

Главный редактор

М. Д. МИЛЛИОНЩИКОВ

Заместители главного редактора:

Н. А. ВЛАСОВ, Н. А. КОЛОКОЛЬЦОВ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

А. И. АЛИХАНОВ, А. А. БОЧВАР, А. П. ВИНОГРАДОВ, И. Н. ГОЛОВИН,
Н. А. ДОДЛЕЖАЛЬ, А. П. ЗЕФИРОВ, В. Ф. КАЛИНИН, А. К. КРАСИН,
А. Н. ЛЕЙБУНСКИЙ, В. В. МАТВЕЕВ, М. Г. МЕЩЕРЯКОВ, И. П. ПАЛЕЙ,
Д. Л. СИМОНЕНКО, В. И. СМЕРНОВ, В. С. ФУРСОВ, В. Б. ШЕВЧЕНКО.

СОДЕРЖАНИЕ

СТАТЬИ

И. П. Ларский, П. П. Корешков, П. И. Моисейев. Уровни внешнего облучения персонала при работах с различными источниками излучений 463

Г. Б. Усатин. Расчет состава топлива и характеристика быстрого энергетического реактора в установившемся режиме 466

В. И. Гришков, В. А. Афанасьев, Г. А. Сапковский, Р. А. Шугам, И. Н. Соколов, Ю. А. Соловьев. Исследование системы автоматического регулирования атомной энергетической установки с кипящим реактором 469

В. И. Павловский, Л. Л. Финштейн. К выводу уравнения динамики паросодержания в парогенерирующих каналах при кипении перегретой воды 474

Р. Г. Васильков, В. И. Гольдманский, Я. В. Еришманов, О. С. Лукиндин, Б. А. Нименов. Нейтронные выходы и потоки тепловых нейтронов в системе сшивки — вода, бомбардируемой протоками высоких энергий 479

А. П. Тугаринов, Г. Е. Ордынец, Р. И. Щенякова, Е. И. Крыськов. Об использовании палладий изотопного состава свинца при изменении уранового региона 483

В. С. Ермеев. Исследование динамики углерода на монокарбиде урана в молибдене и полибране 489

А. В. Давыдов, Е. С. Давышин, И. Н. Палец, Р. А. Прибылова. Соединения ионов Pa(V) в растворах галогеноводородов 493

Ю. А. Сахаровский, Я. Д. Бельвинский. Экспериментальное определение значения коэффициента распределения при обменном обмене между жидким амальгамом и водородом 499

И. А. Копан, Л. И. Козаровицкая, И. М. Подгорный, В. А. Рязанов, В. П. Смирнов, А. М. Спектор, Д. А. Франк-Камецкий. Нагрев плазмы магнитно-звуковыми волнами 503

Г. В. Яковлевский, Ю. И. Серебряков. Развитие неустойчивости пучка электронов в магнитном ускорителе 507

А Н О Т И Ц И И Д Е Н О Н И Р О В А Н Н ы Х С Т А Т Е Й

Г. А. Сапковский, В. П. Гришков, Л. Л. Полтавцева, В. И. Плотинский. Методика исследования устойчивости водо-водяного кипящего реактора 514

В. Б. Дубровский, Ш. Ш. Ибрагимов, М. Я. Екин, А. Р. Тадыгин, Б. К. Пергаменцев. Устойчивость серпентинного б 515

Г. Я. Рязанов, В. С. Дмитриева, В. С. Усатин. Взаимодействие быстрых нейтронов в среде с пустым телом 516

И. А. Иванов, Н. Ф. Прандок. Возможности использования молибдена и вольфрама для оценки относительного распределения изотопов быстрых нейтронов в реакторе 517

Л. Л. Бродер, С. А. Колосовский, в. С. Клыжуров, К. К. Попков, А. А. Сметанин. Прохождение быстрых нейтронов и γ -излучения через прямоуг 517

И. П. Зольников, К. А. Суханова, Б. Л. Двининин. Энергетическое и пространственное распределение обратно рассеянного γ -излучения 518

И. К. Карпенко. Полоидальные волны в минимум среднего магнитного поля в двухзачодном стеллараторе 518

И. К. Карпенко. Возможность существования магнитной ямы в комбинированном поле одного двухзачодного стелларатора 519

М. И. Авраменко, В. С. Кузнецов. К вопросу о расчете фазовой фокусировки иттенциальных ионных пучков 520

