

В.В. Сорокин

Парогенераторы АЭС

*Допущено
Министерством образования
Республики Беларусь
в качестве учебного пособия
для студентов
учреждений высшего образования
по специальностям «Паротурбинные установки
атомных электрических станций»,
«Проектирование и эксплуатация атомных
электрических станций»*

Минск
 «Вышэйшая школа»
2020

УДК 621.181.01:621.311.25(075.8)
ББК 31.361я73
С65

Рецензенты: кафедра ядерной физики Белорусского государственного университета (заведующий кафедрой кандидат физико-математических наук, доцент *А.И. Тимошенко*); профессор кафедры энергосбережения, гидравлики и теплотехники учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет» доктор технических наук *В.И. Володин*

Сорокин, В. В.
С65 Парогенераторы АЭС : учебное пособие / В. В. Сорокин. — Минск :
Вышэйшая школа, 2020. — 239 с. : ил.
ISBN 978-985-06-3281-4.

Приведены данные о процессах кипения воды в условиях энергетического парогенератора, теплопередаче и движении теплоносителя, об устройстве парогенератора и связанных с ним систем. Рассмотрены парогенераторы реакторных установок ВВЭР, РWR, БН, ВТГР, БРЕСТ. Основное внимание уделено парогенераторам реакторной установки ВВЭР-1200, называемым ПГВ-1000 МКП.

Для студентов учреждений высшего образования по специальностям «Паротурбинные установки атомных электрических станций», «Проектирование и эксплуатация атомных электрических станций». Может быть полезно преподавателям и специалистам.

УДК 621.181.01:621.311.25(075.8)
ББК 31.361я73

Все права на данное издание защищены. Воспроизведение всей книги или любой ее части не может быть осуществлено без разрешения издательства.

ISBN 978-985-06-3281-4

© Сорокин В.В., 2020
© Оформление. УП «Издательство
«Вышэйшая школа»», 2020

Список сокращений

АВР – аварийный ввод резерва
АЗ – аварийная защита
АС – атомная станция
АСУ ТП – автоматизированная система управления технологическими процессами
АХК – автоматический химический контроль
АЭС – атомная электрическая станция
АЭУ – атомная энергетическая установка
БАОТ – бак аварийного отвода тепла
БВ – бассейн выдержки
БЗОК – быстродействующий запорно-отсечной клапан
БН – быстрый натриевый
БОУ – блочная обессоливающая установка
БПУ – блочный пункт управления
БРУ-А – быстродействующая редукционная установка для сброса пара в атмосферу
БРУ-К – быстродействующая редукционная установка для сброса пара в конденсатор
БРУ-СН – быстродействующая редукционная установка для подачи пара на собственные нужды
ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор
ВК – визуальный контроль
ВКУ – внутрикорпусные устройства
ВНИИАМ – Всероссийский научно-исследовательский институт атомного машиностроения
ВНИИАЭС – Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций
ВПЭН – вспомогательный питательный электронасос
ВТ – водяной теплоноситель
ВТГР – высокотемпературный газоохлаждаемый реактор
ВТК – вихретоковый контроль
ВХР – водно-химический режим
ГК – главный клапан
ГО – герметичное ограждение
ГПЗ – главная паровая задвижка
ГПК – главный паровой коллектор
ГЦК – главный циркуляционный контур
ГЦН – главный циркуляционный насос
ГЦНА – главный циркуляционный насосный агрегат
ГЦТ – главный циркуляционный трубопровод
ДГ – дизель-генератор
Ду (*Dy*) – диаметр условный
ЖРО – жидкие радиоактивные отходы
ЗПА – запроектная авария
ИК – импульсный клапан

