

Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору

Утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору 21 июля 2021 г. № 258.

Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии

Требования к обоснованию прочности
корпуса блока реакторного,
оборудования, трубопроводов и
внутрикорпусных устройств ядерной
энергетической установки со свинцовым
теплоносителем. НП-108-21

Вступили в силу с 16 октября 2021 г.

© Москва, 2021

Требования к обоснованию прочности корпуса блока реакторного, оборудования, трубопроводов и внутрикорпусных устройств ядерной энергетической установки со свинцовым теплоносителем (НП-108-21)

НП-108-21 разработаны в соответствии со статьей 6 Федерального закона от 21 ноября 1995 г. № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии», в соответствии с которой федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии — нормативные правовые акты, устанавливающие требования к безопасному использованию атомной энергии, включая требования безопасности объектов использования атомной энергии, требования безопасности деятельности в области использования атомной энергии, в том числе цели, принципы и критерии безопасности, соблюдение которых обязательно при осуществлении деятельности в области использования атомной энергии.

Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии разрабатываются и утверждаются в порядке, установленном Положением о разработке и утверждении федеральных норм и правил в области использования атомной энергии», утвержденном постановлением Правительства Российской Федерации от 1 декабря 1997 г. № 1511, и Порядком разработки и утверждения федеральных норм и правил в области использования атомной энергии в Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору, утвержденном приказом Ростехнадзора от 7 июля 2015 г. № 267.

Перечень действующих федеральных норм и правил в области использования атомной энергии размещен на официальном сайте Ростехнадзора в сети «Интернет» по адресу: <https://www.gosnadzor.ru/nuclear/>.

НП-108-21 распространяются на ядерные энергетические установки со свинцовым теплоносителем и устанавливают требования к обоснованию прочности оборудования, трубопроводов, внутрикорпусных устройств, корпуса блока реакторного, а также их составных частей, находящихся в постоянном или периодическом контакте со свинцовым теплоносителем и (или) защитным газом до первой отсечной арматуры или гидрозатвора от корпуса блока реакторного, а также оборудования и трубопроводов второго пароводяного контура от парогенератора до второй со стороны парогенератора арматуры (отсечной или обратной).

Выпускаются впервые.

Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 21 июля 2021 г. № 258 «Об утверждении федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Требования к обоснованию прочности корпуса блока реакторного, оборудования, трубопроводов и внутрикорпусных устройств ядерной энергетической установки со свинцовым теплоносителем» зарегистрирован Минюстом России 05 октября 2021 г., регистрационный № 65 290, вступил в силу с 16 октября 2021 г.

Разработаны в АО «НИКИЭТ» при участии Глебовой Н. А., Головлева Ю. Н., Европина С. В., Лемехова В. В., Полоза М. В., Ташкинова А. В. (АО «НИКИЭТ»), Мирошниченко М. И. (Ростехнадзор), Рубцова В. С. (ФБУ «НТЦ ЯРБ»).

При разработке использованы замечания и предложения АО «СХК»; АО «ОКБМ Африкантов», АО «Атомпроект»; АО «Наука и инновации», АО «ИК «ЗИОМАР»; АО «КБСМ»; ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», АО «ЦКБМ», а также Ростехнадзора и ФБУ «НТЦ ЯРБ».

Содержание

I. Назначение и область применения.....	4
II. Требования к обоснованию прочности металлических элементов.....	5
Требования к номинальным допускаемым напряжениям в МЭ.....	6
Требования к расчету по выбору основных размеров МЭ.....	7
Требования к поверочному расчету МЭ.....	7
Требования к определению напряжений и деформаций в МЭ.....	8
Требования к расчету на статическую прочность МЭ.....	8
Требования к расчету на устойчивость МЭ.....	8
Требования к расчету на циклическую прочность МЭ.....	9
Требования к расчету на длительную статическую прочность МЭ.....	10
Требования к расчету на длительную циклическую прочность МЭ.....	10
Требования к расчету на сопротивление хрупкому (вязкохрупкому) разрушению (нестабильное развитие трещины) МЭ.....	11
Требования к расчету на прогрессирующее изменение формы и (или) размеров МЭ.....	11
Требования к расчету на накопление вязкопластических (пластических) деформаций МЭ..	11
Требования к расчету на внешние динамические воздействия МЭ.....	12
Требования к расчету на вибропрочность МЭ.....	12
III. Требования к расчету металло-бетонного корпуса блока реакторного.....	13
Требования к определению напряжений и деформаций в бетонных элементах.....	13
Требования к расчету бетонных элементов на статическую прочность.....	14
Требования к расчету бетонных элементов на образование и развитие трещин.....	14
Требования к расчету корпуса блока реакторного на устойчивость.....	14
Требования к расчету корпуса блока реакторного на внешние динамические воздействия	14
Приложение № 1.....	16
Список сокращений и обозначений.....	16
Приложение № 2.....	17
Термины и определения.....	17

