателей) приводится на рис. 5. Из рисунка видно, что суммарная потребляемая мощность $N_{\text{сум}}$ при регулировании расхода G путем изменения скорости вращения двигателей насосов значительно меньше, чем при отключении насосов. Для сравнения, если вместо отключения одного ГЦН уменьшить расход теплоносителя с помощью преобразователей частоты, экономия электроэнергии составит около 18%, а если отключить два ГЦН

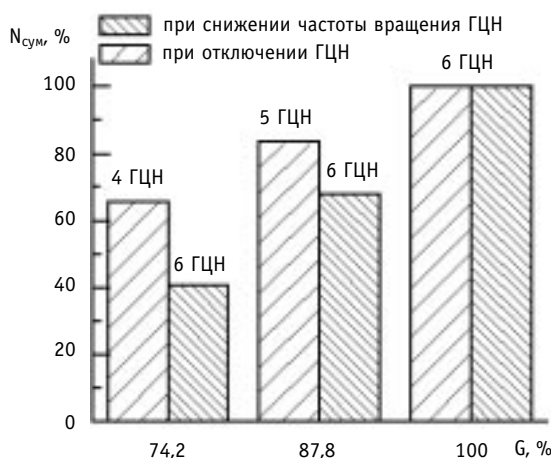


Рис. 5. Сравнение мощностей, потребляемых ГЦН, в зависимости от расхода теплоносителя G и разных способов регулирования расхода

себя уравнения тепломассообмена в реакторе, парогенераторах и оборудовании второго контура. Расчеты по математической модели проводились с помощью пакета MATCAD.

Исследование параметров первого контура проводилось при следующих условиях:

- использовалась программа регулирования энергоблоком с постоянным давлением p_2 во втором контуре;
- при уменьшении мощности реактора РТПК уменьшался двумя способами - с отключением ГЦН и уменьшением частоты питания двигателя (ЧПД) ГЦН;
- уменьшение мощности реактора (в процентах) принималось равным уменьшению РТПК при отключении ГЦН;
- ГЦН отключался после стабилизации процесса снижения мощности реактора.

Из формулы (3) видно, что расход теплоносителя и частота питания, должны изменяться по одному и тому же закону. При использовании метода последовательных приближений была определена зависимость (1) ЧПД и РТПК от мощности реактора. На рис. 6 приводятся зависимости изменения мощности реактора Q и РТПК при отключении ГЦН и при уменьшении ЧПД. В расчете предполагалось, что начало снижения частоты питания двигателя ГЦН совпадает со временем начала изменения мощности реактора. Точки А и В соответствуют отключению первого и второго ГЦН.

На рис. 6 показаны изменения температуры на выходе из реактора $T_{вых}$ и давления в первом контуре P_1 в зависимости от времени для разных способов регулирования расхода теплоносителя. При постоянном РТПК отклонение температуры $T_{вых}$ от номинальной составляет приблизительно $8,5^{\circ}\text{C}$, а отключение ГЦН приводит к циклическим изменениям температуры. Наиболее стабильное поведение температуры $T_{вых}$ достигается при изменении РТПК за счет уменьшения ЧПД в зависимости от тепловой мощности реактора. Из рисунка видно, что амплитуда колебаний давления в первом контуре в случае отключения ГЦН существенно выше, чем при изменении ЧПД. При постоянном РТПК (пунктирная кривая) отклонение давления от номинального почти в два раза больше, чем при ЧПД.

При возникновении аварийного дефицита мощности в сети может появиться необходимость поднятия мощности энергоблока выше номинальной. Такое увеличение мощности реактора можно безопасно осуществить только при регулировании ЧПД.

– экономия возрастет до 38%.

Принимая во внимание возможность АЭС в ночное время работать на пониженной мощности и учитывая, что количество насосов равно шести, можно показать, что годовая экономия электричества может быть значительной. Ее, по-видимому, вполне достаточно, чтобы быстро окупить затраты на модернизацию схемы питания насосов с помощью специальных преобразователей частоты.

