ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 70425— 2022

ВНУТРИРЕАКТОРНЫЕ УСТРОЙСТВА РЕАКТОРА С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ НАТРИЕВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Расчет на прочность на стадии эксплуатации

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2023

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Федеральным государственным унитарным предприятием «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» им. И.В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей»)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 322 «Атомная техника»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 декабря 2022 г. № 1654-ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

5 Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии не несет ответственности за патентную чистоту настоящего стандарта. Патентообладатель может заявить о своих правах и направить в Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии аргументированное предложение о внесении в настоящий стандарт поправки для указания информации о наличии в стандарте объектов патентного права и патентообладателе

*Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© Оформление. ФГБУ «Институт стандартизации», 2023

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Термины и определения 1
4 Обозначения и сокращения 2
5 Общие положения 2
6 Условия обоснования прочности при анализе реализации критических событий при нормальной эксплуатации и нарушении нормальной эксплуатации 3
7 Обоснование прочности при анализе реализации критических событий при внешних динамических воздействиях 5
8 Расчетный дефект 5
9 Анализ реализации критического события «Зарождение трещины при циклическом нагружении по механизму усталости» 6
10 Анализ реализации критического события «Зарождение трещины при циклическом нагружении в условиях взаимодействия ползучести и усталости» 6
11 Анализ реализации критического события «Формирование зоны предельного охрупчивания» 6
12 Расчет подроста расчетного дефекта 7
13 Анализ реализации критических событий «Нестабильное развитие трещины», «Потеря несущей способности» и «Потеря герметичности» 11
14 Анализ реализации критического события «Недопустимое изменение геометрических размеров» 12
15 Анализ реализации критического события «Исчерпание деформационной способности материала» 12

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВНУТРИРЕАКТОРНЫЕ УСТРОЙСТВА РЕАКТОРА С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ НАТРИЕВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Расчет на прочность на стадии эксплуатации

Pressure vessel internals of fast reactor with liquid metal sodium coolant.
Strength analysis at the operation stage

Дата введения — 2023—02—01

1 Область применения

1.1 Настоящий стандарт устанавливает требования к расчету на прочность внутриреакторных устройств реактора с жидкометаллическим натриевым теплоносителем, изготовленных из материалов аустенитного класса с учетом изменения их свойств под действием эксплуатационных факторов.

1.2 Настоящий стандарт применяется на стадии эксплуатации (включая продлеваемый срок эксплуатации) внутриреакторных устройств реактора с жидкометаллическим натриевым теплоносителем.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ Р 59115.1 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Термины и определения

ГОСТ Р 59115.11 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Поверочный расчет на постпроектных стадиях

ГОСТ Р 70424—2022 Устройства внутриреакторные реактора с жидкометаллическим натриевым теплоносителем. Расчет на прочность на стадии проектирования

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ГОСТ Р 59115.1, ГОСТ Р 70424, а также следующий термин с соответствующим определением:

3.1 **критическое событие «Формирование зоны предельного охрупчивания»:** Состояние компонента, когда в нем формируется зона с максимальным линейным размером 2 мм, в которой радиационное распухание материала в процессе эксплуатации достигает или превышает критическое значение, соответствующее предельному охрупчиванию материала.

Издание официальное

4 Обозначения и сокращения

В настоящем стандарте применены обозначения по ГОСТ Р 70424, а также следующие сокращения:
АЭУ — атомная энергетическая установка;
ВДВ — внешние динамические воздействия;
ДХН-покрытие — диффузионно-хромированное нитридное покрытие;
ЗПО — зона предельного охрупчивания;
КИН — коэффициент интенсивности напряжений;
МВФ — метод весовых функций;
МКЭ — метод конечных элементов;
МРЗ — максимальное расчетное землетрясение;
ННУЭ — нарушение нормальных условий эксплуатации;
НУЭ — нормальные условия эксплуатации;
ПЗ — проектное землетрясение;
РУ — реакторная установка.

5 Общие положения

5.1 Прочность внутриреакторного устройства должна оцениваться на основании анализа предельных состояний компонентов, входящих в состав этого устройства.

5.2 При оценке прочности компонента принимается, что зарождение в нем дефекта может происходить по механизмам усталости и ползучести, а также за счет формирования зоны предельного охрупчивания материала.

5.3 При оценке прочности компонента принимается, что рост дефекта в нем может происходить по механизмам усталости и термоактивированной ползучести с учетом влияния облучения.

5.4 При оценке допустимости изменения размеров[1)] компонента принимается, что изменение его размеров может происходить за счет пластического деформирования, радиационного распухания, термоактивированной и радиационной ползучести материала.

5.5 Принимается, что достижение предельных состояний компонента (см. таблицу 5.1) осуществляется при реализации следующих критических событий:

а) зарождение трещины при циклическом нагружении по механизму усталости;

б) зарождение трещины при циклическом нагружении в условиях взаимодействия ползучести и усталости;

в) формирование ЗПО;

г) нестабильное развитие трещины;

д) потеря несущей способности;

е) потеря герметичности;

ж) недопустимое изменение геометрических размеров;

и) исчерпание деформационной способности материала.

Таблица 5.1 — Предельные состояния компонента и приводящие к ним критические события

Предельное состояние	Критическое событие
Возникновение макротрещины вследствие циклического нагружения (при наличии ползучести или без нее)	См. 5.5, перечисления а) — в)
Нестабильное развитие трещины	См. 5.5, перечисление г)
Возникновение недопустимой пластической деформации по всей площади какого-либо из возможных сечений либо только по части площади сечения, но по всей толщине стенки компонента	См. 5.5, перечисление д)
Потеря герметичности	См. 5.5, перечисление е)
Недопустимое изменение геометрических размеров	См. 5.5, перечисление ж)
Накопление предельно допустимой пластической деформации	См. 5.5, перечисление и)

[1)] Здесь и далее по тексту, в случае если речь идет о размерах, понимаются номинальные размеры.