П И С Ь М А В Р Е Д А К Ц И Ю

Э. А. Стумбур. О некоторых интегральных соотношениях в теории реакторов 522

О. А. Мизлер, А. М. Демидов, Ф. И. Овчинников, Л. И. Голубев, М. А. Сумчаганов. Гамма-спектры теплоносителя реактора первого блока Ново-Воронежской АЭС 524

Г. Г. Завени, И. А. Горак, Н. Т. Скаир, И. А. Тонант. Сечение радиационного захвата быстрых нейтронов изотопами Cu^{63} , Cu^{65} и W^{186} 526

С. Б. Ермагамбетов, Г. Н. Смиренин. Сечение деления Pu^{238} быстрыми нейтронами 527

А. Г. Добинко, В. Е. Козесов, В. П. Королева, В. А. Толстиков, Ю. Н. Шубин. Сечение радиационного захвата нейтроном с энергией 0,2—3 Мэв ядрами Te^{128} и Te^{130} 529

Л. И. Прохорова, Г. Н. Смиренин, Ю. М. Турчин. Среднее число мгновенных нейтронов при спонтанном делении Pu^{242} 530

236052



РЕПОЗИТОРИЙ ИМЕНА Ф. СКОРИНЫ

Значения сечений элементов в активной зоне и коэффициентов C_i , использованные в расчетах

Элемент	$\bar{\sigma}_c$, барн	$\bar{\sigma}_{cf}$, барн	C_i
U^{238}	0,2919	0,3397	-0,0192
Pu^{239}	0,4347	2,4045	1
Pu^{240}	0,6961	1,0532	0,100
Pu^{241}	0,4176	3,2035	1,449
Pu^{242}	0,3640	0,6520	0,060
Продукты деления	—	—	-0,0273

В заключение автор выражает благодарность М. Ф. Троянову за обсуждение результатов

работы и С. К. Кирпичниковой, принимавшей участие в расчетах.

Поступила в Редакцию 11/XII 1967 г.
В окончательной редакции 15/II 1968 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. S. Yiftan. Proceedings of the Seminar on the Physics of Fast and Intermediate Reactors. SM-18/13. Vienna, IAEA, 1962.
2. А. И. Лейпунский и др. Доклад № 369, представленный СССР на Третью международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1964).
3. А. И. Лейпунский и др. Там же, доклад № 311.
4. Л. П. Абагян и др. Групповые константы для расчета ядерных реакторов. М., Госатомиздат, 1964.

Исследование системы автоматического регулирования атомной энергетической установки с кипящим реактором

В. И. ГРИЦКОВ, В. А. АФАНАСЬЕВ, Г. А. САНКОВСКИЙ,
Р. А. ШУГАМ, И. Н. СОКОЛОВ, Ю. А. СОЛОВЬЕВ

УДК 621.039.51

При создании системы управления перво-степенное значение имеет вопрос о режиме работы АЭС в энергосистеме. АЭС либо работает в базисном режиме, либо выполняет регулировочную функцию. Первый режим наиболее благоприятен как для реактора, так и для другого основного оборудования. Роль системы автоматического регулирования в этом случае незначительна и обычно сводится к стабилизации нескольких параметров (уровень, давление и т. д.) при очень незначительных по величине или плавных возмущениях, которые возникают в объекте (например, при плавных переводах на другой уровень мощности или при плавном переключении части оборудования). При работе во втором режиме возникает необходимость автоматического приведения мощности АЭС в соответствие с нагрузкой и автоматической стабилизации некоторых параметров, отклонения которых при внешних возмущениях могут быть значительными. На промышленной АЭС с реактором ВК-50 [1, 2] предусмотрены различные варианты схемы автоматического регулирования.