ДИНАМИКА ПЕРВОГО КОНТУРА

Для анализа параметров реактора использовалась математическая модель энергоблока, включающая в

Безопасность в этом случае обеспечивается за счет постоянства температуры $T_{\text{вых}}$ теплоносителя, поскольку вероятность вскипания в верхней части активной зоны реактора будет существенно ниже, чем при постоянном расходе G .

В заключение сформулируем основные результаты, которые можно получить при реализации данной программы регулирования.

1. Изменение расхода теплоносителя, адекватное изменению мощности реактора, при программе регулирования $p_2 = \text{const}$ приводит к меньшим температурным колебаниям (следовательно, и меньшим температурным напряжениям), увеличивая срок службы оборудования энергоблока.

2. Регулирование энергоблока с изменяемым расходом теплоносителя за счет изменения ЧПД по сравнению с постоянным расходом теплоносителя G или с отключением ГЦН экономически выгодно.

3. При аварийном дефиците мощности в сети, имея возможность регулировать частоту питания ГЦН, можно более безопасно поднимать мощность энергоблока выше номинальной.

Литература

1. Острейковский В.А. Эксплуатация атомных станций. - М.: Энергоатомиздат, 1999. - 928 с.
2. Зверков В.В., Игнатенко Е.И., Волков А.П. Резервы повышения мощности действующих АЭС с ВВЭР-440. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 80 с.
3. Manson S. S. Thermal Stress and Low-Cycle Fatigue. - New York, 1974. - 344 p.
4. Collier J., Davies M., Carne L. PWR pressure vessel integrity-design for safety // Atom. - 1982. - № 308. - P. 127-131.
5. Клемен А.И., Шиверский Е.А. Анализ надежности трубопроводов и сосудов под давлением на АЭС // Атомная энергия. - 1979. - Т. 47. - Вып. 4. - С. 230-234.
6. Variable Frequency Drive (VFD) - Application Guide; Honeywell. - USA, 2001. - 53 p.
7. Овчинников Ф.Я., Вознесенский В.А., Семенов В.В. и др. Эксплуатационные режимы АЭС с ВВЭР-1000. - М.: Энергоатомиздат, 1992. - 359 с.
8. Безруков Ю.А., Астахов В.И. и др. Экспериментальные исследования и статистический анализ данных по кризису теплообмена в пучках стержней для реакторов ВВЭР // Теплоэнергетика. - 1976. - № 2.
9. Тонг Л. Кризис кипения и критической тепловой поток. Пер. с англ. - М.: Атомиздат, 1976.
10. Субботин В.И. и др. Кризис теплоотдачи в трубчатых твэлах атомных энергетических реакторов // Теплоэнергетика. - 1974. - № 9.
11. Осмачкин В.С., Лысцова Н.Н. Сравнение опытных данных по условиям кризиса теплообмена в моделях топливных сборок реакторов ВВЭР с результатами расчета по методике ИАЭ: Препринт ИАЭ. - 2558. - 1975.

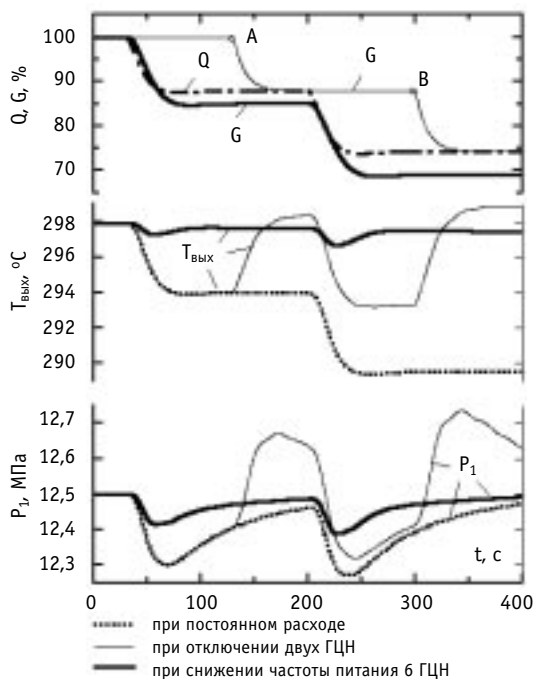


Рис. 6. Изменения параметров первого контура при уменьшении мощности реактора, в зависимости от времени