ИПУ – импульсно-предохранительное устройство
ИПУ ПГ – импульсно-предохранительное устройство парогенератора
КД – компенсатор давления
КИП – контрольно-измерительные приборы
КИУМ – коэффициент использования установленной мощности
КК – капиллярный контроль
КН – конденсатный насос
КПТ – конденсатно-питательный тракт
КСН – коллектор собственных нужд
МАГАТЭ – Международное агентство по атомной энергии
МКК – межкристаллитная коррозия
МКУ – минимально контролируемый уровень
МПК – магнитопорошковый контроль
МПП – межпрокладочное пространство
МРЗ – максимальное расчетное землетрясение
НИКИЭТ – Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники
НИТИ – Научно-исследовательский технологический институт
ННУЭ – нарушение нормальных условий эксплуатации
ННЭ – нарушение нормальной эксплуатации
НОК – нижняя образующая корпуса
НУЭ – нормальные условия эксплуатации
НЭ – нормальная эксплуатация
ОИЭЯИ – Объединенный институт энергетических и ядерных исследований
ОКБ – опытное конструкторское бюро
ОКБМ – опытное конструкторское бюро машиностроения
ООБ – отчет по обоснованию безопасности (дополнительные буквы в начале: О – окончательный, П – предварительный, Пр – предварительная редакция)
ОПБ – общие положения обеспечения безопасности атомных станций
ОЯТ – отработавшее ядерное топливо
ПА – проектная авария
ПВ – питательная вода
ПВД – подогреватель высокого давления
ПГ – парогенератор
ПГВ – парогенератор с водяным теплоносителем
ПДК – предельно допустимая концентрация
ПДЛ – погруженный дырчатый лист
ПЗ – проектное землетрясение
ПК ПГ – предохранительный клапан парогенератора
ПНД – подогреватель низкого давления
ПНЖБ – предварительно напряженный железобетон
ПНР – пусконаладочные работы
ПОК/ПОКАС – программа обеспечения качества
ПП – пароперегреватель
ППДЛ – плоский пароприемный дырчатый лист
ППР – планово-предупредительный ремонт
ПР – плановый ремонт
ПТО – промежуточный теплообменник

ПТУ – паротурбинная установка
ПУ – предохранительное устройство
ПЭН – питательный электронасос
РАО – радиоактивные отходы
РБМК – реактор большой мощности кипящий
РДЭС – резервная дизельная электростанция
РК – радиографический контроль
РО – реакторное отделение
РПУ – резервный пункт управления
РУ – реакторная установка
РУ БН – реакторная установка быстрая натриевая
САГ – система аварийного газоудаления
САКОР – система автоматизированного контроля остаточного ресурса
САКТ – система акустического контроля течи
САОЗ – система аварийного охлаждения зоны
САЭ – система аварийного электроснабжения
СВО-5 – система очистки продувочной воды парогенераторов
СВРК – система внутриреакторного контроля
СК – система контроля
СКВ – система контроля вибраций
СКТВ – система контроля течи влажностная
СКУ – система контроля и управления
СКУД – система контроля, управления и диагностики
СНЭ – система нормальной эксплуатации
СОСП – система обнаружения свободных предметов
СПбАЭП – Санкт-Петербургский «Атомэнергопроект», ОАО
СПОТ – система пассивного отвода тепла
СПОТ ПГ – система пассивного отвода тепла через парогенераторы
СПП – сепаратор-пароперегреватель
СТ – свинцовый теплоноситель
СТД – система технического диагностирования
СУД – сосуд уравнивающий двухкамерный
СУЗ – система управления и защиты
СУО – сосуд уравнивающий однокамерный
ТА – тяжелая авария
ТАЭС – Тяньваньская атомная электрическая станция
ТВС – тепловыделяющая сборка
ТГ – турбогенератор
ТГУ – турбогенераторная установка
ТЖМТ – тяжелый жидкометаллический теплоноситель
ТЗ – техническое задание
ТЗА – тяжелая запроектная авария
ТОАР – теплообменник аварийного расхолаживания
ТОИ – типовой оптимизированный и информатизированный
ТОТ – теплообменная трубка
ТРБЭ – технологический регламент безопасной эксплуатации
ТУ – технические условия