I. Назначение и область применения

1. Настоящие федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Требования к обоснованию прочности корпуса блока реакторного, оборудования, трубопроводов и внутрикорпусных устройств ядерной энергетической установки со свинцовым теплоносителем» (НП-108-21) (далее — Правила) разработаны в соответствии со статьей 6 Федерального закона от 21 ноября 1995 г. № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии», Положением о разработке и утверждении федеральных норм и правил в области использования атомной энергии, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 1 декабря 1997 г. № 1511 (Собрание законодательства Российской Федерации, 1997, № 49, ст. 5600; 2012, № 51, ст. 7203).

2. Настоящие Правила распространяются на ядерные энергетические установки со свинцовым теплоносителем и устанавливают требования к обоснованию прочности оборудования, трубопроводов, внутрикорпусных устройств, корпуса блока реакторного, а также их составных частей, находящихся в постоянном или периодическом контакте со свинцовым теплоносителем и (или) защитным газом до первой отсечной арматуры или гидрозатвора от корпуса блока реакторного, а также оборудования и трубопроводов второго пароводяного контура от парогенератора до второй со стороны парогенератора арматуры (отсечной или обратной).

3. Требования настоящих Правил распространяются на элементы и их составные части, подверженные проектным нагружающим воздействиям и подпадающие под действие федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Правила устройства и безопасной эксплуатации корпуса блока реакторного, оборудования, трубопроводов и внутрикорпусных устройств ядерной энергетической установки со свинцовым теплоносителем» (НП-107-21), утвержденных приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 24 марта 2021 г. № 112 (зарегистрирован Министерством юстиции Российской Федерации 28 мая 2021 г., регистрационный № 63670) (далее — НП-107-21), для которых температура при нормальной эксплуатации и нарушениях нормальной эксплуатации, включая проектные аварии, не превышает:

а) 650°С для металлических элементов;

б) 700°С для бетонных элементов (бетонного наполнителя).

4. Требования настоящих Правил обязательны для исполнения эксплуатирующими организациями, а также организациями, выполняющими работы и предоставляющими услуги в области использования атомной энергии.

II. Требования к обоснованию прочности металлических элементов

Требования настоящей главы распространяются на оборудование, трубопроводы, внутрикорпусные устройства, а также на металлические обечайки, оболочки и иные металлические составные части КБР (далее — МЭ) (список сокращений и обозначений приведен в приложении № 1 к настоящим Правилам), кроме металлической арматуры бетона.

Расчетами на прочность должно быть обосновано, что в течение проектного срока службы в МЭ не будут достигнуты следующие предельные состояния (термины и определения приведены в приложении № 2 к настоящим Правилам):

- а) кратковременное разрушение (без учета влияния длительности нагружения);
- б) разрушение в условиях ползучести при статическом нагружении;
- в) возникновение пластической деформации по всей площади какого-либо из возможных сечений либо только по части площади сечения, но по всей толщине стенки МЭ (или его компонента);
- г) возникновение макротрещины вследствие циклического нагружения (при наличии ползучести или без нее);
- д) потеря устойчивости (при наличии ползучести или без нее);
- е) накопление предельно допустимой деформации ползучести;
- ж) достижение предельных изменений формы и (или) размеров;
- з) накопление предельно допустимой вязкопластической деформации при температуре, равной или превышающей значение T_t ;
- и) накопление предельно допустимой пластической деформации при температуре ниже T_t — с учетом коэффициентов запаса, установленных в следующих стандартах Госкорпорации «Росатом», передача которых осуществляется в установленном порядке*:

СТО 95 12047-2019, утвержденный приказом Госкорпорации «Росатом» от 5 декабря 2019 г. № 1/1350-П-дсп (далее — СТО 95 12047-2019);

СТО 95 12048-2019, утвержденный приказом Госкорпорации «Росатом» от 10 декабря 2019 г. № 1/1374-П-дсп (далее — СТО 95 12048-2019);

СТО 95 12049-2019, утвержденный приказом Госкорпорации «Росатом» от 4 декабря 2019 г. № 1/1344-П-дсп (далее — СТО 95 12049-2019).