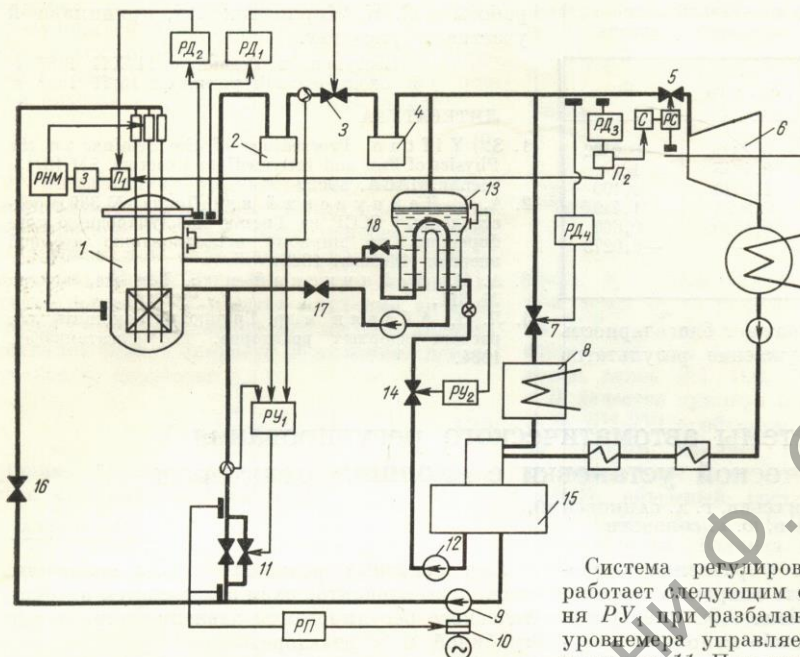
Схемы системы автоматического регулирования установки

Принципиальная схема системы автоматического регулирования установки представлена на рис. 1.

При основных режимах работы возможны несколько вариантов схем связи систем автоматического регулирования давления пара перед турбиной и в реакторе.

1. Реактор работает при постоянной мощности (которая может быть изменена оператором в соответствии с определенной программой) при давлении 35—100 атм и давлении перед турбиной 25—27 атм. В этом случае давление в реакторе регулируется системой $РД_1$ (либо вручную) с воздействием на дроссельные клапаны 3 (клапаны установлены на четырех паропроводах). Мощность реактора регулируется либо автоматически с помощью регулятора нейтронной мощности $РНМ$, либо дистанционно оператором. Регулирование давления пара перед турбиной может быть осуществлено с помощью $РД_3$, который управляет синхронизатором регулятора скорости $РС$, или с помощью $РД_4$ с воздействием на клапан 7, который изменяет расход пара во вспомогательный конденсатор 8.

2. Реактор работает при давлении 35—100 атм, а его мощность определяется нагрузкой турбогенератора. В этом случае давление в реакторе регулируется с помощью системы $РД_1$, а регулятор давления перед турбиной $РД_3$ воздействует на задатчик $РНМ$. При этом оператор уже не может произвольно менять мощность реактора воздействием на СУЗ, но может изменить мощность АЭС воздействием на синхронизатор турбины.



Р и с. 4. Принципиальная схема автоматического регулирования установки с кипящим реактором ВК-50:

1 — реактор; 2, 4 — сепараторы; 3, 5, 7, — дроссельные клапаны; 6 — турбина; 8 — технологический конденсатор; 9, 12 — питательные насосы реактора и парогенераторов; 10 — гидромфта питательного насоса; 11, 14, 16—18 — регулирующие клапаны; 13 — парогенератор; 15 — деаэрактор.

В первом и втором вариантах при давлениях в реакторе более 60 атм. дополнительно могут быть включены один, два или три парогенератора.

3. Установка работает в режиме, когда давления в реакторе и перед турбиной различаются лишь на величину гидравлического сопротивления паровой магистрали, включая полностью открытые дроссельные клапаны 3. В этом случае регуляторы РД₁ и РД₂ отключены, а РД₃ может управлять либо синхронизатором турбины, либо задатчиком РНМ. Здесь возможны следующие варианты регулирования давления: а) с помощью РД₃, а РД₄ отключен; б) с помощью РД₄, а РД₃ отключен; в) с помощью РД₃ и РД₄ при различной зоне нечувствительности этих регуляторов (например, для РД₃ — ± 0,5 атм., а для РД₄ — ± 2 атм.).

Схемы регулирования питания реактора и парогенераторов водой принципиально не отличаются от схем регулирования питания барабанных котлоагрегатов. Широкий диапазон регулирования мощности и широкий диапазон рабочих давлений в реакторе потребовали некоторого усложнения его питания (два питательных регулируемых клапана соответственно на малые и большие расходы, гидромфты на питательных насосах и т. д.).