ТЭН – трубчатый электронагреватель
УЗК – ультразвуковой контроль
УСБ – управляющая система безопасности
УСБИ – управляющая система безопасности, инициирующая запуск технологических систем безопасности
УСБТ – управляющая система безопасности по технологическим параметрам
ФГУП – федеральное государственное унитарное предприятие
ФСД – фильтр смешанного действия
ФЭИ – Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского (РФ)
ХОВ – химически обессоленная вода
ЦВД – цилиндр высокого давления
ЦНД – цилиндр низкого давления
ЦНИИТМАШ – Центральный научно-исследовательский институт тяжелого машиностроения
ЦНИИКМ – Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей»
ЭКИ – эрозионно-коррозионный износ
ЭТА – этаноламин
ЯТЦ – ядерный топливный цикл
AGR – Advanced Gas-cooled Reactor (усовершенствованный газоохлаждаемый реактор)
ASME – American Society of Mechanical Engineers (Американское общество инженеров-механиков)
BWR – Boiling Water Reactor (реактор с кипящей водой)
EUR – European Utility Requirements (Требования европейских производителей электроэнергии к АЭС)
MSK – Medvedev – Sponheuer – Karnik scale, is a macroseismic intensity scale used to evaluate the severity of ground shaking on the basis of observed effects in an area of the earthquake occurrence (шкала Медведева – Шпонхера – Карника, шкала для количественной оценки силы землетрясения, ориентированная на наблюдаемые эффекты в зоне землетрясения)
PWR – Pressurized Water Reactor (реактор с водой под давлением)

Введение

Учебное пособие написано с целью оказать методическую помощь студентам специальности 1-43 01 04 «Паротурбинные установки атомных электрических станций» дневной формы обучения при освоении материала курсов и выполнении курсовых проектов по парогенераторам АЭС. Пособие может использоваться как дополнительный источник информации для студентов учреждений высшего образования, специализирующихся по энергетике, и специалистов, проходящих подготовку в учебно-тренировочных центрах (УТЦ) при АЭС. Изложение построено с учетом десятилетнего опыта преподавания дисциплины «Парогенераторы АЭС» на энергетическом факультете БНТУ.

В пособии приводятся данные о процессах кипения воды в условиях энергетического парогенератора, теплопередаче и движении теплоносителя, об устройстве парогенератора и связанных с ним систем. Рассмотрены парогенераторы реакторных установок ВВЭР, PWR, БН, ВТГР, БРЕСТ. В Республике Беларусь построена двухблочная АЭС с ВВЭР-1200 (АЭС-2006) по российскому проекту, первый блок АЭС готовится к эксплуатации. Поэтому основное внимание уделено парогенераторам этой реакторной установки, называемым ПГВ-1000 МКП.

Для ПГВ-1000 МКП подробно рассматривается устройство с увязкой принятых конструктивных решений с тепломеханическими и физико-химическими основами протекающих процессов, возможностями техники и требованиями норм и правил проектирования важного для безопасности оборудования атомной энергетики. Большое внимание уделено ведению водно-химического режима первого и второго контуров энергоблока и проблеме обеспечения проектных сроков эксплуатации парогенератора, противодействию процессам коррозии. Последовательно отражаются связи ПГВ-1000 МКП с более ранним устройством ПГВ-1000 и с более новым ПГВ-1000 МКО, рассматриваются решенные и не решенные проблемы ПГВ. Сравняются конструкции и опыт эксплуатации ПГВ и зарубежных парогенераторов.

В подборе литературных источников приоритет отдается публикациям авторов из организаций, непосредственно связанных с проектированием, производством, эксплуатацией и обеспечением безопасности парогенераторов ПГВ ВВЭР. Особое место занимают материалы международных семинаров по горизонтальным парогенераторам и международных научно-технических конференций «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», которые проводит ОКБ «Гидропресс», являющееся главным конструктором реакторных установок ВВЭР. Мероприятия проводятся регулярно с 2001 г. при поддержке МАГАТЭ и Росатома. В дополнение к научным и научно-практическим журнальным статьям по теме широко цитируются диссертационные работы. Все это наряду с освоением современной актуальной информации по парогенераторам позволяет включиться в живой процесс совершенствования техники и процесса эксплуатации. Обращение к нормам и правилам проектирования и эксплуатации

важного для безопасности оборудования позволяет познакомиться с основами техники атомной энергетики, фокусирует внимание на приоритете безопасности в отрасли.