5.6 При оценке прочности компонента необходимо учитывать все расчетные нагрузки и воздействия, в том числе:

- механические нагрузки (вес компонента, вес присоединенного оборудования и трубопроводов);
- внутреннее или наружное давление;
- нагрузки от внешних динамических воздействий, включая сейсмические воздействия и динамические воздействия техногенного происхождения;
- температурные воздействия;
- вибрационные нагрузки.

5.7 Оценка прочности компонента по предельным состояниям 5.5 должна проводиться наряду с расчетами на статическую прочность, устойчивость, внешние динамические воздействия и вибропрочность.

5.7.1 Расчет компонента на статическую прочность следует проводить в соответствии с ГОСТ Р 59115.11 при действии всех расчетных нагрузок, кроме динамических, для исключения предельных состояний: «кратковременное разрушение» и «возникновение недопустимой пластической деформации по всей площади какого-либо из возможных сечений либо только по части площади сечения, но по всей толщине стенки компонента».

На основании расчета в упругой постановке определяются группы категорий напряжений. Оценка прочности компонента выполняется путем сопоставления групп категорий напряжений с допускаемыми напряжениями.

5.7.2 Расчет на устойчивость следует проводить для компонентов, находящихся под действием наружного давления, или при воздействии на компонент сжимающей нагрузки. Расчет проводится в соответствии с ГОСТ Р 59115.11 для исключения предельного состояния «потеря устойчивости (при наличии ползучести или без нее)».

Расчетом должно быть установлено, что значения нагружающих факторов на компонент в условиях ползучести и без учета ползучести не достигнут значений, вызывающих потерю устойчивости.

5.7.3 Расчет компонента на ВДВ (включая МРЗ, ПЗ, воздушную ударную волну, падение летательного аппарата) следует проводить в соответствии с ГОСТ Р 59115.11 для исключения предельных состояний: «кратковременное разрушение», «возникновение макротрещины вследствие циклического нагружения», «возникновение недопустимой пластической деформации по всей площади какого-либо из возможных сечений либо только по части площади сечения, но по всей толщине стенки компонента» и «потеря устойчивости».

5.7.4 Расчет на вибропрочность следует проводить для компонентов, подвергающихся вибрационному нагружению, в соответствии с ГОСТ Р 59115.11 для исключения предельного состояния «возникновение макротрещины вследствие циклического нагружения».

5.8 Анализ реализации критических событий согласно перечислениям а) — и) 5.5 следует проводить по процедурам разделов 9—15.

5.9 Оценка прочности компонента должна быть проведена с учетом установленной последовательности режимов нагружения, основанной на анализе условий эксплуатации, регламентированных проектом АЭУ, с учетом всех расчетных нагрузок и воздействий, а также всех режимов эксплуатации. В один расчетный режим может быть включена группа режимов, в случае если внешние нагрузки и температуры этих режимов не отличаются более чем на 5 % от принятых расчетных значений.

6 Условия обоснования прочности при анализе реализации критических событий при нормальной эксплуатации и нарушении нормальной эксплуатации

6.1 Обоснование прочности компонента при НУЭ и ННУЭ следует проводить с учетом всех реализованных режимов нагружения и прогнозируемой модели эксплуатации РУ, в том числе при продлении срока службы.

В случае если прочность компонента была обоснована в соответствии с ГОСТ Р 70424, рассматриваемый срок эксплуатации не превышает проектного срока службы и реализованные режимы нагружения соответствуют проектной модели эксплуатации РУ, то прочность компонента считается обоснованной при НУЭ и ННУЭ.

6.2 Обоснование прочности компонента следует проводить как для основного металла, так и для сварных швов этого компонента. Для всех сварных швов однотипных сварных соединений допускается проводить анализ прочности только для самого нагруженного шва.

6.3 В основном металле компонента должен быть проведен анализ зарождения трещины при реализации критических событий согласно перечислениям а) и б) 5.5, а также анализ ее возможного стабильного подроста согласно 6.3.1 — 6.3.5.

6.3.1 Анализ реализации критических событий согласно перечислениям а) и б) 5.5 следует проводить в соответствии с разделами 9 и 10.

6.3.2 В случае если прочность компонента была обоснована в соответствии с ГОСТ Р 70424 и реализованные режимы нагружения соответствуют проектной модели эксплуатации компонента, то допускается принимать, что критические события согласно перечислениям а) и б) 5.5 не реализуются до момента окончания проектного срока службы компонента.

6.3.3 В случае если прочность компонента не обоснована в соответствии с ГОСТ Р 70424 или реализованные режимы нагружения отличаются от проектной модели эксплуатации компонента, то анализ зарождения трещины должен проводиться для всего рассматриваемого периода его эксплуатации.

6.3.4 В случае если в результате анализа зарождения трещины установлено, что реализуется одно из критических событий согласно перечислениям а) и б) 5.5, то должен быть определен момент зарождения трещины $t_{нис}$, соответствующий более раннему из моментов реализации критических событий согласно перечислениям а) и б) 5.5. В этот момент времени в основном металле компонента следует постулировать расчетный дефект, вид, размеры и ориентация которого должны определяться согласно 8.1 и 8.4 с учетом 12.1.5.1.

6.3.5 В случае если по 6.3.4 постулируют дефект, то должен быть проведен анализ его возможного подроста в соответствии с разделом 12 за время от момента времени $t_{нис}$ до момента окончания рассматриваемого периода эксплуатации компонента или до момента нестабильного развития дефекта (до момента реализации критического события согласно перечислению г) 5.5).

6.4 В сварных швах компонента, основном металле с ДХН-покрытием, а также в зонах компонента, не нагруженного избыточным давлением, которые в условиях эксплуатации подвергаются многоцикловому термическому нагружению, должен быть проведен анализ возможного стабильного подроста постулируемых дефектов согласно 6.4.1 и 6.4.2.