* Порядок передачи служебной информации ограниченного распространения другим органам и организациям, утвержденный приказом Госкорпорации «Росатом» от 4 декабря 2017 г. № 1/51-НПА «Об упорядочении обращений со служебной информацией ограниченного распространения в Госкорпорации «Росатом», ее подведомственных организациях, а также организациях, координацию и регулирование деятельности которых осуществляет Госкорпорация «Росатом» (зарегистрирован Министерством юстиции Российской Федерации 28 декабря 2017 г., регистрационный № 49490).

7. При проведении расчетов на прочность МЭ должны быть учтены процессы и нагружающие воздействия (включая перечисленные в пункте 8 настоящих Правил), влияющие по отдельности или в совокупности на достижение предельного состояния МЭ.

8. В расчете на прочность МЭ должны учитываться:

- а) воздействие температур и нейтронных потоков на свойства материалов и на нагружение МЭ;
- б) упругое или упругопластическое деформирование металла в зависимости от значений напряжений и температуры;
- в) термическая ползучесть металла при температуре, равной или превышающей значение T_t , установленное стандартом Госкорпорации «Росатом» СТО 95 12040-2019, утвержденным приказом Госкорпорации «Росатом» от 5 декабря 2019 г. № 1/1351-П-дсп (далее — СТО 95 12040-2019);
- г) влияние свинцового теплоносителя и газовой среды на прочность МЭ;
- д) радиационная ползучесть и радиационное распухание металла в зависимости от уровня нейтронного облучения.

9. Расчет на прочность должен включать в себя расчет по выбору основных размеров и проверочный расчет, выполняемые с учетом предельных состояний, указанных в пункте 6 настоящих Правил. При обосновании прочности МЭ должны выполняться как требования для расчета по выбору основных размеров, установленные пунктами 12–15 настоящих Правил, так и требования для поверочного расчета, установленные пунктами 16–18 настоящих Правил.

10. В расчете на прочность должны применяться значения физических и механических характеристик основного металла и сварных соединений в соответствии с требованиями СТО 95 12040-2019, а также консервативным образом учитываться их изменения в процессе эксплуатации вследствие высокой температуры, облучения и распухания металла, воздействия теплоносителя или газовой среды, а также их совместного влияния.

В случае если в стандарте СТО 95 12040-2019 отсутствуют значения физических и механических характеристик основного металла и сварных соединений, то должны использоваться значения характеристик конструкционных материалов, обоснованные в соответствии с требованиями НП-107-21.

Требования к номинальным допускаемым напряжениям в МЭ

11. Номинальные допускаемые напряжения при температуре T , используемые в расчетах на прочность, должны определяться по временному сопротивлению, пределу текучести и пределу длительной прочности материала МЭ с учетом их изменений в процессе эксплуатации:

- для компонентов МЭ, кроме болтов и шпилек:

$$[\sigma] = \min\{R_m^T/n_m; R_{p0,2}^T/n_{0,2}\} \text{ при } T \text{ ниже } T_t,$$

$$[\sigma] = \min\{R_m^T/n_m; R_{p0,2}^T/n_{0,2}; R_{mt}^T/n_{mt}\} \text{ при } T, \text{ равной или выше } T_t,$$

где:

$$n_m = 2,6;$$

$$n_{0,2} = 1,5;$$

$$n_{mt} = 1,5;$$

- для болтов или шпилек:

$[\sigma]_W = R_{p0,2}^T / n_{0,2}$ при температуре болтов и шпилек ниже T_t ,

$[\sigma]_{Wt} = \min\{R_{p0,2}^T / n_{0,2}; R_{mt}^T / n_{mt}\}$ при температуре болтов и шпилек равной или выше T_t ,

где:

$n_{0,2} = 2$;

$n_{mt} = 3$.

Требования к расчету по выбору основных размеров МЭ

12. В расчете по выбору основных размеров должны вычисляться значения расчетной толщины стенки (S_R) компонентов МЭ, а также выполняться подбор составных частей фланцевых соединений в зависимости от размеров и номинальных допускаемых напряжений ($[\sigma]$) компонентов при расчетной температуре. В качестве нагрузки должно использоваться расчетное давление, а дополнительно для компонентов фланцевых соединений — давление гидравлических или пневматических испытаний и усилие затяга болтов и шпилек.

13. Расчетная толщина стенок S_R должна вычисляться с учетом предельных состояний, указанных в подпунктах «а», «б» и «в» пункта 6 настоящих Правил.

14. Назначаемая номинальная толщина стенки должна определяться с учетом S_R , а также допусков на размеры исходных полуфабрикатов, возможных утонений при изготовлении и монтаже, а также утонения стенки за счет сплошной коррозии под воздействием коррозионной среды за весь срок службы МЭ, определенного на образцах, испытанных в условиях, близких к эксплуатационным.