Парогенератор АЭС производит пар для питания турбинной установки и систем собственных нужд атомной электростанции. Это важный элемент АЭС, от которого зависит не только выработка энергии, но и безопасность. К парогенераторам атомных электростанций предъявляются высокие требования по надежности, непрерывности работы и обеспечению проектных параметров пара. Парогенератор – это зона, где взаимодействуют среды с разными температурами и скоростями, формируются поля температур и напряжений, протекают сложные коррозионные процессы. Парогенератор – крупногабаритное теплообменное устройство с большим сроком изготовления (до 36 месяцев) и стоимостью. Срок службы парогенератора составляет 30–60 лет с возможностью продления по данным обследования. Для обеспечения этого срока требуется правильное конструирование, изготовление, транспортировка и монтаж изделия, постоянная кропотливая работа по поддержанию водно-химического режима, управлению и контролю, ремонту, диагностике и профилактике в соответствии с инструкциями, регламентами и нормами безопасности. Нормы безопасности постоянно совершенствуются, анализируется опыт эксплуатации, по результатам в течение срока службы неоднократно осуществляется модернизация парогенераторов.

В настоящее время основу атомной энергетики составляют блоки АЭС с PWR (298 из 451 блоков на 31.12.2018). Парогенераторы прошли трудный путь эволюции и сегодня переживают молодость на новом уровне спирали прогресса, запущены в промышленную эксплуатацию блоки поколения 3+ АЭС-2006 (Нововоронежская-2-1 в 2017 г. и Ленинградская-2-1 в 2018 г.) и AP-1000 (Haiyang-1 и -2, Sanmen-1 и -2 в 2018 г.) со сроком службы 60 лет. В парогенераторы этих энергоблоков вложены накопленные знания и опыт, достижения науки и техники, но, как и на заре атомной энергетики, только практика эксплуатации определит успешность принятых технических решений.

Раздел I

Парогенераторы АЭС

Глава 1. Парогенераторы реакторных установок с водой под давлением

1.1. Парогенератор реакторной установки ВВЭР

В Республике Беларусь построена двухблочная АЭС с ВВЭР (АЭС-2006) по российскому проекту. Тепловая мощность энергоблока 3200 МВт, электрическая – 1194 МВт. В состав энергоблока входят реакторная установка (РУ) с водо-водяным энергетическим реактором типа ВВЭР-1200 на тепловых нейтронах и турбогенераторная установка (ТГУ). Тепловая схема преобразования и передачи энергии от реактора к турбогенератору является двухконтурной. Передача энергии между контурами осуществляется в парогенераторе (ПГ).

Парогенератор АЭС производит пар для питания турбинной установки и систем собственных нужд атомной электростанции [1, 2]. Это важнейший элемент АЭС с реактором с водой под давлением, от которого зависит не только выработка энергии, но и безопасность станции. В парогенераторе нагретая вода первого контура передает тепло кипящей воде, образовавшийся насыщенный пар отводится в паровой коллектор. Сепарация влаги осуществляется внутри парогенератора. Запас котловой воды пополняется непрерывной подачей питательной воды. Соли и шламы отводятся продувкой. Парогенератор нужен для отделения радиоактивного теплоносителя первого контура от нерадиоактивного пара и воды второго контура. С одной стороны, это делает всю паросиловую часть нерадиоактивной, с другой – снижает КПД, усложняет устройство и эксплуатацию энергоблока АЭС.

К парогенераторам атомных электростанций предъявляются высокие требования по надежности, непрерывности работы и обеспечению заданных параметров пара. Парогенератор не может быть отключен по первому контуру. Как максимум, допустимо снижение тепловой нагрузки путем остановки соответствующего главного циркуляционного насоса (ГЦН) при рабочем абсолютном давлении. Парогенератор радиоактивен, закрыт теплоизоляцией, помещен в бокс. Боксы расположены внутри герметичного ограждения (ГО). Свободный доступ к работающим парогенераторам невозможен. Доступ открывается во время остановки реакторной установки для перегрузки топлива раз в год на 25 дней, а при использовании удлиненных топливных циклов – раз в полтора-два года.

В парогенераторе с потоком питательной воды оказываются все загрязнения, которые присутствуют во втором контуре. Основная часть воды выкипает

и выходит из ПГ в форме насыщенного пара, а большая часть загрязнений остается в котловой воде, где они упариваются и концентрируются. Загрязнения выходят с продувкой или оседают на теплообменной поверхности в форме отложений. В ПГ подается свыше 1,5 тыс. т питательной воды в час, а удаляется с продувкой в двести раз меньше.

Конструкция ПГ должна обеспечить наиболее полное использование теплоты и температуры теплоносителя первого контура – воды под давлением. Для получения приемлемых массогабаритных характеристик теплообменной поверхности требуется обеспечить температурный напор между контурами порядка нескольких десятков градусов. На рис. 1.1 приведены характерные перепады температуры и давления в ПГВ-1000 МКП и линия насыщения воды $p_s(t_s)$. Подогрев теплоносителя в реакторе производится с 300 до 330 °С при давлении 16 МПа. В этой части линии насыщения малым перепадам температур t соответствуют большие перепады абсолютного давления p , $t_{\text{вх}}$ и $t_{\text{вых}}$ – температуры входа и выхода теплоносителя (индексы: первый контур – к1, второй контур – к2) из ПГ.

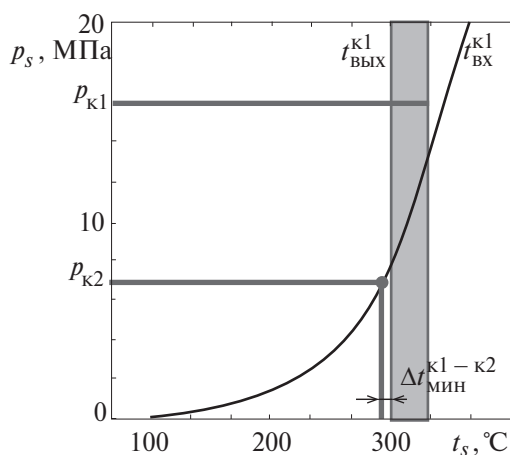


Рис. 1.1. Перепады давления и температуры в парогенераторе

Если выбрать высокую температуру во втором контуре с целью повысить термодинамический коэффициент полезного действия (КПД) установки, придется пойти на резкое увеличение абсолютного давления в первом контуре. Это потребует повышения прочности корпуса реактора, его толщины и массы. Целостность корпуса реактора важна для безопасности и должна быть гарантирована. Масса и размер устройств ограничиваются требованием транспортируемости по железной дороге. Для снижения массы парогенератора перепад температур между контурами $\Delta t^{к1-к2}$ выбирается разумно большим. Экономические показатели энергоблока растут с повышением единичной мощности, но снижаются, если используется эксклюзивное и мелкосерийное оборудование. В этом же ряду факторов следует учитывать и возможности промышленности изготавливать сложные изделия. Требования к параметрам теплоноси-

телей первого и второго контура в ПГ оказываются противоречивыми. Поэтому они выбираются на основе компромисса и оптимизации блока АЭС в целом с приоритетом безопасности и надежности эксплуатации.

Принципиальное устройство парогенератора РУ ВВЭР приведено на рис. 1.2; традиционно используются парогенераторы горизонтального типа [3]. Их характерные отличия – горизонтальный цилиндрический корпус, горизонтальные змеевики поверхности теплообмена, заделанные в вертикальные коллекторы теплоносителя первого контура, использование гравитационной сепарации в верхней части объема корпуса. Важной особенностью является применение аустенитной стали 08X18H10T в качестве материала змеевиков.