6.4.1 На момент начала эксплуатации в самых нагруженных сварных швах, основном металле с ДХН-покрытием, а также в зонах компонента, не нагруженного избыточным давлением, которые в условиях эксплуатации подвергаются многоцикловому термическому нагружению, постулируют расчетный дефект, вид, размеры и ориентация которого должны определяться согласно 8.1 и 8.2.

6.4.2 Для каждого постулированного по 6.4.1 дефекта должен быть проведен анализ его возможного стабильного подроста в соответствии с разделом 12 за время от начала эксплуатации до момента окончания рассматриваемого периода эксплуатации или до момента нестабильного развития дефекта (до момента реализации критического события согласно перечислению г) 5.5).

6.5 В компоненте (как в основном металле, так и в сварных швах) должен быть проведен анализ образования дефекта в ЗПО при реализации критического события согласно перечислению в) 5.5.

В случае формирования ЗПО следует выполнить анализ возможного нестабильного развития постулируемого дефекта в соответствии с разделом 11. Вид, размеры и ориентация постулируемого дефекта определяют согласно 8.3.

6.6 В случае если в основном металле компонента критические события согласно перечислениям а) — в) 5.5 не реализуются за весь рассматриваемый период эксплуатации, то в момент окончания рассматриваемого периода эксплуатации в компоненте должен постулироваться расчетный дефект, вид, размеры и ориентация которого определяют согласно 8.1 и 8.4.

6.7 Прочность компонента считается обоснованной при НУЭ и ННУЭ, в случае если для него за весь рассматриваемый период эксплуатации не реализуются критические события согласно перечислениям г) — е) 5.5:

- при наличии дефекта, постулируемого по 6.3.4, с учетом его возможного стабильного подроста;
- для каждого дефекта, постулированного по 6.4.1, с учетом его возможного стабильного подроста;
- при наличии дефекта, постулируемого по 6.5, с учетом его возможного нестабильного развития;
- при наличии дефекта, постулируемого по 6.6.

Анализ реализации критических событий согласно перечислениям г) — е) 5.5 проводят в соответствии с разделом 13.

6.8 Для обоснования прочности компонента в течение всего рассматриваемого периода эксплуатации должно выполняться условие не реализации критического события согласно перечислению ж) 5.5 (выполняется условие недостижения предельных изменений размеров согласно разделу 14).

7 Обоснование прочности при анализе реализации критических событий при внешних динамических воздействиях

7.1 Обоснование прочности при ВДВ выполняют в соответствии с ГОСТ Р 59115.11.

7.2 Допускается выполнять обоснование прочности при ВДВ в соответствии с разделами 13 и 15. В этом случае прочность компонента при ВДВ считается обоснованной, если для него не реализуются критические события согласно перечислениям г) — е) и и) 5.5.

Анализ реализации критических событий согласно перечислениям г) — е) 5.5 проводят в соответствии с разделом 13, критического события согласно перечислению и) 5.5 — в соответствии с разделом 15.

При анализе реализации критических событий согласно перечислениям г) — е) 5.5 для компонента с расчетным дефектом, постулированным по 6.3.5, 6.4.1 или 6.4.2, учитывают возможный стабильный подрост этого дефекта по механизмам усталости и ползучести при НУЭ и ННУЭ за время от момента постулирования дефекта до момента наступления анализируемого ВДВ.

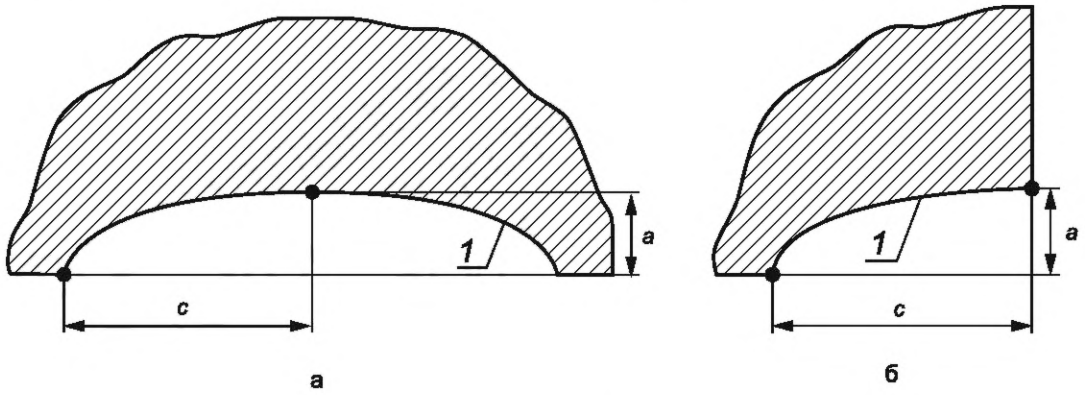
При анализе реализации критического события согласно перечислению и) 5.5 принимают, что расчетный дефект в рассматриваемом компоненте отсутствует.

8 Расчетный дефект

8.1 В зависимости от геометрии компонента должны быть спостулированы следующие виды расчетного дефекта:

- поверхностная полуэллиптическая трещина (рисунок 8.1а);
- поверхностная четвертьэллиптическая трещина (рисунок 8.1б).

Расчетный дефект характеризуется длиной большой полуоси (c) и длиной малой полуоси (a), а также отношением начальной длины большой полуоси c_0 к начальной длине малой полуоси a_0, равным 3.



1 — фронт трещины; а — поверхностная полуэллиптическая трещина; б — поверхностная угловая четвертьэллиптическая трещина

Рисунок 8.1 — Виды расчетного дефекта в компоненте

8.2 В неконтролируемом сварном шве и основном металле с ДХН-покрытием начальное значение малой полуоси a_0 расчетного дефекта определяют по формуле

$$a_0 = l_0, \tag{8.1}$$

где l_0 — максимальная глубина дефекта технологического происхождения в сварном шве или глубина дефекта для основного металла с ДХН-покрытием.