15. Расчет по выбору основных размеров должен выполняться в соответствии с требованиями СТО 95 12047-2019.

Требования к поверочному расчету МЭ

16. Для проведения поверочного расчета в МЭ должно быть подтверждено выполнение требований, установленных к расчету по выбору основных размеров.

17. Поверочный расчет рассчитываемых МЭ должен проводиться по номинальным размерам.

18. В состав поверочного расчета должны входить:

- а) расчет на статическую прочность;
- б) расчет на устойчивость;
- в) расчет на циклическую прочность;
- г) расчет на длительную статическую прочность;
- д) расчет на длительную циклическую прочность;
- е) расчет на сопротивление хрупкому (вязкохрупкому) разрушению (нестабильное развитие трещины);
- ж) расчет на прогрессирующее изменение формы и (или) размеров;
- з) расчет на накопление вязкопластических (пластических) деформаций;

- и) расчет на внутренние динамические воздействия;
- к) расчет на внешние динамические воздействия;
- л) расчет на вибропрочность.

Требования к определению напряжений и деформаций в МЭ

19. Значения напряжений и деформаций и их изменения во времени, используемые в поверочном расчете, должны вычисляться на основе проектной последовательности нагружения МЭ. При вычислении напряжений и деформаций должны учитываться все предусмотренные проектом нагружающие воздействия на МЭ, возникающие при испытаниях, предпусковых наладочных работах и эксплуатации, а также при изготовлении КБР.

20. При сложном (не одноосном) напряженном состоянии в оценках прочности должны применяться приведенные напряжения или деформации.

21. В расчетах за пределами упругости материала рассматриваемого МЭ должны применяться упругопластические деформации (при реализации процессов ползучести — упруговязкопластические деформации) или условные упругие напряжения.

22. Методы вычисления приведенных напряжений и деформаций, учета пластичности и ползучести материала, условных упругих напряжений и формирования расчетных циклов условных упругих приведенных напряжений для проверки выполнения нормативных критериев прочности должны соответствовать требованиям СТО 95 12048-2019.

Требования к расчету на статическую прочность МЭ

Расчет на статическую прочность должен выполняться в целях подтверждения того, что напряжения в МЭ не достигнут значений, вызывающих предельные состояния, указанные в подпунктах «а» и «в» пункта 6 настоящих Правил, и при этом не реализуются:

- а) смятие поверхности МЭ (его компонента);
- б) разрушение срезом;
- в) изменение формы и (или) размеров, влияющее на работоспособность конструкции.

24. Расчет на статическую прочность должен выполняться без учета вибраций и динамических нагрузок, а также процессов ползучести.

25. Методы расчета и критерии статической прочности должны соответствовать требованиям СТО 95 12048-2019.

Требования к расчету на устойчивость МЭ

26. Расчет на устойчивость должен выполняться в целях подтверждения того, что значения нагружающих воздействий на МЭ, а в условиях реализации процессов ползучести и (или) релаксации напряжений — также и длительность приложения нагружающих воздействий к МЭ, не достигнут значений, вызывающих предельное состояние, указанное в подпункте «д» пункта 6 настоящих Правил.

27. При выполнении расчета на устойчивость должно учитываться снижение жесткости МЭ вследствие допусков на размеры исходных полуфабрикатов, возможных утонений при изготовлении и монтаже, а также утонения стенки под воздействием коррозионной среды, прогнозируемого на весь срок службы МЭ.

28. Методы расчета и критерии прочности при обосновании устойчивости должны соответствовать требованиям СТО 95 12048-2019.

Требования к расчету на циклическую прочность МЭ

29. Расчет на циклическую прочность должен выполняться в целях подтверждения того, что в МЭ, работающем при температуре, не превышающей значения T_t , под действием нагружающих воздействий, предусмотренных проектом ядерной энергетической установки, в течение проектного срока службы не возникнет предельное состояние, указанное в подпункте «г» пункта 6 настоящих Правил.

30. В расчете на циклическую прочность для заданного числа циклов нагружений должны быть вычислены допускаемые амплитуды условных упругих приведенных напряжений или для заданных значений амплитуд условных упругих приведенных напряжений – допускаемое число циклов нагружений.

31. Расчет на циклическую прочность должен выполняться на основе зависимостей, представленных в виде уравнений усталости или кривых усталости, связывающих допускаемые амплитуды и допускаемые числа циклов изменения условных упругих приведенных напряжений в основном металле. В указанные зависимости должны быть введены запасы прочности по числу циклов и по значениям амплитуд условных упругих приведенных напряжений (включая запасы по учету габаритных размеров и шероховатости поверхности рассчитываемого МЭ), а также учтено влияние асимметрии цикла приведенных напряжений, значений физических и механических характеристик материала, температуры металла, нейтронного облучения и параметров рабочей среды (свинцового теплоносителя, защитного газа, воздушной среды), влияющих на циклическую прочность.