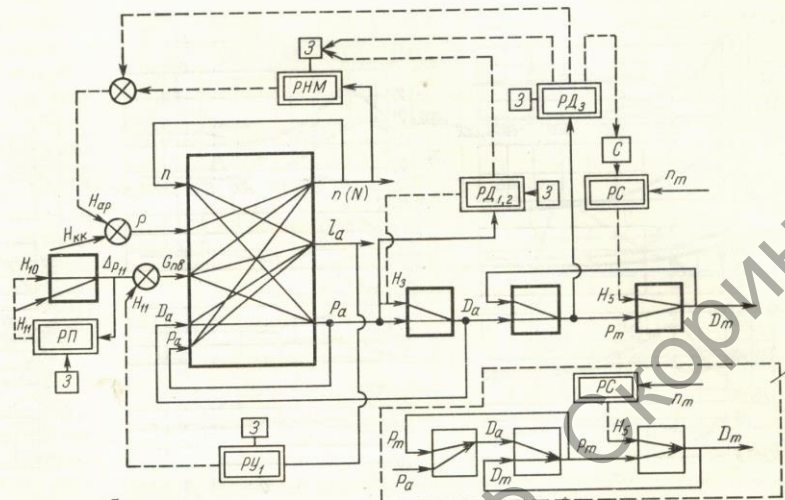
Система регулирования питания реактора работает следующим образом. Регулятор уровня РУ при разбалансе сигналов задатчика и уровнемера управляет одним из питательных клапанов 11. При перемещении клапана на нем меняется перепад давления, воспринимаемый регулятором РП. Этот регулятор управляет подачей масла в гидромфту 10 питательного насоса 9 так, чтобы восстановился перепад давления на клапане за счет изменения числа оборотов насоса. Рабочие характеристики питательных клапанов выполнены таким образом, чтобы обеспечить приблизительно линейную зависимость расхода от положения штока при постоянстве перепада.

Вся регулирующая аппаратура, кроме РНМ, стандартная.

На рис. 2 представлена структурная схема основных динамических связей установки для режима ее работы без парогенераторов. Управляющие воздействия системы автоматического регулирования на этой схеме показаны пунктирными линиями. Основными возмущениями для объекта являются реактивность (перемещение в активной зоне касет регулирования и компенсации), расходы пара на турбину и из реактора, расход питательной воды, а основными регулируемыми параметрами — мощность, давление в реакторе и перед турбиной, уровень в реакторе.

Эти параметры, как видно из структурной схемы, взаимосвязаны.

Рис. 2. Структурная схема основных динамических связей установки при работе реактора по прямому циклу:
1 — при $p_a - p_T < \Delta p_{кр}$.



Динамические характеристики объекта и системы автоматического регулирования

Рассмотрим несколько примеров динамического поведения основных параметров установки при различных возмущениях в условиях работы в базисном режиме и при давлении в реакторе более 50 атм.

На рис. 3 представлены переходные процессы основных параметров установки ВК-50 при

различных возмущениях, когда система автоматического регулирования нейтронной мощности, давления и уровня реактора отключена. На рис. 3, а показано поведение установки при достаточно резком введении отрицательной реактивности путем перемещения группы компенсирующих кассет в активной зоне за 8 сек на 200 мм.