12. *Робожев А.В.* Насосы для атомных электрических станций. - М.: Энергия, 1979. - 136 с.
13. *Зимин В.И.* Регулирование скорости вращения электродвигателей. - М.: Военное издательство Министерства обороны СССР, 1962. - 133 с.
14. *Григорьева В.А. и Зорина В.М.* Тепловые и атомные электрические станции (№.3). - М.: Энергоатомиздат. 1989. - 531 с.

Поступила в редакцию 5.01.2002

detector location has been simulated. FA areas controlled by one gamma-detector are identified. This article can be used as basis for selecting an optimal configuration of gamma-detectors, when various technological tasks associated with spent fuel burnup estimation need to be solved.

УДК 621.039.5: 621.311.25

Regulation of PWR Type Nuclear Power Plants by Changing Productivity of Primary Coolant Pumps \ Ali Basharat, I.I. Locshakov; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2002. – 8 pages, 6 illustrations. – References, 14 titles.

The regulation of nuclear power plants with pressurized water reactors (PWR) type, based on the coordinated change of coolant flow rate through the first loop (CFRFL) during change of reactor power is considered. It is suggested to change CFRFL by changing frequency of the electric supply to primary coolant pumps (PCP). It has been shown, that the change of productivity of PCP essentially reduces the variations of reactor parameters from their nominal values during regulation of PWR type nuclear power plants, and lowers the power consumption by PCP at decreasing the power of the energy unit. The realization of such method of change of CFRFL essentially will increase the service life of the equipment by reducing the thermo-cyclic stresses in metallic structures. It has been shown, that such way of regulation by changing productivity of PCP provides the most favorable conditions of operation for the equipment of first and second loops, in comparison with the constant CFRFL or with the switching-off PCP to change CFRFL.

УДК 371: 658

Concept of Realization Integrated Multimedia Distance Educating System SYDNEY in Industry \ N.D. Khatkov, U.A. Pavlichenko; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2002. – 6 pages, 3 illustrations. – References, 4 titles.

Constant support determined professional level of specialists of enterprise particularly it is important on that dangerous production, where high requirements to the level of forming a personnel, where one unwary mistake because of incompetence can bring about disastrous consequences, where must be brought up careful attitude to the surround ambience. It can be marketed to the account of using the remote educational technologies. Particularity of using the similar technologies on the enterprise is a minimum participation of teacher in the scholastic process and maximum personalization of educating courses to the account of broad using the multimedia facilities. One of the possible variants of remote educating system choice for the enterprise can become multimedia system choice as with educating a real-time through the network internet, so and without its participation's in the real scholastic process. The Most-favored in conditions of acting enterprise turns out to be an using the educating systems, in which network internet is used for the support of process of educating only, but methodical material is located in local network of enterprise or on the separate computer. On the example several system desk sides Sydney, which possesses not only similar characteristics, as well as facilities, revealing individual particularities, presented advantages and similar system possibilities in conditions of acting enterprise.

УДК 615.849.2: 616.4

Physical Background of the Radionuclide Diagnostics and Therapy \ E.S. Matusevich, R.A. Roziev; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2002. – 11 pages, 1 table, 2 illustrations. – References, 10 titles.

In order to provide the radioiodine therapy, which is the most effective method of such thyroid sickness treatment as the thyrotoxicosis and thyroid cancer, the following was considered. The methods of the normalization of the diagnostic and therapeutic activity of ^{131}I . The mathematical model, which describes the ^{131}I activity in the thyroid. The method of the dosimetric planning of the radioiodine procedures. The software for estimation the population irradiation doses from the patients, which have passed the radioiodine therapy course. The experimental facility for the determi-