

УДК 539.3

Ю. В. РОМАШОВ, канд. техн. наук, доцент

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт",  
г. Харьков

## ВНЕШНИЕ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИЕ ФАКТОРЫ И РЕСУРС ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПАРОГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТАНОВОК ТЕПЛОВЫХ И АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

*Путем обработки и последующего анализа литературных данных о конструкциях, рабочих параметрах и показателях надежности элементов современных и перспективных конструкций парогенерирующих установок тепловых и атомных электростанций изучены влияющие на ресурс эксплуатации внешние воздействующие факторы, применяемые конструкционные материалы и эффекты, вызываемые внешними воздействующими факторами в конструкционных материалах. Установлено, что в энергетических паровых котлах проблема ресурса эксплуатации является особенно актуальной для поверхностей нагрева, особенно для пароперегревателей; в ядерных реакторах – для оболочек твэлов, конструкций ТВС, некоторых внутрикорпусных устройств, теплообменных трубах парогенераторов, а в термоядерных реакторах – для корпусов вакуумных камер и первой стенки blankets. Основными внешними воздействующими факторами являются внутреннее давление рабочей среды, высокие температуры, реакторные излучения, содержание коррозионно-активных компонентов в рабочих средах, активирующие процессы радиационного распухания, тепловой и радиационной ползучести, коррозионного поражения и деградации свойств материалов.*

*Шляхом обробки і подальшого аналізу літературних даних про конструкції, робочі параметри і показники надійності елементів сучасних і перспективних конструкцій парогенеруючих установок теплових та атомних електростанцій вивчено зовнішні фактори, що впливають на ресурс експлуатації, застосовувані конструкційні матеріали та ефекти, що викликані зовнішніми факторами впливу в конструкційних матеріалах. Встановлено, що в енергетичних парових котлах проблема ресурсу експлуатації є особливо актуальною для поверхонь нагріву, і особливо для пароперегрівачів; в ядерних реакторах - для оболонок твєлів, конструкцій ТВС, деяких внутрішньокорпусних пристроїв, теплообмінних трубах парогенераторів, а в термоядерних реакторах - для корпусів вакуумних камер і першої стінки blankets. Основними зовнішніми впливовими факторами є внутрішній тиск робочого середовища, високі температури, реакторні випромінювання, зміст корозійно-активних компонентів в робочих середовищах, що активують процеси радіаційного розпухання, теплової та радіаційної повзучості, корозійні ураження та деградацію властивостей матеріалів.*

### Введение

Парогенерирующие установки тепловых и атомных электростанций (ТЭС и АЭС) предназначены для получения водяного пара за счет энергии, выделяемой в процессе сжигания топлива или ядерной реакции, для последующего использования в качестве рабочего тела в паротурбинных установках, приводящих в движение электрические генераторы [1]. При непрерывном поддержании баланса между производством и потреблением электроэнергии непредвиденное нарушение работы парогенерирующих установок большой производительности на ТЭС и АЭС приводит к значительному экономическому ущербу, из-за недоотпуска электроэнергии [2]; эксплуатация парогенерирующих установок АЭС связана еще и с риском значительного воздействия на население и окружающую среду [3]. Парогенерирующие установки характеризуются наихудшими показателями надежности по сравнению с другим оборудованием электростанции – турбиной, генератором, конденсатором, поэтому надежность в настоящее

время является основной характеристикой парогенерирующих установок ТЭС и АЭС [2]; ресурс является одной из составляющей комплексного свойства надежности [2].

Эксплуатация парогенерирующих установок ТЭС и АЭС требует прогнозирования ресурса элементов их конструкций для назначения периодичности ремонтов и резерва мощности в энергосистеме. Ресурс эксплуатации элементов конструкций парогенерирующих установок определяется внешними по отношению к элементам конструкций процессами или средами, вызывающими с течением времени нарушение нормальной эксплуатации – внешними воздействующими факторами. Каждому типу установок присущи свои сочетания и интенсивности внешних воздействующих факторов, приводящих к достижению элементами конструкций предельного состояния, что, естественно, необходимо учитывать при определении ресурса эксплуатации элементов их конструкций.

В процессе развития парогенерирующих установок ТЭС и АЭС изменяются их конструкции, рабочие параметры, а также внешние воздействующие факторы. Целью данной работы является изучение внешних воздействующих факторов, их интенсивностей и их влияния на ресурс эксплуатации элементов конструкций как современных, так и перспективных парогенерирующих установок ТЭС и АЭС. Методом исследования является обработка и анализ приведенных в литературе данных о конструкциях, рабочих параметрах и показателях надежности элементов конструкций установок.

### Основная часть

**Паровые котлы ТЭС.** Для производства пара на ТЭС используют паровые котлы – тепловые энергоустановки, вырабатывающие пар за счет химической энергии сжигаемого топлива [1, 2, 4–8]. Хотя доля производимой на ТЭС электроэнергии в мировой энергетике в последнее время несколько снизилась из-за ввода в эксплуатацию значительного числа АЭС, паровые котлы до сих пор остаются, по сути, основным типом энергоустановок для производства электроэнергии. Эксплуатация паровых котлов ТЭС не связана с такими значительными рисками, как эксплуатация ядерных реакторов АЭС [3]; считается, что ТЭС более приспособлены для покрытия переменной части графика нагрузки [1]. Рассмотрим далее внешние воздействующие факторы основных элементов конструкций паровых котлов.