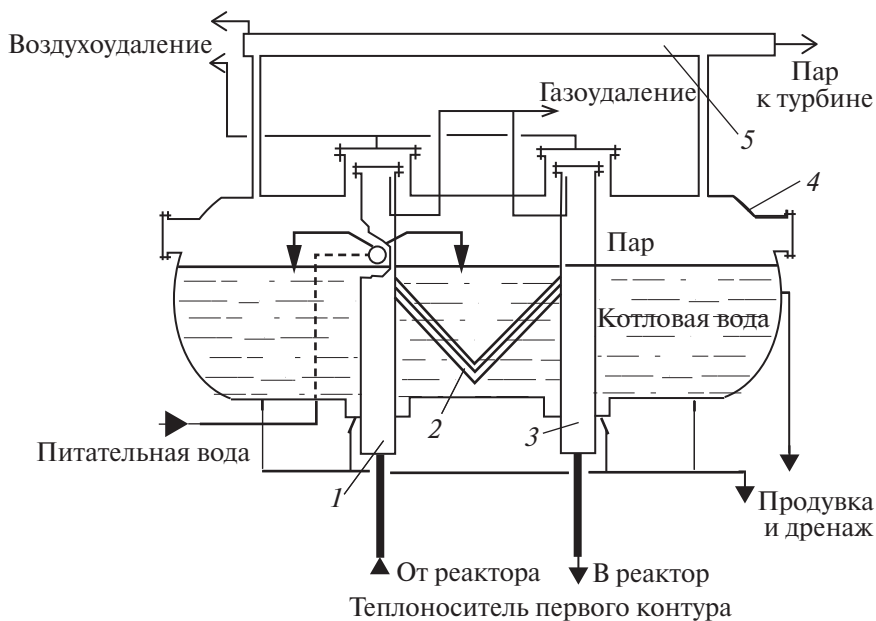


Рис. 1.2. Схема парогенератора реакторной установки ВВЭР:

1 – горячий коллектор; 2 – пучки теплообменных трубок (змеевики); 3 – холодный коллектор; 4 – корпус; 5 – паровой коллектор

Греющим теплоносителем является вода первого контура. Вода поступает в парогенератор при температуре 330 °С и давлении 16 МПа через горячий коллектор 1. В коллекторе вода распределяется по теплообменным трубкам (ТОТ) 2, движется в сторону холодного коллектора 3, передавая тепловую энергию через стенки трубок котловой воде. Затем теплоноситель собирается в холодном коллекторе 3 и движется в реактор для подогрева. Температура воды на выходе из парогенератора 300 °С. Для обеспечения тепловой мощности ПГ на уровне 750–800 МВт при таком небольшом перепаде температур требуется расход теплоносителя порядка 22 000 м³/ч. Расход обеспечивает главный циркуляционный насосный агрегат (ГЦНА). Теплоноситель первого контура радиоактивен. В верхних частях коллекторов скапливается газ, который

отводится в систему газоудаления. Газ радиоактивен, может быть горючим и взрывоопасным вследствие высокого содержания водорода и кислорода.

Нагреваемым теплоносителем является котловая вода — теплоноситель второго контура. Котловая вода кипит на внешней стенке ТОТ при давлении 7 МПа и превращается в насыщенный пар с температурой 285 °С. Пар собирается в паровом коллекторе 5 и подается на турбину. Расход котловой воды на образование пара компенсируется подачей питательной воды. Температура питательной воды 225 °С. Выделенный экономайзерный участок отсутствует. Подогрев осуществляется смешением с котловой водопаровой средой. Поскольку с водой поступают соли, которые не переходят в пар при кипении, то со временем концентрация солей в котловой воде растет. Этот процесс опасен, так как способствует развитию коррозии и сопровождается выпадением отложений на теплообменную поверхность. Накопленные соли выводятся продувкой, в ходе которой часть котловой воды удаляется из ПГ. Теплоноситель второго контура не радиоактивен в опасной для человека степени. Работу ПГ при высоком давлении второго контура обеспечивает прочный корпус 4.

Теплотехнические характеристики парогенератора ПГВ-1000 МКП приведены в табл. 1.1. Максимальные отклонения обусловлены различием в тепловых мощностях ПГ. Параметры могут уточняться при пусконаладочных работах. Допуски учитывают погрешность измерения и поддержания параметров.

Таблица 1.1. Теплотехнические характеристики парогенератора ПГВ-1000 МКП

Параметр	Значение
Номинальная тепловая мощность, МВт	803
Максимальная тепловая мощность, МВт	859
Паропроизводительность (при температуре питательной воды 225 °С и уровне продувки 15 т/ч), т/ч	1602 ⁺¹¹²
Давление генерируемого пара на выходе из коллектора пара ПГ, абсолютное, МПа	7,00±0,10
Температура генерируемого пара на выходе из коллектора пара ПГ, °С	285,8±1,0
Температура питательной воды в номинальном режиме, °С	225±5
Влажность пара на выходе из коллектора пара ПГ, % масс., не более	0,20
Давление теплоносителя первого контура на входе в ПГ, абсолютное, МПа	16,14±0,30