Значение l_0 для сварного шва принимают согласно таблице 8.1. Значение l_0 для основного металла с ДХН-покрытием принимают равным 2 мм.

Значение a_0 в компоненте, не нагруженном избыточным давлением, который в условиях эксплуатации подвергается многоцикловому термическому нагружению, принимают равным 2 мм.

Таблица 8.1 — Значение l_0 для сварного шва

Толщина свариваемых компонентов, мм	l_0, мм, для сварного шва
Менее 4	1
От 4 до 10 включ.	2
Св. 10 до 20 включ.	3
Св. 20 до 30 включ.	4
Св. 30	5

Конечные размеры расчетного дефекта следует определять с учетом его возможного стабильного роста по механизмам усталости и ползучести в соответствии с разделом 12.

8.3 При формировании ЗПО в ней постулируют расчетный дефект в зависимости от формы ЗПО в виде плоской дисковой [в случае, если граница ЗПО расположена внутри компонента (внутренняя трещина)], полудисковой или четвертьдисковой трещины [в случае, если граница ЗПО совпадает с поверхностью компонента (поверхностная трещина)].

Расчетный дефект с начальным радиусом a_0, равным 2,5 мм, ориентируют перпендикулярно поверхности компонента.

Конечные размеры расчетного дефекта определяют с учетом его нестабильного развития в ЗПО в соответствии с разделом 11.

8.4 Согласно 6.3.4 и 6.6 в основном металле или сварном шве компонента постулируют расчетный дефект в соответствии с 8.1, в котором значение малой полуоси a_0 расчетного дефекта следует принимать в зависимости от толщины H_t компонента или свариваемых компонентов равным:

- 1 мм при 2 мм ≤ H_t ≤ 4 мм;
- 0,25 H_t при 4 мм < H_t ≤ 8 мм;
- 2 мм при H_t более 8 мм.

Конечные размеры расчетного дефекта следует определять с учетом его стабильного подроста по механизмам усталости и термоактивированной ползучести в соответствии с разделом 12.

8.5 Расчетный дефект располагают перпендикулярно поверхности компонента и ориентируют таким образом, чтобы отношение J/J_c (K_I/K_{JC}) было наибольшим.

9 Анализ реализации критического события «Зарождение трещины при циклическом нагружении по механизму усталости»

Анализ реализации критического события «Зарождение трещины при циклическом нагружении по механизму усталости» следует проводить в соответствии с ГОСТ Р 70424—2022 (раздел 8).

10 Анализ реализации критического события «Зарождение трещины при циклическом нагружении в условиях взаимодействия ползучести и усталости»

Анализ реализации критического события «Зарождение трещины при циклическом нагружении в условиях взаимодействия ползучести и усталости» следует проводить в соответствии с ГОСТ Р 70424—2022 (раздел 9).

11 Анализ реализации критического события «Формирование зоны предельного охрупчивания»

11.1 Анализ реализации критического события «Формирование зоны предельного охрупчивания материала» выполняют путем оценки величины радиационного распухания материала компонента в соответствии с ГОСТ Р 70424—2022 (приложение Е) посредством расчета в упруго-вязкопластической постановке.

При проведении анализа допускается:

- проводить расчет только для режима НУЭ;

- принимать, что в компоненте нет расчетных дефектов;

- не проводить расчет для компонентов, для которых величина свободного радиационного распухания, рассчитанного согласно ГОСТ Р 70424—2022 (приложение Е), меньше, чем $S_{крит}$. При расчете свободного радиационного распухания используют наибольшие за рассматриваемый период эксплуатации повреждающую дозу и температуру нейтронного облучения в компоненте при НУЭ.

11.2 Рассматриваемый период эксплуатации разбивают на временные интервалы Δt_j, так что $t_{j+1} = t_j + \Delta t_j$; $j = 1 \div L$, где L — количество временных интервалов Δt_j.

Для повышения точности и уменьшения консервативности расчетов необходимо увеличивать количество временных интервалов L.

11.3 На каждом временном интервале Δt_j значения характеристик механических свойств рассчитывают в соответствии с ГОСТ Р 70424—2022 (приложение А) для повреждающей дозы нейтронного облучения F_{j+1}, которая соответствует моменту времени t_{j+1} (моменту окончания временного интервала Δt_j).

11.4 Для каждого временного интервала Δt_j выполняют расчет в упруго-вязкопластической постановке с учетом остаточных сварочных напряжений (при наличии таковых), радиационного распухания, радиационной ползучести и истории нагружения на временном интервале от 0 до t_j. Расчет проводят в геометрически нелинейной постановке. Определяющие уравнения для расчета в упруго-вязкопластической постановке приведены в ГОСТ Р 70424—2022 (приложение В); учет ползучести и радиационного распухания проводят в соответствии с ГОСТ Р 70424—2022 (приложения Д и Е).

11.5 Расчет в упруго-вязкопластической постановке проводят с учетом пошагового прослеживания истории нагружения компонента. Размер шага при расчете назначают таким, чтобы нагружение на этом шаге соответствовало простому нагружению.

11.6 ЗПО определяют как область материала, для каждой точки которой выполняется условие

$$S \geq S_{крит}, \tag{11.1}$$

где S — радиационное распухание материала с учетом напряжений;

$S_{крит}$ — критическое радиационное распухание материала, приводящее к образованию ЗПО.

Величину радиационного распухания S рассчитывают в соответствии с ГОСТ Р 70424—2022 (приложение Е).

Значение $S_{крит}$ для сталей марок 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9 и 08Х16Н11М3, а также металла их сварных швов принимают равным 0,05.

11.7 Критическое событие согласно перечислению в) 5.5 за рассматриваемый период эксплуатации не реализуется, в случае если максимальный линейный размер ЗПО не превышает 2 мм.

11.8 Конечные размеры ЗПО определяют последовательным проведением анализа согласно 11.3—11.7 в течение всего рассматриваемого периода эксплуатации.