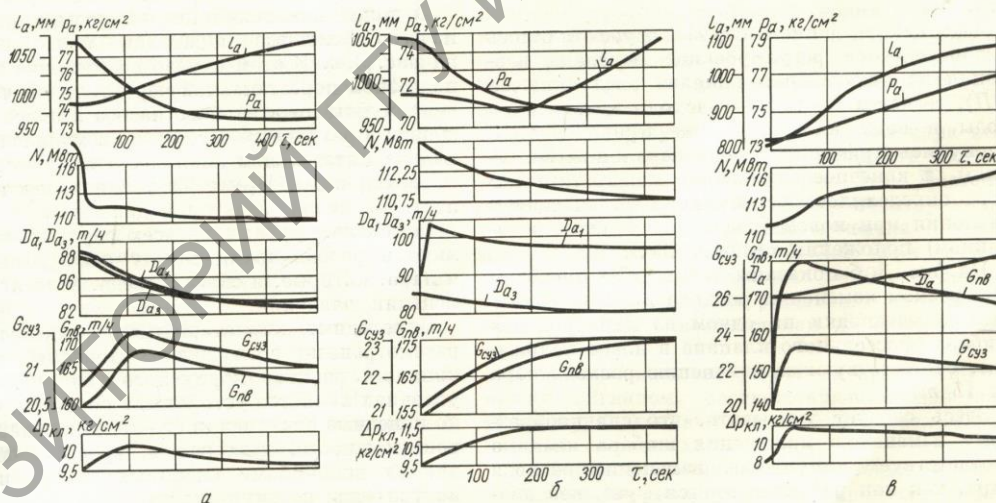


Рис. 3. Переходные процессы в реакторе при отключенной системе регулирования давления и уровня:
а — опускание компенсирующих кассет КК-I на 200 мм со скоростью 25 мм/сек; б — резкое открытие дроссельного клапана 3 на паропроводе; в — воздействие на черпательную трубку гидромuffты 10.

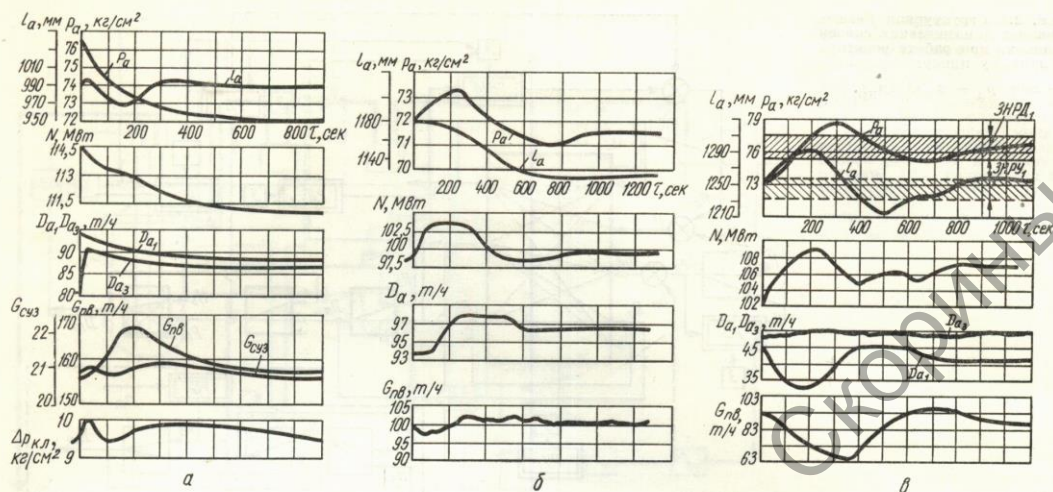


Рис. 4. Переходные процессы регулирования давления и питания реактора: а — резкое открытие дроссельного клапана 3, РУ₁ и РП включены, РД₁ отключен; б — извлечение компенсирующих кассет КК-II на 75 мм, РУ₁ отключен, РД₁ включен; в — изменение уставки задатчика РД₁ на 3 атм, РУ₁ и РП включены.

Достаточно резкое снижение мощности реактора при таком возмущении привело к плавному снижению давления, которое, в свою очередь, определило изменения расходов пара и воды, а также дальнейшее изменение мощности.

Так как в данном случае осуществлялось автоматическое регулирование перепада давления на питательном клапане (был включен РП), то через 8—10 мин расходы питательной воды и воды на охлаждение приводов СУЗ вернулись примерно к первоначальным значениям, а конечное отклонение мощности реактора определялось установившимся значением давления при новом (после возмущения неизменном) положении органов СУЗ.

На рис. 3, б показаны переходные процессы при резком изменении расхода пара в результате перестановки на одном из паропроводов шибер дроссельного клапана в новое положение, соответствующее изменению расхода пара на 15 м³/ч.

Здесь следует учитывать, что скачкообразному изменению положения шибер клапана соответствует импульсное изменение расхода пара, так как расход является функцией давления в реакторе. При указанном возмущении происходит плавное снижение давления и мощности. Однако на эти параметры оказало влия-

ние увеличение расходов питательной воды и воды на охлаждение приводов СУЗ, так как регулятор РП был отключен. В этом случае конечные отклонения мощности определяются отклонениями давления и расхода воды в реакторе.

Влияние изменения подачи воды в реактор на его основные параметры можно видеть на рис. 3, в. В этом случае возмущение вызвано резкой перестановкой черпательной трубки гидромуфты питательного насоса в новое положение, в результате чего резко изменился перепад на питательном клапане, а следовательно, и расход воды. При этом увеличивается мощность реактора, а затем и давление.