1.2. Место парогенератора на энергоблоке АЭС с ВВЭР

Основные технические характеристики энергоблока АЭС с ВВЭР-1200 приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2. Основные технические характеристики энергоблока АЭС с ВВЭР-1200 [4]

№ п/п	Характеристика	Величина
1	2	3
1	Структура энергоблока	Моноблок
2	Срок службы, лет: энергоблок реакторная установка	50 60
3	Мощность энергоблока, МВт: электрическая (брутто)* тепловая	1194 3200
4	Теплофикационная мощность энергоблока, МВт	46,6
5	Коэффициент использования установленной мощности, отн. ед.	0,9
6	Расход электроэнергии на собственные нужды (с учетом затрат на оборотное водоснабжение и затрат площадки), %	7,0
7	Неплановые автоматические остановы реактора, событий/год, менее	0,5
8	Среднегодовая продолжительность плановых остановов (перегрузка реактора, регламентные работы, планово-предупредительный ремонт), сут, не более	25
9	Численность промышленно-производственного персонала для первого энергоблока (удельная), чел./МВт	0,66
10	Количество ТВС в активной зоне, шт.	163
11	Количество ТВС с СУЗ, шт.	121
12	Максимальная глубина выгорания, средняя по ТВС, МВт·сут/кг U	60
13	Продолжительность кампании топлива, лет	3–4
14	Периодичность перегрузки топлива, месяцев	12
15	Среднее обогащение топлива подпитки изотопом U-235, %	4,79
16	Основные параметры теплоносителя: первого контура: температура на входе в активную зону, °С температура на выходе из активной зоны, °С подогрев теплоносителя на активной зоне, °С расход теплоносителя через реактор, м³/ч давление на выходе из активной зоны, МПа второго контура: давление пара на выходе из ПГ, МПа паропроизводительность ПГ, т/ч температура питательной воды, °С влажность пара на выходе из ПГ, %, не более температура генерируемого пара на выходе из коллектора пара ПГ, °С	298,2 328,6 30,4 88 000 16,2±0,3 7,0±0,1 1602+112 225±5 0,2 285,8±1

Оглавление

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	3
ВВЕДЕНИЕ	7
РАЗДЕЛ I. ПАРОГЕНЕРАТОРЫ АЭС	9
<i>Глава 1. Парогенераторы реакторных установок с водой под давлением</i>	<i>9</i>
1.1. Парогенератор реакторной установки ВВЭР	9
1.2. Место парогенератора на энергоблоке АЭС с ВВЭР	12
1.3. Термодинамический цикл с насыщенным паром	19
1.4. Парогенератор ПГВ-1000 МКО реакторной установки ВВЭР-ТОИ	22
1.5. Парогенераторы зарубежных реакторных установок с водой под давлением ...	26
1.6. Сравнение парогенераторов реакторных установок с водой под давлением ...	29
<i>Глава 2. Парогенераторы реакторных установок с другими теплоносителями</i>	<i>36</i>
2.1. Парогенераторы реакторных установок БН	36
2.2. Парогенераторы газоохлаждаемых реакторов	46
2.3. Парогенератор РУ БРЕСТ-ОД-300	55
<i>Глава 3. Требования к парогенераторам</i>	<i>61</i>
3.1. Требования норм безопасности к парогенератору	61
3.2. О лицензировании	69
РАЗДЕЛ II. ПРОЦЕССЫ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПАРА В ПАРОГЕНЕРАТОРЕ ...	73
<i>Глава 4. Тепловые и гидродинамические процессы</i>	<i>73</i>
4.1. Общие характеристики парогенераторов	73
4.2. Процесс кипения в парогенераторе	76
4.2.1. Свойства кипения	76
4.2.2. Теоретические подходы к моделированию кипения	81
4.2.3. Свойства течения теплоносителя	83
4.3. Движение сред в парогенераторе	86
<i>Глава 5. Физико-химические процессы на поверхности теплообмена</i>	<i>92</i>
5.1. Отказы при эксплуатации ПГВ-1000	92
5.2. Водно-химический режим с использованием тяжелых аминов	96
5.3. Типы коррозионных дефектов теплообменных трубок	98
5.4. Основные механизмы повреждения теплообменных трубок	101
<i>Глава 6. Водный режим парогенератора с многократной циркуляцией</i>	<i>106</i>
6.1. Водно-химический режим первого контура ВВЭР-1200	106
6.1.1. Общие положения	106