11.9 В ЗПО с размерами на конец рассматриваемого периода эксплуатации постулируют расчетный дефект, вид, начальные размеры и ориентацию которого определяют согласно 8.3.

11.10 Анализ развития расчетного дефекта в ЗПО следует проводить с учетом его нестабильного развития согласно 13.4. При этом ориентировать расчетный дефект в ЗПО следует таким образом, чтобы его подрост при нестабильном развитии был наибольшим.

11.11 На момент окончания рассматриваемого периода эксплуатации в соответствии с разделом 13 должен быть выполнен анализ прочности компонента с дефектом размером, полученным при расчете его нестабильного развития в ЗПО.

12 Расчет подроста расчетного дефекта

12.1 Общие положения при расчете подроста расчетных дефектов

12.1.1 Для расчетного дефекта, постулируемого согласно 6.6, расчет подроста не проводят. При анализе критических событий согласно перечислениям г) — е) 5.5 длины малой и большой полуосей расчетного дефекта a и c следует принимать равными a_0 и c_0 соответственно.

12.1.2 Для поверхностного расчетного дефекта, постулируемого согласно 6.3.4, расчет подроста следует выполнять по механизмам усталости и ползучести. При этом расчет подроста расчетного дефекта проводят:

- по механизму ползучести, в случае если температура T компонента превышает T_t;
- по механизму усталости, в случае если значение $\Delta K \geq K_{th}$.

12.1.3 Для поверхностного расчетного дефекта, который постулируют согласно 6.3.4, расчет подроста начинают с момента времени $t_{нис}$, соответствующего более раннему из моментов реализации критических событий согласно перечислениям а) и б) 5.5, и завершают по окончании рассматриваемого периода эксплуатации компонента.

12.2 Расчет подроста расчетного дефекта по механизму ползучести

12.2.1 Весь рассматриваемый период эксплуатации следует разбить на временные интервалы Δt_j, так что $t_{j+1} = t_j + \Delta t_j$; $j = 1 \div L$, где L — количество временных интервалов Δt_j.

12.2.2 На каждом временном интервале Δt_j значения характеристик механических свойств материалов следует рассчитывать в соответствии с ГОСТ Р 70424—2022 (приложение А) для повреждающей дозы нейтронного облучения F_{j+1}, которая соответствует моменту времени t_{j+1} (моменту окончания временного интервала Δt_j).

12.2.3 Для каждого временного интервала Δt_j должен быть выполнен расчет в вязкоупругой (для малонагруженных компонентов, работающих при напряжениях, не превышающих предел текучести) или упруго-вязкопластической постановке (для компонентов, работающих при напряжениях, превышающих предел текучести) с учетом остаточных сварочных напряжений (при наличии таковых), радиационного распухания, ползучести и истории нагружения на временном интервале от 0 до t_j.

Расчет следует проводить с учетом пошагового прослеживания истории нагружения компонента. Размер шага при расчете следует назначать таким, чтобы нагружение на этом шаге было близко к простому нагружению. Определяющие уравнения для расчета в упруго-вязкопластической постановке приведены в ГОСТ Р 70424—2022 (приложение В); учет ползучести и радиационных распухания проводят в соответствии с ГОСТ Р 70424—2022 (приложения Д и Е).

При проведении расчета НДС компонента допускается не учитывать влияние радиационного распухания и радиационной ползучести в случае, если величина свободного радиационного распухания, рассчитанного согласно ГОСТ Р 70424—2022 (приложение Е), на момент окончания рассматриваемого периода эксплуатации составляет менее 0,1 %. При расчете свободного радиационного распухания используют наибольшие за рассматриваемый период эксплуатации повреждающую дозу и температуру нейтронного облучения в компоненте при НУЭ.

12.2.4 По результатам расчета следует построить график зависимости референсного напряжения во времени $\sigma_{ref}(t)$.

12.2.5 Период нагружения Δt_j следует разбить на временные интервалы Δt_i много меньше Δt_j. При этом исключают временные интервалы, при которых температура T зоны с трещиной меньше T_t.

12.2.6 На каждом временном интервале Δt_i значения σ_{ref} принимают постоянными и равными своему максимальному значению на интервале.

12.2.7 Для каждого временного интервала Δt_i должны быть рассчитаны значения КИН K^i_a и K^i_c в точках a и c расчетного дефекта. Эти значения должны быть приняты постоянными и равными своим значениям в момент времени t, при котором σ_{ref} достигает максимального значения на интервале Δt_i. Значения K^i_a и K^i_c следует рассчитывать на основании распределения нормальных к расчетному дефекту напряжений σ_n, определяемых в результате расчета в упруго-вязкопластической постановке, и размеров расчетного дефекта на предыдущем временном интервале (a_{i-1} и c_{i-1}). Значения K^i_a и K^i_c следует рассчитывать МВФ (допускается использовать другие методы), входной информацией для которого является НДС, полученное в результате расчета в упруго-вязкопластической постановке.

В случае если в компоненте рассматривается зона с остаточными сварочными напряжениями $\sigma_{осн}$, то для такой зоны при расчете КИН вместо σ_n используется величина $\sigma_n + \sigma_{осн}$, где $\sigma_{осн}$ определяется по формуле

$$\sigma_{осн} = \left[\left(\sigma^0_{0,2} \right)^{1-n_c} - E^T \cdot \frac{a_c}{\left(\sigma_0 \right)^{n_c}} \cdot t_j \cdot \left(1 - n_c \right) \right]^{\frac{1}{1-n_c}}, \qquad (12.1)$$

где $\sigma_{0,2}$ — предел текучести материала в исходном (необлученном) состоянии;

E^T — модуль упругости;

a_c, n_c, σ_0 — параметры уравнения установившейся ползучести, принимаемые в соответствии с ГОСТ Р 70424—2022 (приложение Д).