Изменения уровня во всех случаях определяются разбалансами между расходами воды и пара, которые, в свою очередь, зависят от изменений давления.

Переходные характеристики реактора при рассмотренных возмущениях показывают, что кипящий реактор корпусного типа в данных условиях является устойчивым объектом. Однако конечные отклонения его основных параметров (мощность, давление и уровень) определяются величинами вносимых возмущений и могут быть недопустимыми.

Динамические характеристики автоматического регулирования уровня и давления в реакторе показаны на рис. 4.

Пример автоматического регулирования уровня воды в реакторе при изменении его паровой нагрузки и отключенном регуляторе давления представлен на рис. 4, а. Из него следует, что качество регулирования этого параметра в данном случае достаточно хорошее: максимальные отклонения уровня не превышают 25 мм. Следует иметь в виду, что зоны нечувствительности (ЗН) регуляторов уровня РУ и перепада РП составляли примерно 200 мм и 1 атм соответственно.

Качество регулирования давления в реакторе при введении положительной реактивности (перемещение группы компенсирующих кассет) при установленной зоне нечувствительности регулятора давления $PД \sim 1$ атм показано на рис. 4, б. Следует отметить, что стабилизация давления в кипящем корпусном реакторе приводит к стабилизации его мощности; таким образом, в этом случае нет необходимости включения регулятора нейтронной мощности, являющегося неотъемлемой частью систем управления реакторов других типов.

На рис. 4, в показаны переходные процессы при автоматическом регулировании давления и питания реактора, когда возмущение вызвано перестановкой уставки задатчика регулятора давления РД, примерно на 3 атм. Эффективное время стабилизации (с точностью до зоны нечувствительности) давления на новом значении составляет 7—8 мин, а переходный процесс по уровню заканчивается практически за 10 мин.

Важным является выявление возможности системы автоматического регулирования при больших возмущениях (более 40—50% от установленного значения).

На рис. 5, а приведены переходные процессы регулирования давления в реакторе, когда возмущение вызвано резким снижением мощности реактора примерно на 50%. При этом регулятор давления РД₁ управлял клапаном З на одном из двух работающих паропроводов.

Давление в реакторе при таком возмущении начало падать очень интенсивно (0,1 атм/сек), а движение шибера клапана началось с некоторым запаздыванием, связанным с наличием

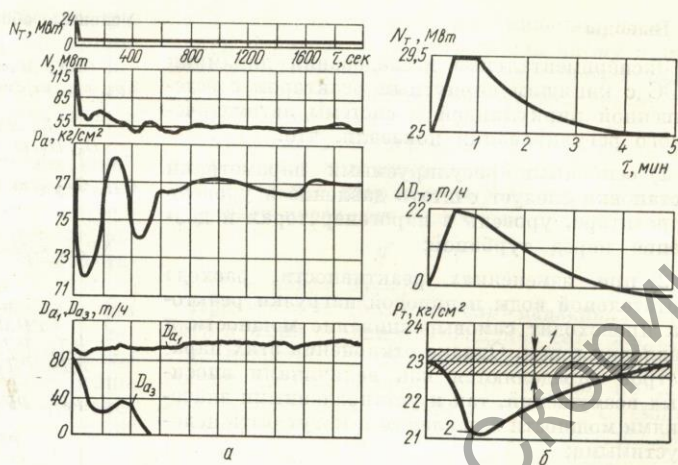


Рис. 5. Переходные процессы регулирования давления в реакторе и перед турбиной:

а — резкое снижение мощности (нагрузки) реактора на 50%; б — изменение мощности турбогенератора воздействием на синхронизатор; 1 — зона нечувствительности регулятора давления, 2 — включение РД₃.

зоны нечувствительности регулятора, а также люфтов в сочленениях привода со штоком шибера. Переходный процесс имеет колебательную форму с хорошей степенью затухания. Максимальное отклонение давления при этом составляет 5 атм, что следует признать весьма удовлетворительным при данных условиях. В момент времени, соответствующий ~600 сек, клапан полностью закрылся, и для дальнейшего регулирования давления регулятор РД₁ был переведен на управление клапаном второго паропровода.