6.1.2. Работа энергоблока на мощности более 50% номинальной	109
6.1.3. Работа энергоблока на мощности в диапазоне от 30 до 50% номинальной . . .	110
6.1.4. Работа энергоблока в «горячем» состоянии, в состоянии «реактор на МКУ мощности» и на мощности менее 30% номинальной	111
6.1.5. Расхолаживание реакторной установки, «холодное» состояние энергоблока и состояния «останов для ремонта» или «перегрузка топлива»	113
6.1.6. Пуск энергоблока из «холодного» состояния, после состояний «перегрузка топлива» или «останов для ремонта»	114
6.1.7. Действия при отклонении нормируемых показателей качества теплоносителя.	115
6.1.8. Требования к качеству подпиточной воды, воды вспомогательных систем и растворов борной кислоты систем безопасности реакторной установки	118
6.1.9. Основные требования к организации химического контроля	120
6.2. Водно-химический режим второго контура ВВЭР-1200	122
6.2.1. Общие положения	122
6.2.2. Нормы качества рабочей среды второго контура парогенератора	124
6.2.3. Методы обеспечения и поддержания водно-химического режима	128
6.2.4. Химический контроль качества сред второго контура	130
6.3. Проблемы новых водно-химических режимов АЭС с ВВЭР	132
РАЗДЕЛ III. РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ АЭС	135
<i>Глава 7. Парогенераторы ПГВ-1000 МКП</i>	<i>135</i>
7.1. Устройство парогенератора ПГВ-1000 МКП	135
7.2. Коллекторы парогенератора	141
7.3. Теплообменные трубки	143
7.4. Внутриконтурные устройства	147
7.5. Уровнемеры	154
7.6. Контроль парогенератора	157
<i>Глава 8. Парогенератор ПГВ-1000 МКП на энергоблоке</i>	<i>158</i>
8.1. Связи парогенератора с системами энергоблока	158
8.2. Система основной питательной воды.	160
8.3. Система вспомогательной питательной воды	165
8.4. Система аварийной питательной воды.	168
8.5. Система свежего пара	172
8.6. Система подпитки второго контура	177
8.7. Система продувки парогенератора	180
8.8. Система пассивного отвода тепла через парогенераторы	184
8.9. Система аварийного газоудаления	188
<i>Глава 9. Расчет парогенератора</i>	<i>191</i>
9.1. Тепловой расчет	191
9.2. Поверочные тепловые расчеты	194
9.3. Гидравлический расчет	195

9.4. Конструктивные прочностные расчеты	196
9.5. Расчет сепарационных устройств и водного режима	197
<i>Глава 10. Вопросы эксплуатации парогенераторов</i>	198
10.1. О надежности и экономичности	198
10.2. О блочной обессоливающей установке	199
10.3. Химические промывки парогенераторов АЭС с ВВЭР	201
10.4. Дезактивация парогенераторов АЭС с ВВЭР	208
10.5. Консервация парогенераторов АЭС с ВВЭР	210
ПРИЛОЖЕНИЕ	211
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	225

Учебное издание

Сорокин Владимир Владимирович

ПАРОГЕНЕРАТОРЫ АЭС

Учебное пособие

Редактор *Л.Н. Макейчик*

Художественный редактор *Т.В. Шабунько*

Технический редактор *Н.А. Лебедевич*

Компьютерная верстка *Н.В. Шабуня*

Корректор *Т.В. Кульнис*

Подписано в печать 17.11.2020. Формат 70×100/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 19,5. Уч.-изд. л. 18,15. Тираж 300 экз. Заказ 4090.

Республиканское унитарное предприятие «Издательство “Вышэйшая школа”».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/3 от 08.07.2013.

Пр. Победителей, 11, 220004, Минск.

e-mail: market@vshph.com <http://vshph.com>

Открытое акционерное общество «Типография “Победа”».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 2/38 от 29.01.2014.

Ул. Тавлая, 11, 222310, Молодечно.