При расчете должны быть учтены особенности сопротивления усталости сварного соединения по сравнению с основным металлом МЭ.

32. В расчете на циклическую прочность должно вычисляться усталостное повреждение металла в точках МЭ для каждого типа циклов условных упругих приведенных напряжений.

В расчете должны быть учтены особенности усталостного повреждения металла при одновременном действии циклов условных упругих приведенных напряжений с отличающимися периодами повторения.

33. В результате расчета на циклическую прочность должно быть подтверждено, что во всех точках МЭ сумма усталостных повреждений от всех типов циклов условных упругих приведенных напряжений не достигает допускаемого значения.

34. Методы расчета и критерии циклической прочности должны соответствовать требованиям СТО 95 12048-2019.

Требования к расчету на длительную статическую прочность МЭ

35. Расчет на длительную статическую прочность должен выполняться в целях подтверждения того, что в МЭ, работающем при температуре T , равной или выше T_t , в течение проектного срока службы не будут достигнуты предельные состояния, указанные в подпунктах «б» и «е» пункта 6 настоящих Правил.

36. Для МЭ, рассчитываемого на длительную статическую прочность, во всем диапазоне эксплуатационных температур должна быть обоснована статическая прочность согласно пунктам 23–25 настоящих Правил со значениями $[\sigma]$, соответствующими значениям T каждого рассчитываемого режима.

37. В расчете на длительную статическую прочность должны определяться допускаемые значения напряжений на основе характеристик сопротивления металла длительному статическому разрушению, зависящих от температуры, длительности нагружения, возможного наличия сварных соединений и воздействия среды.

38. В результате расчета на длительную статическую прочность должно быть подтверждено, что напряжения в МЭ и суммарное длительное статическое повреждение не превышают допускаемых значений.

39. Методы расчета и критерии длительной статической прочности должны соответствовать требованиям СТО 95 12048-2019.

Требования к расчету на длительную циклическую прочность МЭ

40. Расчет на длительную циклическую прочность должен выполняться в целях подтверждения того, что в МЭ, температура которого равна или превышает значение T_t , под действием циклически повторяющихся нагружающих воздействий, предусмотренных проектом, в течение проектного срока службы не возникнет предельное состояние, указанное в подпункте «г» пункта 6 настоящих Правил.

41. Для МЭ, рассчитываемого на длительную циклическую прочность, должна быть обоснована длительная статическая прочность в соответствии с пунктами 35–39 настоящих Правил.

42. Расчет на длительную циклическую прочность должен проводиться на основе требований, указанных в пунктах 31–33 настоящих Правил, с учетом влияния длительных статических повреждений материала. При проведении расчета из всех типов циклов условных упругих приведенных напряжений должны отбираться только такие типы циклов, в которых реализуется ползучесть.

43. Для получения суммарного повреждения в рассчитываемой точке МЭ найденные повреждения от циклов, в которых температура равна или превышает значение T_t , должны быть просуммированы с усталостными повреждениями от циклов, в которых температура не превышает значения T_t .

44. Методы расчета и критерии длительной циклической прочности должны соответствовать требованиям СТО 95 12048-2019.

Требования к расчету на сопротивление хрупкому (вязкохрупкому) разрушению (нестабильное развитие трещины) МЭ

45. Расчет на сопротивление разрушению должен выполняться в целях подтверждения того, что в течение срока службы рассчитываемого МЭ не будет достигнуто предельное состояние, указанное в подпункте «а» пункта 6 настоящих Правил, в виде неустойчивого роста трещины.

46. В результате расчета на сопротивление разрушению должно быть подтверждено, что коэффициент интенсивности напряжений, или J -интеграл, или раскрытие в вершине трещины – в нагруженном МЭ не превышают допускаемых значений.

47. Методы расчета и критерии прочности при обосновании сопротивления разрушению должны соответствовать требованиям СТО 95 12048-2019.

Требования к расчету на прогрессирующее изменение формы и (или) размеров МЭ

48. Расчет на прогрессирующее изменение формы и (или) размеров должен выполняться в целях подтверждения того, что в МЭ под действием циклически повторяющихся нагружающих воздействий в течение проектного срока службы не будет достигнуто предельное состояние, указанное в подпункте «ж» пункта 6 настоящих Правил.