В современных энергетических паровых котлах металл каркаса огражден от горячих топочных газов и имеет температуру не более 60...100°C [4, 5]. Внешними воздействующими факторами каркаса являются механические нагрузки от веса удерживаемых конструкций и температура, сводящаяся к дополнительным температурным напряжениям [4, 5]. Невысокие температуры и относительно неагрессивная рабочая среда позволяют использовать для изготовления каркаса сталь Ст3 [6, 7]. Отказы на каркасах паровых котлах крайне редки [2], что позволяет считать достаточно совершенными существующие конструкции каркасов и методы расчетного обоснования их параметров. Проблема ресурса каркаса сегодня не является особенно актуальной; актуальным остается уменьшение металлоемкости и трудоемкости монтажа каркаса, при сохранении достигнутой в современных конструкциях долговечности.

Топка и газоходы современных энергетических паровых котлов ограждены плотными экранами теплообменных труб. Температура обмуровки, не превышающая 500...600°C [4, 5], является основным внешним воздействующим фактором; механические нагрузки сводятся лишь к напряжениям от собственного веса. В конструкциях обмуровки применяют огнеупорные материалы: шамот, теплоизоляционные бетоны, красный кирпич и т. п. [4, 5]. Отказы на паровых котлах из-за повреждений обмуровки случаются нечасто и составляют около 0,3 % [2], поэтому современные конструкции обмуровки паровых котлов и методы расчета ее параметров можно признать достаточно совершенными. Проблема ресурса обмуровки энергетических котлов большой производительности не является особенно актуальной в настоящее время; актуальной остается проблема уменьшения веса и трудоемкости монтажа обмуровки, при сохранении достигнутого в современных конструкциях ресурса.

Давление  $\sim 1...4000$  кПа и температура  $\sim 200...420^\circ\text{C}$  поступающих в горелки современных энергетических котлов рабочих сред, практически не ограничивают ресурс горелок; существенным фактором является скорость движения топливно-воздушных смесей с мелкими частицами угольной пыли или жидкого топлива, определяющая интенсивность износа рабочих поверхностей [4–6]. Условия эксплуатации горелок позволяют использовать для их изготовления сталь Ст3 и только для отдельных частей амбразуры стали 13X25H2010T или 20X23H18 [6]. Отказы на паровых котлах из-за котельно-вспомогательного оборудования, оборудования топливоподачи, газопроводов и прочих элементов котла составляют  $\sim 8,1$  % [2]. Проблема ресурса горелок сегодня не является особенно актуальной; актуальной проблемой является эффективность сжигания топлива [4–6], которая может существенно влиять на ресурс эксплуатации других элементов парового котла [8].

Основной частью парового котла, непосредственно участвующей в преобразованиях теплоты сжигаемого топлива, являются поверхности нагрева. В настоящее время основным типом паровых котлов на тепловых электростанциях является экранный паровой котел [4–8]. Поверхности нагрева современных энергетических паровых котлов работают в наиболее тяжелых условиях и, поэтому, большая часть отказов на паровых котлах связана именно с поверхностями нагрева, что иллюстрируется представленной рис. 1(а) круговой диаграммой, построенной на основе данных работы [2]. Отказы на паровых котлах связаны с повреждениями как высокотемпературных, так и низкотемпературных поверхностей нагрева, что иллюстрируется представленной рис. 1(б) круговой диаграммой, которая построена по приведенным в работе [2] данным.

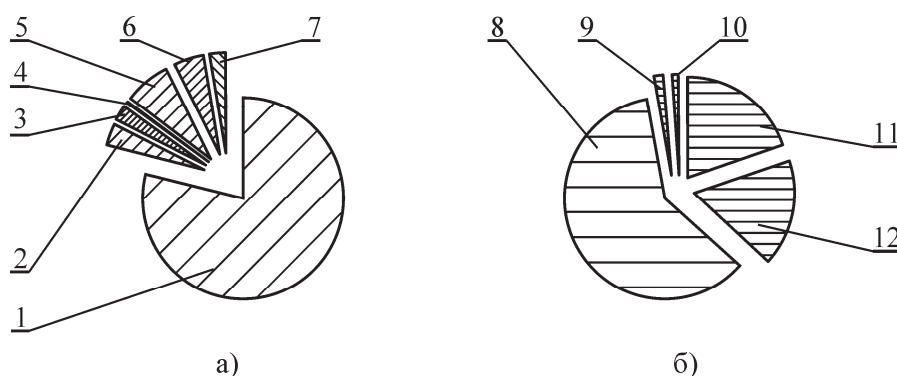


Рис. 1. Осредненные данные о распределении отказов основного оборудования (а) и поверхностей нагрева (б) современных энергетических паровых котлов:

- 1 – поверхности нагрева (79,3 %); 2 – котельно-вспомогательное оборудование (3,5 %); 3 – топливоподача (2,5 %); 4 – обмуровка (0,3 %); 5 – автоматика (7,4 %); 6 – арматура (4,9%); 7 – прочие элементы (2,6 %); 8 – пароперегреватели (60,4 %); 9 – необогреваемые трубы (1,6 %); 10 – прочие элементы (1,2 %); 11 – экономайзеры (19,8 %); 12 – парообразующие поверхности нагрева (17 %);

В современных энергетических паровых котлах наибольшее распространение получили гладкотрубные экономайзеры, выполненные из качественной углеродистой стали 20 [4, 5]. Давление подаваемой в экономайзер питательной воды составляет  $\sim 1...20$  МПа, а температура  $\sim 140...240^\circ\text{C}$  [8], что с учетом температуры  $\sim 600^\circ\text{C}$  [8] поступающих дымовых газов существенно не ограничивает ресурс экономайзеров. Время непрерывной эксплуатации экономайзеров ограничивается отложением продуктов сгорания, а ресурс – коррозионными повреждениями труб [5]. Как свидетельствуют представленные на рис. 2(а) данные работы [2] об отказах на котлах электростанций с поперечными связями, с увеличением температуры вырабатываемого пара частота отказов котлов из-за экономайзеров уменьшается; давление пара неоднозначно влияет на частоту отказов.

Эффективность использования сжигаемого топлива достигается в первую очередь повышением температуры и давления вырабатываемого пара [6], поэтому проблема ресурса экономайзеров, не особенно актуальная сегодня, в перспективе также будет не особенно, а, возможно, еще и менее актуальной.

Парообразующие поверхности нагрева современных энергетических паровых котлов по существу представляют собой трубы, работающие под внутренним давлением при высокой температуре в коррозионно-агрессивной среде топочных газов [4–8]. Основными внешними воздействующими факторами парообразующих поверхностей являются внутренне давление рабочей среды, температура стенок труб, химический состав образующихся при сжигании топлива топочных газов. В зависимости от интенсивности внешних воздействующих факторов для изготовления парообразующих поверхностей нагрева применяют различные конструкционные стали: при температуре стенки, не превышающей ~ 450...500°C, применяют сталь 20; при температурах ~ 500...550°C – стали 12Х1МФ, 15ХМФ [4–6]; сжигаемое топливо также влияет на выбор материала: сталь 12Х1МФ можно применять при температуре стенки 585°C при сжигании природного газа и различных углей, но при сжигании сернистого мазута температура стенки труб из стали 12Х1МФ ограничивается 540°C [5]. Представленные на рис. 2(б) данные работы [2] об отказах на котлах электростанций с поперечными связями, показывают, что с увеличением температуры и давления вырабатываемого пара частота отказов котлов из-за поверхностей нагрева паровых котлов снижается. Это обстоятельство является следствием уменьшения с повышением температуры перегрева доли теплоты, воспринимаемой парообразующими экранными поверхностями нагрева. В перспективе с переходом на еще более высокие параметры пара ожидается, что частота нарушений нормальной эксплуатации паровых котлов из-за парообразующих поверхностей нагрева будет меньше, чем для современных конструкций паровых котлов. Однако, подобный прогноз справедлив при условии, что состав сжигаемого топлива в дальнейшем не претерпит существенных изменений; при ухудшении качества сжигаемого топлива могут значительно ухудшиться условия эксплуатации экранных труб, что приведет к частым их повреждениям, как это в свое время наблюдалось на прямоточных котлах ПК-41 при сжигании высокосернистого мазута [8].

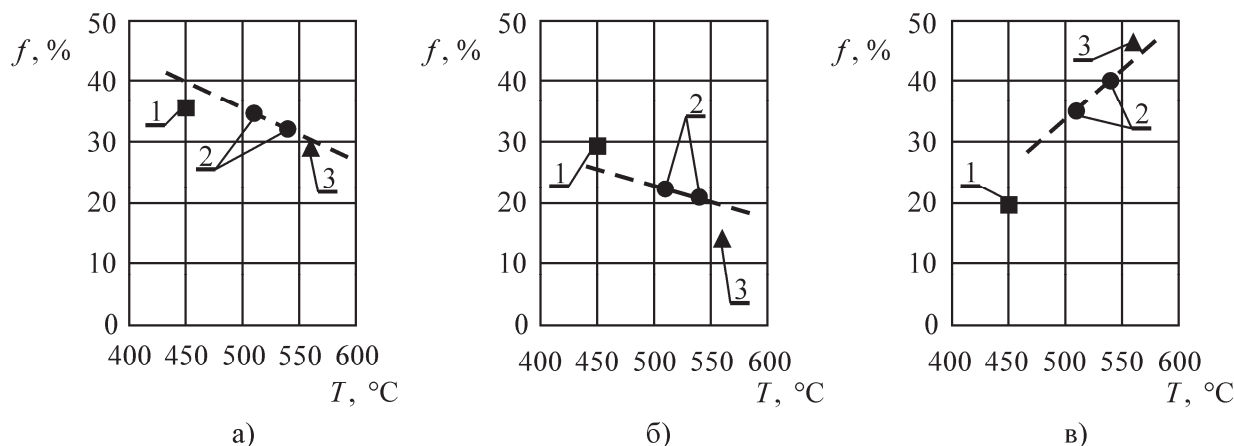


Рис. 2. Зависимость от температуры и давления вырабатываемого пара относительной частоты отказов паровых котлов электростанций с поперечными связями по причинам, связанным с экономайзером (а), парообразующими поверхностями нагрева (б) и пароперегревателем (в); 1 – давление пара 4 МПа; 2 – давление пара 10 МПа; 3 – давление пара 13 МПа

Металл теплообменных труб пароперегревателя современных паровых котлов находятся в наиболее тяжелых условиях эксплуатации; основными внешними воздействующими факторами являются внутреннее давление, температура и агрессивные



среды, вызывающие сплошную коррозию поверхностей теплообменных труб [4–8]. Внутренне давление в трубах первичного пароперегревателя может достигать 25,5 МПа [6]. Температура металла элементов конструкций пароперегревателя зависит от температуры вырабатываемого пара и оказывается самой высокой по сравнению с другими поверхностями нагрева и в котлах на сверхвысокие параметры пара может превосходить 600°C [4–6]. Некоторые компоненты, образующиеся при сжигании топлива, особенно высокосернистого мазута, вызывают коррозионные поражения теплообменных труб, интенсивность которых увеличивается с повышением температуры [8]. Разные трубы пароперегревателя могут изготавливаться разных размеров из разных материалов в зависимости от условий эксплуатации; часто применяют стали 20, 16МХ, 12ХМФ, 12МХ, 15ХМ, а при температурах выше 600°C – нержавеющие стали 1Х18Н9Т, Х18Н12Т, 11Х18Н12Т [4–8]. Несмотря на применение дорогостоящих конструкционных материалов, повреждения пароперегревателей являются причиной нарушения нормальной эксплуатации паровых котлов приблизительно в 48 % случаев (см. рис. 1). С увеличением температуры и давления вырабатываемого пара частота нарушений нормальной эксплуатации котлов из-за пароперегревателей увеличивается, что представлено на рис. 2(в), который построен на основе данных работы [2] об отказах на котлах электростанций с поперечными связями. Такая зависимость является следствием того, что с повышением параметров пара, доля теплоты, воспринимаемой пароперегревателем, значительно увеличивается. Таким образом, проблема ресурса эксплуатации пароперегревателей паровых котлов в настоящее время имеет особую актуальность и в перспективе может стать еще более актуальной, с учетом предполагаемого при совершенствовании паровых котлов повышения параметров вырабатываемого пара для повышения эффективности использования теплоты сжигаемого топлива.

**Реакторные установки АЭС.** Для производства пара на АЭС используют реакторные установки – ядерные энергоустановки, вырабатывающие пар за счет тепловой энергии, выделяемой в процессе ядерной реакции [1, 9]. Несмотря на значительные риски, связанные с эксплуатацией АЭС [3], число блоков АЭС и доля вырабатываемой на них электроэнергии растет. Так, например, в Украине в 2010 г. 47 %, электроэнергии производилось на АЭС [9], хотя в 1994 г. доля произведенной на АЭС электроэнергии составляла всего 32,9 % [10]. Рассмотрим далее внешние воздействующие факторы элементов конструкций основных частей современных и перспективных конструкций ядерных реакторов.

В абсолютном большинстве современных реакторных установок АЭС ядерная цепная реакция деления осуществляется преимущественно за счет тепловых нейтронов, а в качестве теплоносителя используется легкая вода под давлением; по состоянию на 1992 г. доля таких установок составляла 82 % [9]. Условия эксплуатации материала оболочек твэлов характеризуются разнообразием внешних воздействующих факторов, основными из которых являются внутреннее давление продуктов ядерной реакции, наружное давление теплоносителя, высокая температура, агрессивные среды, вызывающие коррозию на внутренней и наружной поверхности, эрозионный износ соприкасающейся с потоком теплоносителя наружной поверхности, различные виды реакторного излучения, порождающиеся ядерной реакцией [11]. В настоящее время для изготовления твэлов часто применяют различные сплавы на основе циркония; при температуре теплоносителя до 400°C оболочки твэлов изготавливают из циркониевого сплава Э-110, как, например, на реакторных установках типа ВВЭР-1000 [11–13], эксплуатирующихся на украинских АЭС. Основными внешними воздействующими факторами для элементов конструкций тепловыделяющих сборок (ТВС), а также устройств, фиксирующих ТВС и обеспечивающих циркуляцию теплоносителя, являются коррозионное воздействие со стороны теплоносителя, механические нагрузки от сил веса, гидродинамических сил от потока теплоносителя, перепадов давления, а также температурное и радиационное воздействия. Для изготовления ТВС применяют преимущественно нержавеющие стали и различные сплавы на основе циркония [11, 12]. Так, для изготовления элементов конструкций ТВС реакторов типа ВВЭР-1000 применяются нержавеющие стали 12Х18Н10Т (08Х18Н10Т, 06Х18Н10Т), а также

циркониевые сплавы Э-110 и Э-125 [12]; для изготовления внутрикорпусных устройств – нержавеющей сталь 08X18H10T [13]. В корпусных реакторах, в частности, в эксплуатирующихся на АЭС Украины реакторах типа ВВЭР-440 и ВВЭР-1000, ответственным элементом конструкции является корпус реактора, который обеспечивает фиксацию активной зоны и циркуляцию через нее теплоносителя под давлением. Корпуса реакторов, эксплуатирующиеся под внутренним давлением теплоносителя, выполняют, как и обычные сосуды давления из цилиндрических обечаек и концевых деталей – днища, фланца и крышки. Основными внешними воздействующими факторами корпуса реактора является внутренне давление теплоносителя, перепады температур и потоки теплоносителя, вызывающие механические напряжения, а также реакторные излучения, приводящие помимо механических напряжений еще и к изменению свойств материала корпуса в процессе его длительной эксплуатации. В реакторах с водой под давлением, циркулирующей в герметичной системе первого контура, можно обеспечить высокую химическую чистоту теплоносителя и свести к минимуму коррозионное воздействие теплоносителя на материал корпуса реактора. В кипящих корпусных и канальных реакторах к перечисленным внешним воздействующим факторам следует добавить коррозию металла корпуса реактора в пароводяной смеси, образующейся при кипении поступающей в активную зону реактора питательной воды [9]. Для изготовления днищ, крышки и обечаек корпусов PWR типа ВВЭР-1000 применяют сталь марки 15X2НМФА; отдельные детали выполняют из сталей марок 08X18H10T, 20, 22К; крепежные детали и шпильки главного разъема выполняют из стали марки 38ХНЗМФА, а прокладки главного разъема – из никеля НП2 [13]. В канальном реакторе типа РБМК активная зона представлена большим числом технологических каналов, имеющих относительно небольшие размеры и выполняющих часть функций корпуса: фиксацию ТВС, направление циркуляции теплоносителя и парообразование. Технологический канал реактора РБМК представляет собой трубу, центральная часть которой выполнена из циркониевого сплава Э-125, а привариваемые к ней концевые части – из стали 08X18H10T [14]. Важным элементом двухконтурных реакторных установок АЭС является парогенератор; нарушение герметичности теплообменных труб парогенератора приводит радиоактивному загрязнению окружающей среды и полной потере работоспособности ядерной энергоустановки [1, 2, 4, 15, 16]. Внешними воздействующими факторами парогенераторов современных ядерных энергоустановок являются давление теплоносителя первого контура и концентрация коррозионно-активных компонентов на поверхностях, соприкасающихся с питательной водой и паром. Особенная актуальность проблемы ресурса эксплуатации твэлов, элементов конструкций ТВС и корпусов кипящих реакторов, элементов конструкций парогенераторов обусловлена тесной связью с проблемой безопасности ядерных энергоустановок и наличием нескольких взаимовлияющих внешних воздействующих факторов, что существенно затрудняет адекватную оценку ресурса и заставляет постоянно совершенствовать существующие и разрабатывать новые методы расчета.

Перспективы развития атомной энергетики в настоящее время связывают с реакторами на быстрых нейтронах, что обусловлено возможностью расширенного воспроизводства ядерного топлива в процессе эксплуатации таких реакторов [9, 11, 17]. Реакторы на быстрых нейтронах в настоящее время находятся на стадии опытно-промышленной эксплуатации; по состоянию на 1992 г. в мире эксплуатировалось 5 блоков АЭС с такими реакторами [9]. Характерными чертами освоенных в настоящее время парогенерирующих установок с реакторами на быстрых нейтронах является использование жидкометаллического теплоносителя – натрия и трехконтурная схема [11, 17]. Теплофизические свойства натрия не требуют повышенного давления теплоносителя, которое обычно не превышает величины в 0,8...1,0 МПа [17]; освоенной для реакторов считается температура натриевого теплоносителя ~ 550°C [17]. Основными внешними воздействующими факторами для оболочек твэлов являются внутреннее давление распухающего ядерного топлива и газообразных продуктов деления, взаимодействие с деталями ТВС, реакторные излучения,

температурное и коррозионное воздействие со стороны жидкометаллического натриевого теплоносителя, загрязненного примесями [17]. Оболочки твэлов изготавливают из стали 0X16H15M3Б, или из сплавов на основе никеля [17]. Детали ТВС не взаимодействуют с ядерным топливом и продуктами его деления, удерживаемым внутри оболочек твэлов, но в остальном внешние воздействующие факторы материалов деталей ТВС аналогичны имеющим место для оболочек твэлов, хотя и характеризуются меньшими интенсивностями; для изготовления чехловых труб ТВС применяют стали марок 0X18H10T, X10H11M3 [17]. Внешние воздействующие факторы корпусных конструкций и основного оборудования представлены менее существенными нагрузками от сил веса элементов конструкций, давлением теплоносителя, перепадом температур, а также относительно малым нейтронным потоком и более существенными – высокой температурой и коррозионным воздействием со стороны натриевого теплоносителя [17]. Для изготовления корпусов и основного оборудования реакторов на быстрых нейтронах применяют хорошо освоенные в теплоэнергетике хромоникелевые нержавеющие стали аустенитного класса обладающие высокой коррозионной стойкостью против высокотемпературного жидкометаллического натриевого теплоносителя, при условии, что он не загрязнен примесями [17]. Вызываемые внешними воздействующими факторами механические напряжения основных элементов конструкций реакторов на быстрых нейтронах, пренебрежимо малы с точки зрения статической прочности, однако присущие таким реакторам радиоактивные излучения вызывают процессы накопления необратимых деформаций и существенного изменения свойств конструкционных материалов со скоростями, которые значительно увеличивается даже малыми механическими напряжениями [17]. Ресурс ответственных элементов конструкций реакторов на быстрых нейтронах ограничивается вызываемыми внешними воздействующими факторами процессами радиационного распухания, радиационной ползучести и деградации свойств материалов, поэтому в настоящее время соответствующие проблемы остаются актуальными при определении ресурса элементов конструкций ядерных реакторов на быстрых нейтронах [17].

Потенциальные возможности радикального снижения радиационной безопасности при производстве энергии на основе ядерных технологий связывают с использованием реакций управляемого термоядерного синтеза [18, 19]. Хотя возможность реализации управляемого термоядерного синтеза показана достаточно давно, в настоящее время термоядерные энергетические реакторы все еще остаются на стадии концептуальных проработок. К настоящему времени предложены несколько концепций реализации реакций управляемого термоядерного синтеза для получения электроэнергии. Уже достаточно длительное время считается, что наиболее перспективной для термоядерных энергетических реакторов является т.н. система токамак, в которой реализуется магнитное удержание высокотемпературной плазмы в замкнутом объеме, имеющем форму тора [18]. Основным фактором, сдерживающим создание промышленного термоядерного энергетического реактора, является необходимость разработки принципиально новой, не имеющей аналогов в современной энергетике, техники, которая требует массового производства, а именно – вакуумной, криогенной, лазерной, ускорительной высокочастотной и др. [18, 19]. По-видимому, из-за этого обстоятельства в последнее время получили развитие более поздние, относящиеся к 1970-м годам, идеи о реализации управляемого термоядерного синтеза с инерционным удержанием и использованием ускорителей интенсивных пучков тяжелых ионов, которые могут быть получены с использованием известных освоенных технологий, разработанных для научных исследований в области физики высоких энергий [19]. Основными элементами термоядерного энергетического реактора являются вакуумная камера, в которой осуществляется реакция термоядерного синтеза и blanket, который передает выделяющуюся энергию теплоносителю. В настоящее время трудно предвидеть все внешние воздействующие факторы элементов конструкций термоядерных реакторов, но можно воспользоваться экстраполяцией, рассматривая термоядерные реакторы как этап раз-

вития ядерных энергоустановок, следующий после освоения реакторов деления на тепловых и быстрых нейтронах. В реакторах на тепловых нейтронах из-за высокого давления теплоносителя значительными оказываются механические напряжения, которые вместе с реакторными излучениями вызывают разрушение материала элементов конструкций. В реакторах на быстрых нейтронах невысокое давление теплоносителя вызывает незначительные механические напряжения, но более высокие интенсивности реакторных излучений вызывают постепенное разрушение материала элементов конструкций даже при таких незначительных механических напряжениях. В термоядерных реакторах реакция осуществляется в вакуумной камере, и механические напряжения могут быть вызваны только перепадом температуры в элементах конструкций, но интенсивность реакторных излучений в таких реакторах будет намного большей, чем в реакторах деления. Можно предполагать, что в термоядерных энергетических реакторах основными внешними воздействующими факторами являются высокие температуры, способствующие коррозии взаимодействующей с плазмой первой стенки blankets, а также реакторные излучения высокой интенсивности, способствующие разрушению конструкционных материалов даже при невысоких механических напряжениях. Проблема ресурса элементов конструкций существенно задерживает внедрение управляемого термоядерного синтеза в промышленную энергетику [18, 19].

**Эффекты, вызываемые в материалах элементов конструкций парогенерирующих установок ТЭС и АЭС.** В процессе эксплуатации внешние воздействующие факторы вызывают разнообразные процессы в материалах элементов конструкций парогенерирующих установок ТЭС и АЭС, приводящие с течением времени к достижению предельного состояния, которым ограничивается ресурс эксплуатации. Рассмотрим далее эффекты, вызываемые внешними воздействующими факторами в материале элементов конструкций.

Разрушение материала и недопустимые по условиям жесткости перемещения в точках элементов конструкций могут вызываться механическими напряжениями от эксплуатационных силовых и тепловых нагрузок; форму и размеры элементов конструкций выбирают так, чтобы уменьшить механические напряжения [4–7, 14–17].

Объемное распухание, тепловая и радиационная ползучесть активируются высокими температурами и реакторными излучениями и сопровождаются накоплением повреждений в конструкционных материалах элементов конструкций, которые приводят с течением времени к их разрушению, [4–7, 14–17]. Скорость тепловой и радиационной ползучести существенно зависит от механических напряжений, так что с увеличением температуры и интенсивности реакторных излучений приходится существенно ограничивать допускаемые напряжения для материалов элементов конструкций, что наглядно иллюстрируется на примере реакторов деления на быстрых нейтронах [17].

Коррозионные повреждения конструкционных материалов элементов конструкций парогенерирующих установок ТЭС и АЭС вызываются воздействием агрессивных рабочих сред; скорость накопления коррозионных повреждений может зависеть от механических напряжений, температуры, интенсивности реакторных излучений [4–7, 14–17].

Деградация свойств конструкционных материалов элементов конструкций парогенерирующих установок ТЭС и АЭС может вызываться агрессивными рабочими средами и реакторными излучениями; скорость деградации может зависеть от температуры и механических напряжений [4–7, 14–17].

Существующее несоответствие между фактическим и расчетным ресурсом эксплуатации элементов конструкций парогенерирующих установок ТЭС и АЭС объясняется тем обстоятельством, что интенсивности внешних воздействующих факторов отвечают предельным возможностям конструкционных материалов, так что малые отклонения интенсивностей внешних воздействующих факторов в процессе эксплуатации могут приводить к значительному увеличению или уменьшению фактического ресурса эксплуатации. Ввиду того, что интенсивности внешних воздействующих факторов в процессе промышленной эксплуатации неизбежно отличаются от идеализированных номи-



номинальных значений, принятых на этапе проектирования [17], ресурс эксплуатации элементов конструкций парогенерирующих установок ТЭС и АЭС объективно является случайной величиной.

### **Выводы и перспективы дальнейших исследований**

Путем обработки и последующего анализа литературных данных о конструкциях, рабочих параметрах и показателях надежности элементов современных и перспективных конструкций парогенерирующих установок ТЭС и АЭС изучены влияющие на ресурс эксплуатации внешние воздействующие факторы, применяемые конструкционные материалы, а также эффекты, вызываемые внешними воздействующими факторами в конструкционных материалах.

В современных паровых котлах ТЭС проблема ресурса эксплуатации является наиболее важной и актуальной для поверхностей нагрева, особенно для пароперегревателей. Основными внешними воздействующими факторами являются внутреннее давление рабочей среды, высокая температура, содержание коррозионно-активных компонентов в рабочих средах, которые вызывают высокие механические напряжения и приводят к активации процессов тепловой ползучести и коррозионного поражения. Проблема ресурса соответствующих элементов конструкций паровых котлов остается актуальной в настоящее время.

В современных реакторных установках АЭС проблема ресурса эксплуатации является особенно актуальной для оболочек ТВЭЛов, конструкций ТВС, некоторых внутрикорпусных устройств, теплообменных труб парогенераторов. Основными внешними воздействующими факторами являются внутреннее давление рабочей среды, реакторные излучения, содержание коррозионно-активных компонентов в рабочих средах, приводящие к высоким механическим напряжениям, активирующие процессы радиационного распухания, радиационной ползучести, вызывающие коррозионные поражения и деградацию свойств материала. В перспективных конструкциях ядерных реакторов деления на быстрых нейтронах при невысоких механических напряжениях из-за малого давления теплоносителя приходится учитывать влияние на материалы более интенсивных реакторных излучений, более высокой температуры и повышающуюся в процессе эксплуатации из-за загрязнения при подсосах воды и воздуха агрессивность жидкометаллического натриевого теплоносителя. Проблема ресурса соответствующих элементов конструкций современных ядерных реакторов на тепловых нейтронах и перспективных ядерных реакторах на быстрых нейтронах остается актуальной в настоящее время. В реакторных установках на основе реакций управляемого термоядерного синтеза особенно актуальны проблемы ресурса эксплуатации для корпусов вакуумных камер и первой стенки blankets. По-видимому, основными ограничивающими ресурс эксплуатации элементов конструкций термоядерных реакторов внешними воздействующими факторами будут высокие температуры и особенно интенсивные реакторные излучения, вызывающие за относительно короткое время значительные коррозионные поражения и деградацию свойств конструкционных материалов.

Теоретическое значение полученных результатов состоит в выделении наиболее актуальных проблем, связанных с определением ресурса эксплуатации элементов конструкций парогенерирующих установок ТЭС и АЭС.

Практическое значение полученных результатов состоит в том, что на их основе в дальнейшем можно сформулировать конкретные задачи, направленные на решение наиболее актуальных проблем, связанных с определением ресурса эксплуатации элементов конструкций парогенерирующих установок ТЭС и АЭС.

В дальнейших исследованиях предполагается рассмотреть определение ресурса эксплуатации основных элементов конструкций парогенерирующих установок ТЭС и АЭС с учетом присущих им внешних воздействующих факторов и их взаимовлияния.

## Список литературы

1. Стерман Л. С. Тепловые и атомные электростанции : [учеб. для вузов] / Л. С. Стерман, С. А. Тевлин, А. Т. Шарков; под ред. Л. С. Стермана. – [ 2-е изд., испр. и доп.] – М. : Энергоиздат, 1982. – 456 с.
2. Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС и АЭС: [учеб. пособие для теплоэнергетических и энергомашиностроительных вузов] / [Г. П. Гладышев, Р. З. Аминов, В. З. Гуревич и др.]; под ред. А. И. Андрющенко. – М. :Высш. шк., 1991. – 303 с.
3. Барбашев С. В. Радиационное воздействие аварии на АЭС "Фукусима-1" на окружающую среду и население и основанная на ее последствиях оценка радиационных рисков от запроектных аварий на АЭС с ВВЭР-1000 / С. В. Барбашев, В. И. Скалозубов // Ядерна та радіаційна безпека. – 2012. – № 1(53). – С. 10–15.
4. Ковалев А. П. Парогенераторы: [учебник для вузов] / Ковалев А. П., Лебедев Н. С., Виленский Т. В.; под общ. ред. А. П. Ковалева. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 376 с.
5. Стырикович М. А. Котельные агрегаты / М. А. Стырикович, К. Я. Катковская, Е. П. Серов. – М.-Л. : Госэнергоиздат, 1959. – 488 с.
6. Зах Р. Г. Котельные установки / Зах Р. Г. – М. : Энергия, 1968. – 352 с.
7. Липов Ю. М. Котельные установки и парогенераторы / Ю. М. Липов, Ю. М.Третьяков. – Москва-Ижевск : НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2003. – 592 с.
8. Антикайн П. А. Коррозия металла парогенераторов / Антикайн П. А. – М. : Энергия, 1977. – 112 с.
9. Гурин В. Н. Атомные электростанции в странах мира / Гурин В. Н. // Ядерная энциклопедия / автор проекта, руководитель и главный редактор А. А. Ярошинская. – М. : Благотворительный фонд Ярошинской, 1996. – С. 193–198.
10. Thomas S. The economics of nuclear power: an update / Thomas S. – Berlin : Heinrich-Böll-Stiftung, 2010. – 76 p.
11. Конструирование ядерных реакторов : [учеб. пособие для вузов] / И. Я. Емельянов, В. И. Михан, В. И. Солонин; под общ. ред. Н. А. Доллежалы. – М. : Энергоатомиздат, 1982. – 400 с.
12. Активные зоны ВВЭР для атомных электростанций / [Шмелев В. Д., Драгунов Ю. Г., Денисов В. П., Васильченко И. Н.]. – М. : ИКЦ "Академкнига", 2004. – 220 с.
13. Реакторы ВВЭР-1000 для атомных электростанций / [В. К. Резепов, В. П. Денисов, Н. А. Кирилук и др.]. – М.: ИКЦ "Академкнига", 2004. – 333 с.
14. Доллежалы Н. А. Канальный ядерный энергетический реактор / Н. А. Доллежалы, И. Я. Емельянов. – М. : Атомиздат, 1980. – 208 с.
15. Рассохин Н. Г. Парогенераторные установки атомных электростанций : [учебник для вузов] / Рассохин Н. Г. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 384 с.
16. Парогенераторы реакторных установок ВВЭР для атомных электростанций / [Б. И. Лукасевич, Н. Б. Трунов, Ю. Г. Драгунов, С. Е. Давиденко]. – М. : ИКЦ "Академкнига", 2004. – 391 с.
17. Усынин Г. Б. Реакторы на быстрых нейтронах : [учебн. пособие для вузов] / Г. Б. Усынин, Е. В. Кусмарцев; под ред. Ф. М. Митенкова. – М. : Энергоатомиздат, 1985.– 288 с.
18. Белокопытов В. М. Термоядерные энергетические реакторы и станции. Физико-технические проблемы установок с магнитным удержанием плазмы : [учебн. пособие] / В. М. Белокопытов, Н. Н. Семашко, П. Д. Хромов; под ред. В. М. Белокопытова. – М. : Изд-во МЭИ, 1996.– 123 с.
19. Ядерный синтез с инерционным удержанием. Современное состояние и перспективы для энергетики / [М. М. Баско, С. Ю. Гуськов, А. Н Диденко и др.] ; под ред. Б. Ю. Шаркова. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005.– 264 с.

**EXTERNAL INFLUENCING FACTORS AND SERVICE LIFE OF  
STRUCTURAL ELEMENTS OF STEAM PLANTS OF  
HEAT AND NUCLEAR POWER PLANTS**

Yu. V. ROMASHOV, Candidate of Engineering, Associate Professor

*The paper studies external factors influencing the service life, construction materials used and effects caused by external influencing factors in construction materials by processing and subsequent analysis of literature data on structures, working parameters and reliability indices of the elements of modern and next-generation structures of steam plants of heat and nuclear power plants. It was determined that the problem of service life in energy-generating steam boilers is particularly topical for heating surfaces, especially for steam superheaters, and in nuclear reactors - for fuel elements claddings, cooling water systems structures, some internals, steam plant heat-transfer tubes, and in nuclear fusion reactors - for the bodies of vacuum chambers and first wall of the blanket. The main influencing factors are internal power pressure, high temperatures, reactor radiations, presence of highly corrosive components in working mediums, activating processes of irradiation-induced swelling, heat and irradiation creep, corrosion damage and degradation of properties of materials.*

Поступила в редакцию 19.06 2013 г.