12.2.8 Подрост расчетного дефекта на временном интервале Δt_i следует определять с использованием зависимостей согласно ГОСТ Р 70424 (приложение Ж) по формулам:

$$\Delta a_i = \omega_1 \cdot \omega_2 \cdot A_r \left(C_a^*\right)^{n_r} \cdot \Delta t_i \text{, мм;} \quad (12.2)$$

$$\Delta c_i = \omega_1 \cdot \omega_2 \cdot A_r \left(C_c^*\right)^{n_r} \cdot \Delta t_i \text{, мм,} \quad (12.3)$$

где Δa_i и Δc_i — подросты расчетного дефекта по механизму ползучести в направлениях малой и большой полуосей за время Δt_i;

A_r, n_r — константы;

ω_1, ω_2 — коэффициенты, увеличивающие скорость роста трещины при ползучести за счет облучения;

C^*_a, C^*_c — C^*-интеграл в точках a и c расчетного дефекта (рисунок 8.1), вычисляемый по формулам:

$$C_a^* = \begin{cases} 10^{-3} \cdot \left(K_a^i\right)^2 \cdot \dfrac{\xi_{ref}^i}{\sigma_{ref}^i}, \text{ если } T_{\max}^i \geq T_t \\ 0, \text{ если } T_{\max}^i < T_t \end{cases}, \quad (12.4)$$

$$C_c^* = \begin{cases} 10^{-3} \cdot \left(K_c^i\right)^2 \cdot \dfrac{\xi_{ref}^i}{\sigma_{ref}^i}, \text{ если } T_{\max}^i \geq T_t \\ 0, \text{ если } T_{\max}^i < T_t \end{cases}, \quad (12.5)$$

где ξ^i_{ref} — интенсивность скорости деформации ползучести необлученного материала при $\sigma_{ref} = \sigma^i_{ref}$ и температуре, равной максимальной $T^i_{\max}$ на временном интервале Δt_i в зоне с дефектом;

K^i_a, K^i_c — КИН в точках a и c трещины в момент времени, при котором σ_{ref} достигает максимального значения на интервале Δt_i соответственно.

Расчет σ_{ref} проводят в соответствии с ГОСТ Р 70424—2022 (приложение И) с учетом размеров расчетного дефекта.

Значения A_r и n_r приведены в ГОСТ Р 70424—2022 (таблица Ж.1, приложение Ж).

12.2.9 В случае если на временном интервале Δt_i рассчитанное значение K^i_a оказалось меньше 0, то следует принимать K^i_a равным 0. В случае если на временном интервале Δt_i рассчитанное значение K^i_c оказалось меньше 0, то следует принимать K^i_c равным 0.

12.2.10 Текущие размеры расчетного дефекта должны быть определены по формулам:

$$a_i = a_{i-1} + \Delta a_i; \quad (12.6)$$

$$c_i = c_{i-1} + \Delta c_i. \quad (12.7)$$

12.2.11 Конечные размеры a_τ и c_τ трещины следует определять последовательным повторением расчета согласно 10.2.6—10.2.10 до момента времени, соответствующего окончанию назначенного срока службы.

12.3 Расчет подроста расчетного дефекта по механизму усталости

12.3.1 Для анализа развития трещины при циклическом нагружении следует определить размахи КИН на основании расчета в упругой постановке. При этом в случае если расчет выполняется для компонента, в котором максимальная температура T превышает T_t, то расчет проводят с использованием начальных деформаций, полученных на этапе расчета в упруго-вязкопластической постановке при расчете роста трещины по механизму ползучести.

Допускается проводить анализ развития трещины без учета начальных деформаций, полученных на этапе расчета в упруго-вязкопластической постановке. В этом случае скорость роста трещины при циклическом нагружении следует рассчитывать при коэффициенте асимметрии цикла, равном 0,95.

12.3.2 В качестве начальных размеров расчетного дефекта должны быть использованы длины малой и большой полуосей расчетного дефекта a_τ и c_τ, полученные согласно 12.2.10, в случае если проводился анализ развития трещины по механизму ползучести. В случае если расчет проводят для компонента, в которых максимальная температура T не превышает T_t, то в качестве начальных размеров дефекта следует принимать его начальные длины малой и большой полуосей a_0 и c_0.

12.3.3 По результатам расчета НДС в упругой постановке должны быть определены циклы нагружения, таким образом, чтобы в начале и в конце каждого *i*-го цикла нагружения значения КИН были приблизительно одинаковыми. В случае если невозможно выделить цикл нагружения, то в качестве характеристик цикла нагружения (ΔK и R) следует принимать характеристики полуцикла. При этом число циклов следует принимать равным числу полуциклов.

При проведении расчета НДС компонента допускается не учитывать влияние радиационного распухания, в случае если величина свободного радиационного распухания на момент окончания назначенного срока службы не превышает 0,1 %. При расчете свободного радиационного распухания следует использовать наибольшие за назначенный срок службы повреждающую дозу и температуру нейтронного облучения в компоненте при НУЭ.

12.3.4 Для каждого *k*-го цикла (полуцикла) нагружения в точках *a* и *c* расчетного дефекта (см. рисунок 8.1) должны быть определены величины размахов КИН первого рода ΔK_a^k и ΔK_c^k, а также коэффициенты асимметрии цикла напряжений R_a^k и R_c^k.

Величины ΔK_a^k, R_a^k и ΔK_c^k, R_c^k допускается определять непосредственно из расчета в упругой постановке МКЭ (допускается использовать другие численные методы) или с помощью МВФ, используя в качестве исходной информации распределение напряжений в плоскости дефекта, рассчитанных при его отсутствии, а также длины малой и большой полуосей расчетного дефекта на момент окончания предыдущего цикла нагружения a_{i-1} и c_{i-1}.

При проведении расчета без учета радиационного распухания коэффициенты асимметрии цикла напряжений R_a^k и R_c^k следует принимать равными 0,95.