49. Расчет на прогрессирующее изменение формы и (или) размеров должен выполняться в том случае, если в проектной или конструкторской документации установлены и обоснованы предельные значения изменения форм и (или) размеров, учитывающие конкретное назначение и условия работы рассчитываемого МЭ.

В результате расчета на прогрессирующее изменение формы и (или) размеров должно быть показано, что остаточные изменения формы и (или) размеров не превышают допускаемых значений.

50. Методы расчета и критерии прочности при прогрессирующем изменении формы и (или) размеров должны соответствовать требованиям СТО 95 12048-2019.

Требования к расчету на накопление вязкопластических (пластических) деформаций МЭ

51. Расчет на накопление вязкопластических деформаций должен выполняться в целях подтверждения того, что в течение срока службы рассчитываемого МЭ не будет достигнуто предельное состояние, указанное в подпункте «з» пункта 6 настоящих Правил (при отсутствии вязких деформаций — не будет достигнуто предельное состояние, указанное в подпункте «и» пункта 6 настоящих Правил).

52. Расчет на накопление вязкопластических деформаций должен проводиться для МЭ, в котором реализуется ползучесть. При этом должно учитываться влияние прогрессирующего изменения формы и (или) размеров.

53. Найденные в результате расчета накопленные вязкопластические деформации, включающие в себя деформации пластичности и ползучести, должны быть меньше допускаемых значений.

54. Методы расчета и критерии прочности при накоплении вязкопластических деформаций должны соответствовать требованиям СТО 95 12048-2019.

Требования к расчету на внешние динамические воздействия МЭ

55. Расчет на внешние динамические воздействия должен выполняться в целях подтверждения того, что при сочетании эксплуатационных нагрузок и внешних динамических воздействий, включая сейсмические воздействия, в МЭ не будут достигнуты предельные состояния, указанные в подпунктах «а», «в», «г», «ж», а для оборудования, кроме того, и подпункта «д» пункта 6 настоящих Правил.

56. При расчете на внешние динамические воздействия должно учитываться влияние гидродинамических эффектов от движения свинцового теплоносителя, а также от механических взаимодействий по поверхностям контакта, включая проскальзывание, раскрытие зазоров и соударения с соседними элементами и конструкциями.

57. Методы расчета и критерии прочности при сейсмических воздействиях должны соответствовать требованиям СТО 95 12049-2019.

58. Методы расчета и критерии прочности при внешнем динамическом воздействии, кроме сейсмического воздействия, должны соответствовать требованиям СТО 95 12048-2019.

Требования к расчету на вибропрочность МЭ

59. Расчет на вибропрочность должен выполняться в целях подтверждения того, что при возникновении в МЭ вибраций не будет достигнуто предельное состояние, указанное в подпункте «г» пункта 6 настоящих Правил, а также не возникнут виброударные взаимодействия с соседними элементами и конструкциями.

60. Расчет на вибропрочность должен содержать:

- а) определение спектра собственных частот колебаний МЭ и проверку отсутствия резонанса (отстройки от детерминированных частот возмущения);
- б) проверку на отсутствие виброударных взаимодействий МЭ с соседними элементами и конструкциями с целью исключения повышенного износа;
- в) расчеты на циклическую и длительную циклическую прочность с учетом вибронапряжений.

61. Результаты расчета МЭ на вибропрочность, в том числе в случаях, когда расчетом не удастся обосновать отсутствие резонанса в рассматриваемом МЭ, должны быть подтверждены расчетно-экспериментальным путем по результатам анализа вибраций, зарегистрированных в процессе предпусковых наладочных работ с использованием расчета на циклическую и длительную циклическую прочность.

62. Методы расчета и критерии вибропрочности должны соответствовать требованиям СТО 95 12048-2019.

III. Требования к расчету металло-бетонного корпуса блока реакторного

63. Расчет НДС КБР должен выполняться совместно для МЭ и БЭ, входящих в состав КБР.

64. Расчеты на прочность МЭ в составе КБР, а также иных металлических компонентов в составе элементов КБР (кроме металлической арматуры бетона) должны выполняться в соответствии с требованиями главы II настоящих Правил по результатам расчета НДС, выполненного совместно с БЭ. При этом должно быть учтено влияние уровней напряжений и деформаций, возникающих в БЭ, на физические и механические характеристики бетона, используемые в расчете НДС КБР.

65. Физические и механические характеристики бетона, используемые в расчетах НДС, должны приниматься с учетом влияния на них уровней напряжений, деформаций и требований долговечности по результатам анализа:

- а) статической прочности;
- б) образования и развития трещин;
- в) устойчивости;
- г) внешних динамических воздействий.

Анализ должен выполняться для всех режимов нагружения КБР, возникающих при изготовлении, предэксплуатационном нагреве, предпусковых наладочных работах и при эксплуатации в соответствии с требованиями следующих стандартов Госкорпорации «Росатом»:

СТО 95 12052-2019, утвержденный приказом Госкорпорации «Росатом» от 5 декабря 2019 г. № 1/1349-П-дсп (далее – СТО 95 12052-2019);

СТО 95 12053-2019, утвержденный приказом Госкорпорации «Росатом» от 10 декабря 2019 г. № 1/1380-П-дсп (далее — СТО 95 12053-2019).

Требования к определению напряжений и деформаций в бетонных элементах

66. Определение НДС и проверка выполнения условий прочности по напряжениям и деформациям в БЭ должны проводиться с учетом:

- а) физико-механических характеристик металлической арматуры;
- б) физико-механических характеристик бетона с учетом различий при растяжении и сжатии, а также влияния неоднородности напряженного состояния;
- в) влияния длительного воздействия высокой температуры на физико-механические свойства материалов БЭ;
- г) влияния трещин в бетоне на теплофизические характеристики бетона и температурные поля в БЭ;
- д) влияния растрескивания бетона на деформационные свойства БЭ;
- е) влияния воздействия нейтронного облучения;

- ж) влияния механического взаимодействия металлической арматуры и бетона;
- з) особенностей геометрической формы БЭ, включая каналы системы парогазоотведения.

67. Методы учета указанных факторов при определении напряжений и деформаций должны соответствовать требованиям СТО 95 12052-2019.

Требования к расчету бетонных элементов на статическую прочность

68. Расчет БЭ на статическую прочность должен проводиться в целях проверки выполнения условий прочности по напряжениям и (или) деформациям. В случае если не выполняется хотя бы одно из условий прочности, физические и механические характеристики бетона должны быть уточнены для учета в последующих расчетах на прочность МЭ в составе КБР при их совместном деформировании с БЭ.

69. Методы расчета и критерии статической прочности для применяемых марок бетона должны соответствовать требованиям СТО 95 12052-2019.

Требования к расчету бетонных элементов на образование и развитие трещин

70. В случае, если в результате анализа статической прочности БЭ установлено начало трещинообразования, дальнейшие расчеты на прочность МЭ в составе КБР при их совместном деформировании с БЭ должны проводиться с учетом анализа развития трещин в БЭ и соответствующих изменений физических и механических характеристик бетона.

71. Методы расчета и критерии прочности при обосновании БЭ на образование и развитие трещин должны соответствовать требованиям СТО 95 12052-2019.

Требования к расчету корпуса блока реакторного на устойчивость

72. Расчет на устойчивость должна быть подтверждена устойчивость КБР с учетом совместного деформирования бетонных и металлических элементов.

73. Методы расчета и критерии прочности при обосновании КБР на устойчивость с учетом деформационных свойств бетона должны соответствовать требованиям СТО 95 12052-2019.

Требования к расчету корпуса блока реакторного на внешние динамические воздействия

74. Расчет на внешние динамические воздействия должен выполняться в целях подтверждения того, что при сочетании эксплуатационных нагрузок и внешних динамических воздействий, включая сейсмические воздействия, при совместном деформировании БЭ и МЭ в составе КБР будет обеспечена прочность металлических частей КБР в соответствии с требованиями главы II настоящих Правил.

75. В расчете на внешние динамические воздействия должны быть учтены следующие особенности динамического механического взаимодействия по поверхностям контакта БЭ с металлическими конструкциями: возможность проскальзывания, раскрытия зазоров и соударений в зонах контакта металла и бетона, а также другие виды взаимодействия, влияющие на НДС при динамических воздействиях.

76. Методы расчета и критерии прочности при внешнем динамическом воздействии должны соответствовать требованиям СТО 95 12052-2019 и СТО 95 12053-2019.

Приложение № 1

к федеральным нормам и правилам в области использования атомной энергии «Требования к обоснованию прочности корпуса блока реакторного, оборудования, трубопроводов и внутри-корпусных устройств ядерной энергетической установки со свинцовым теплоносителем», утвержденным приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 21 июля 2021 г. № 258.

Список сокращений и обозначений

БЭ — бетонные элементы (бетонный наполнитель) металло-бетонного корпуса блока реакторного;

КБР — корпус блока реакторного;

МЭ — металлический элемент (металлические элементы);

НДС — напряженно-деформированное состояние;

R_m^T — минимальное значение временного сопротивления при температуре T , МПа;

R_{mt}^T — минимальный предел длительной прочности материала при температуре T , МПа;

$R_{p0,2}^T$ — минимальное значение предела текучести при температуре T , МПа;

n_m — коэффициент запаса прочности по временному сопротивлению;

n_{mt} — коэффициент запаса прочности по пределу длительной прочности;

$n_{0,2}$ — коэффициент запаса прочности по пределу текучести;

T — температура материала, значение которой принимается (в зависимости от вида расчета на прочность) равным значению в рассматриваемой точке или среднему значению в рассматриваемом сечении, °С (К);

T_t — температура, при превышении которой необходимо учитывать характеристики длительной прочности, пластичности и ползучести, °С (К);

$[\sigma]$ — номинальное допускаемое напряжение для компонентов, кроме болтов и шпилек, МПа;

$[\sigma]_w$ — номинальное допускаемое напряжение для болтов и шпилек при температуре ниже T_t , МПа;

$[\sigma]_{wt}$ — номинальное допускаемое напряжение для болтов и шпилек при температуре равной или выше T_t , МПа.

Приложение № 2

к федеральным нормам и правилам в области использования атомной энергии «Требования к обоснованию прочности корпуса блока реакторного, оборудования, трубопроводов и внутри-корпусных устройств ядерной энергетической установки со свинцовым теплоносителем», утвержденным приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 21 июля 2021 г. № 258.

Термины и определения

Амплитуда цикла напряжений или деформаций — полусумма от разности максимального и минимального значений цикла напряжений или деформаций.

Асимметрия цикла напряжений — отношение минимального значения к максимальному значению приведенных напряжений, возникающих в точке элемента (компонента) в процессе цикла изменения условных упругих приведенных напряжений.

Длительное статическое повреждение — снижение способности материала сопротивляться разрушению от воздействия ползучести, вызванное выдержкой под напряжением при температуре выше T_t .

Долговечность бетона — способность бетона в составе элемента (компонента) в течение проектного срока службы элемента (компонента) сохранять физические и механические характеристики не ниже уровней, установленных при проектировании (конструировании).

Компонент — часть элемента, анализируемая при выполнении расчета на прочность.

Кратковременное разрушение — разрушение элемента (компонента), происходящее в момент достижения полем напряжений или деформаций состояния, установленного нормативной документацией.

Номинальное допускаемое напряжение — напряжение, значение которого определяется временным сопротивлением, пределом текучести и пределом длительной прочности материала, используемое для различных видов нормативных расчетов на прочность.

Номинальный размер — значение размера, указанное в конструкторской (проектной) документации без учета допусков.

Приведенная деформация — используемое при оценке прочности элемента или его компонента значение деформации, приводящее деформированное состояние к условиям эквивалентного одноосного напряженного состояния.

Приведенное напряжение — используемое при оценке прочности элемента или его компонента значение напряжения, приводящее напряженное состояние к условиям эквивалентного одноосного напряженного состояния.

Радиационная ползучесть — ползучесть материала, вызванная облучением.

Радиационное распухание — увеличение удельного объема материала, вызванное облучением.

Расчетная температура — температура стенки элемента (компонента), значение которой используется при расчете по выбору основных размеров и определяется как максимальное для

рассматриваемого режима среднеинтегральное значение распределения температуры по толщине стенки.

Расчетное давление — избыточное давление в элементе (компоненте), значение которого используется при расчете на прочность по выбору основных размеров и устанавливается конструкторской (проектной) организацией не ниже, чем максимальное давление при условиях нормальной эксплуатации в элементе.

Режим нагружения — изменение во времени совокупности параметров нагружения (значение нагрузок, температур, флюенса нейтронов, количества циклов приложения нагрузок) элемента (компонента), характеризующее определенную стадию его жизненного цикла.

Тип циклов условных упругих приведенных напряжений или деформаций — совокупность параметров цикла условных упругих приведенных напряжений или деформаций, включающая: амплитуду цикла напряжения или деформации, асимметрию цикла приведенных напряжений, значения минимальной и максимальной температуры цикла, а в условиях ползучести — дополнительно длительность действия максимального или минимального приведенного напряжения цикла.

Усилие затяга — продольное внутреннее усилие, создаваемое в болтах (шпильках) для обеспечения герметичности фланцевого соединения.

Условные упругие напряжения — напряжения, значения которых определяются по соотношениям обобщенного закона Гука путем замены в них компонентов тензора деформаций упругости на суммы одноименных им компонентов тензоров деформаций упругости, пластичности и ползучести.

Усталостное повреждение — снижение способности материала сопротивляться усталостному разрушению, вызванное циклическим деформированием.

Цикл напряжений — изменение напряжения от исходного значения до конечного, равного исходному, при котором достигаются одно максимальное и одно минимальное значения напряжения.