Динамика регулирования давления пара перед турбиной при изменении мощности турбогенератора представлена на рис. 5, б. Дистанционным воздействием на синхронизатор мощность турбогенератора была изменена в течение 30 сек примерно на 4—4,5 Мвт, затем следовала выдержка времени ~30 сек, после чего включался регулятор давления пара перед турбиной РД₃ с воздействием на синхронизатор.

В момент включения регулятора разность между сигналом, соответствующим действительному значению давления, и сигналом задатчика составляла ~2 атм.

Качество регулирования давления вполне удовлетворительное, причем параметры динамической настройки регулятора выбраны так, чтобы переходный процесс был близок к апериодическому.

Выводы

Экспериментальные исследования динамики АЭС с кипящим корпусным реактором с естественной циркуляцией и системы автоматического регулирования показали, что:

1) основными регулируемыми параметрами установки следует считать давление и уровень в реакторе, уровень в парогенераторах и давление перед турбиной;

2) при изменениях реактивности, расхода питательной воды и паровой нагрузки реактора происходит самовыравнивание мощности и давления в нем. Однако отклонения этих параметров определяются как величинами вносимых возмущений, так и установленными значениями мощности и давления и могут быть недопустимыми;

3) при автоматическом регулировании давления в реакторе отпадает необходимость автоматического регулирования его мощности;

4) качество процессов автоматического регулирования давления в реакторе, уровня в реакторе и парогенераторах и давления пара перед турбиной вполне удовлетворяет технологическим требованиям.

Поступила в Редакцию 11/XII 1967 г.

Условные обозначения

- ρ — реактивность
- $N, \text{ Мвт}$ — мощность
- $P_a, P_T, \text{ кг/см}^2$ — давление в реакторе и перед турбиной
- $l_a, \text{ м.м.}$ — уровень в реакторе
- $D_a, D_T, \text{ м}^3/\text{ч}$ — расходы пара из реактора и на турбину
- $G_{п.в.}, G_{СУЗ}, \text{ м}^3/\text{ч}$ — расходы питательной воды в реактор и воды на охлаждение приводов СУЗ
- $\Delta P_{кл.}, \text{ кг/см}^2$ — перепад давления на питательном клапане
- H — положение регулирующего органа
- n_T — число оборотов турбогенератора
- P_{HM} — регулятор нейтронной мощности
- $P_{Д1}, P_{Д2}$ — регуляторы давления в реакторе
- $P_{Д3}, P_{Д4}$ — регуляторы давления пара перед турбиной
- $P_{У1}, P_{У2}$ — регуляторы уровня воды в реакторе и в парогенераторах
- $P_{П}$ — регулятор перепада на питательном клапане
- $P_{С}$ — регулятор скорости турбины
- C — синхронизатор
- Z — задатчик регулятора
- Π — переключатель

ЛИТЕРАТУРА

1. И. Н. Соколов и др. Доклад № 306, представленный СССР на Третью международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1964).
2. И. Н. Соколов и др. «Теплоэнергетика», № 5, 62 (1968).

К выводу уравнения динамики паросодержания в парогенерирующих каналах при кипении недогретой воды

в. и. плютинский, л. л. фишгойт

УДК 536.248.2:536.423

В большинстве работ, посвященных динамике парогенерирующих каналов, предполагается, что кипение начинается там, где поток воды достигает температуры насыщения t_s , т. е. поверхностное кипение недогретой воды не учитывается, хотя, как показывают оценки [1], при высоких тепловых потоках оно существенно влияет на динамику протекающих процессов. Один из способов учета этого влияния состоит в определении по известным статическим зависимостям [2, 3] паросодержания ϕ по энthalпии i (температуре) потока в данном сечении в данный момент времени t . При этом предполагается, что равновесное паросодержание в потоке устанавливается мгновенно. Однако значительное время жизни парового пузыря

при поверхностном кипении [4] свидетельствует о том, что время установления равновесного паросодержания может быть соизмеримо со временем развития процесса и должно учитываться при расчетах.

В работе [1] сделана попытка учета поверхностного кипения в динамических расчетах в предположении, что на образование пара при поверхностном кипении недогретой воды расходуется определенная (и постоянная) доля подводимого тепла κ и образовавшийся пар не конденсируется.

Оба предположения противоречат экспериментальным данным, поэтому эта модель может быть использована лишь в качестве грубого приближения.