12.3.5 В случае если для *k*-го цикла (полуцикла) нагружения рассчитанное значение R_a^k или R_c^k оказалось меньше 0, то следует принимать это значение равным 0. В случае если для *k*-го цикла нагружения рассчитанное значение R_a^k или R_c^k оказалось большим, чем 0,95, то следует принимать это значение равным 0,95.

12.3.6 Расчет подроста дефекта по механизму усталости следует проводить только для тех циклов (полуциклов) нагружения, для которых значение ΔK превышает значение ΔK_{th}, рассчитываемое в соответствии с ГОСТ Р 70424—2022 (приложение К). В случае если рассчитанное значение ΔK_a^k оказалось меньше $\Delta K_{th}(R_a^k)$, то на *k*-м цикле (полуцикле) нагружения следует считать, что подрост расчетного дефекта в направлении малой полуоси отсутствует. В случае если рассчитанное значение ΔK_c^k оказалось меньше $\Delta K_{th}(R_c^k)$, то на *k*-м цикле (полуцикле) нагружения следует считать, что подрост расчетного дефекта в направлении большой полуоси отсутствует.

12.3.7 На основании зависимостей, приведенных в ГОСТ Р 70424—2022 (приложение К), должны быть определены величины подроста расчетного дефекта по механизму усталости за *k*-й цикл (полуцикл) нагружения по формулам:

$$\Delta a_k = \begin{cases} \omega^{Sw} \cdot \omega^{\text{стар}} \cdot n_{cyc} \cdot C_f \left(\dfrac{\Delta K_a^k}{\sqrt[4]{1 - R_a^k}} \right)^{n_f}, \text{если } \Delta K_a^k \geq \Delta K_{th}\left(R_a^k, T\right); \\ 0, \text{если } \Delta K_a^k < \Delta K_{th} \end{cases} \tag{12.8}$$

$$\Delta c_k = \begin{cases} \omega^{Sw} \cdot \omega^{\text{стар}} \cdot n_{cyc} \cdot C_f \left(\dfrac{\Delta K_A^k}{\sqrt[4]{1 - R_c^k}} \right)^{n_f}, \text{если } \Delta K_c^k \geq \Delta K_{th}\left(R_c^k, T\right), \\ 0, \text{если } \Delta K_c^k < \Delta K_{th} \end{cases} \tag{12.9}$$

где Δa_k и Δc_k — подрост расчетного дефекта по механизму усталости в направлениях малой и большой полуосей за *k*-й цикл (полуцикл) нагружения, мм;

ΔK_a^k, ΔK_c^k — размахи КИН на *k*-м цикле нагружения соответственно в точках *a* и *c* трещины;

ω^{Sw}, $\omega^{\text{стар}}$ — коэффициент ускорения роста усталостной трещины вследствие радиационного распухания и температурного старения соответственно;

$n_{\text{сус}}$ — коэффициент, равный 1,0 при учете цикла и 0,5 при учете полуцикла;

C_f и n_f — коэффициенты уравнения Пэриса;

ΔK_a и ΔK_c — размах КИН первого рода в вершинах расчетного дефекта на концах его малой и большой полуосей на *k*-м цикле (полуцикле) нагружения, $\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$.

Значения ΔK_{th}, ω^{Sw}, $\omega^{стар}$, C_f и n_f следует принимать в соответствии с ГОСТ Р 70424—2022 (приложение К).

При определении значения ω^{Sw} следует использовать значение повреждающей дозы нейтронного облучения, соответствующее моменту времени окончания k-го цикла нагружения. При определении значения C_f следует использовать значение повреждающей дозы нейтронного облучения, соответствующее моменту времени окончания k-го цикла нагружения и значение температуры, соответствующее максимальной температуре в k-м цикле нагружения.

12.3.8 Текущие размеры расчетного дефекта определяют по формулам:

$$a_k = a_{k-1} + \Delta a_k, \tag{12.10}$$

$$c_k = c_{k-1} + \Delta c_k, \tag{12.11}$$

где a_k и c_k — текущие размеры дефекта на k-м цикле нагружения, мм.

12.3.9 Конечные размеры $a_{\tau N}$ и $c_{\tau N}$ (при температуре T выше T_t), или a_N и c_N (при температуре T, не превышающей T_t) трещины при циклическом нагружении следует определять последовательным повторением расчета в соответствии с 12.3.4—12.3.8 до тех пор, пока не будут учтены все циклы нагружения.

13 Анализ реализации критических событий «Нестабильное развитие трещины», «Потеря несущей способности» и «Потеря герметичности»

13.1 Анализ реализации критических событий согласно перечислениям г) — е) 5.5 следует проводить для компонента с расчетным дефектом.

13.2 Анализ реализации критического события согласно перечислению г) 5.5 проводят, в случае если температура компонента превышает T_t или повреждающая доза более 1 сна (смещения на атом).

13.3 Последовательность режимов нагружения следует определять согласно проектной модели эксплуатации РУ.

13.4 Критическое событие согласно перечислению г) 5.5 не реализуется, в случае если для всех режимов эксплуатации РУ выполнены условия:

$$n \cdot K_a(P_p,P_s) < K_{JC}, \tag{13.1}$$

$$n \cdot K_c(P_p,P_s) < K_{JC}, \tag{13.2}$$

где $K_a(P_p,P_s)$, $K_c(P_p,P_s)$ — значения КИН в точках a и c расчетного дефекта, рассчитанные согласно 12.2.7, с учетом механической (первичной) P_p и вторичной P_s нагрузок, МПа;

n — коэффициент запаса, n = 1,1;

K_{JC} — трещиностойкость, МПа·м$^{1/2}$, определяемая по формуле

$$K_{JC} = \sqrt{\frac{10^{-3} \cdot E^T J_c}{1-\nu^2}}. \tag{13.3}$$

Значения J_c рассчитывают в соответствии с ГОСТ 70424—2022 (приложение Л).

13.5 Критические событие согласно перечислению д) 5.5 (для компонентов, не работающих под избыточным давлением) не реализуются, в случае если в течение всего периода эксплуатации для всех режимов нагружения выполнено условие

$$\sigma_{ref}(a, c, P_p) \le R^T_{p0,2}. \tag{13.4}$$

13.6 Критическое событие согласно перечислению е) 5.5 (для компонентов, работающих под избыточным давлением) не реализуется, в случае если в течение всего периода эксплуатации для всех режимов нагружения выполнены следующие условия:

$$\sigma_{ref}(a, c, P_p) \le R^T_{p0,2}, \tag{13.5}$$

$$a \le \frac{2}{3} S_к. \tag{13.6}$$

Расчет σ_{ref} проводится в соответствии с ГОСТ Р 70424—2022 (приложение М) с учетом размеров (a и c) расчетного дефекта и напряжений, вызванных механической нагрузкой P_p.

Значение $R^T_{p0,2}$ принимают согласно ГОСТ Р 70424—2022 (приложение А).

13.7 В качестве размеров расчетного дефекта (a и c) следует принимать:

- для постулируемого по 6.3.4 и 6.4.1 расчетного дефекта — значения $a_{\tau N}$ и $c_{\tau N}$ (при температуре T выше T_t) или a_N и c_N (при температуре T, не превышающей T_t), определенные согласно 12.3;
- для постулируемого по 6.5 расчетного дефекта — значение a, определенное согласно разделу 11;
- для постулируемого по 6.6 расчетного дефекта — значения a_0 и c_0, принимаемые согласно 8.4.

14 Анализ реализации критического события «Недопустимое изменение геометрических размеров»

14.1 Анализ реализации критического события «Недопустимое изменение геометрических размеров» для режимов НУЭ и ННУЭ следует выполнять путем оценки изменения геометрических размеров элемента (компонента) за счет упругопластического деформирования, радиационного распухания и ползучести (термоактивированной или радиационной) посредством расчета в упругопластической (при $T \le T_t$) или упруго-вязкопластической постановке (при $T > T_t$).

14.2 Весь период эксплуатации следует разбивать на временные интервалы Δt_j, так что $t_{j+1} = t_j + \Delta t_j$; $j = 1 \div L$, где L — количество временных интервалов Δt_j.

Для повышения точности и уменьшения консервативности расчетов следует увеличивать количество временных интервалов L.

14.3 На каждом временном интервале Δt_j значения характеристик механических свойств материалов следует рассчитывать в соответствии с ГОСТ Р 70424 (приложение А) для повреждающей дозы нейтронного облучения F_{j+1}, которая соответствует моменту времени t_{j+1} (моменту окончания временного интервала Δt_j).

14.4 Для каждого временного интервала Δt_j должен быть выполнен расчет в упругопластической или упруго-вязкопластической постановке с учетом радиационного распухания, термоактивированной и радиационной ползучести, а также истории нагружения на временном интервале от 0 до t_j. Определяющие уравнения для расчета приведены в ГОСТ Р 70424—2022 (приложение В); учет ползучести и радиационных распухания следует проводить в соответствии с ГОСТ Р 70424—2022 (приложения Д и Е).

14.5 Расчет должен быть проведен МКЭ (допускается использовать другие численные методы) с учетом пошагового прослеживания истории нагружения компонента. Размер шага при расчете следует назначать таким, чтобы нагружение на этом шаге было близко к простому нагружению.

14.6 Критическое событие согласно перечислению ж) 5.5 за весь период эксплуатации не реализуется, если выполнено условие

$$\Delta H_k < [\Delta H]_k, \tag{14.1}$$

где ΔH_k — изменение геометрического размера элемента в k-м направлении, мм;

$[\Delta H]_k$ — допускаемое изменение геометрических размеров элемента в k-м направлении, мм.

15 Анализ реализации критического события «Исчерпание деформационной способности материала»

15.1 При анализе реализации критического события «Исчерпание деформационной способности материала» (критическое событие согласно перечислению и) 5.5) следует принимать, что расчетный дефект в компоненте отсутствует.

15.2 Анализ реализации критического события согласно перечню и) 5.5 не проводится, в случае если обоснована прочность при ВДВ в соответствии с ГОСТ Р 59115.11.

15.3 Расчет следует проводить посредством решения упругопластической задачи в динамической постановке.

15.4 Критическое событие согласно перечислению и) 5.5 не реализуется, в случае если выполнено условие

$$æ_p < \varepsilon_f^{\text{ОНС}}, \tag{15.1}$$

где $æ_p$ — пластическая деформация, накопленная за время ВДВ; $æ_p = \int d\varepsilon_{eq}^p$;

$\varepsilon_f^{\text{ОНС}}$ — критическая деформация в условиях динамического нагружения и объемного напряженного состояния, рассчитываемая по формуле

$$\varepsilon_f^{\text{ОНС}} = \beta \cdot \varepsilon_f, \tag{15.2}$$

где ε_f — критическая деформация материала при кратковременных испытаниях на растяжение, рассчитываемая согласно ГОСТ Р 70424—2022 (приложение А) с учетом повреждающей дозы нейтронного облучения *F* и радиационного распухания *S*;

β — коэффициент, равный 0,09.

Для сочетания нагрузок НУЭ+ВДВ и ННУЭ+ВДВ условие (15.1) представляется в виде

$$æ_p < 0{,}01, \tag{15.3}$$

где $æ_p$ — накопленная пластическая деформация за время ВДВ.

УДК 621.039.52.034.6:006.354 ОКС 27.120.10

Ключевые слова: реактор с жидкометаллическим натриевым теплоносителем, прочность, внутриреакторные устройства, эксплуатация

Редактор *Л.В. Коретникова*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *Р.А. Ментова*
Компьютерная верстка *Е.О. Асташина*

Сдано в набор 29.12.2022. Подписано в печать 13.01.2023. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 2,32. Уч.-изд. л. 2,12.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении в ФГБУ «Институт стандартизации»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru