

УДК 621.039.58

КОМПЬЮТЕРНАЯ БАЗА ДАННЫХ ПО ДЕФЕКТАМ МЕТАЛЛА ОБОРУДОВАНИЯ И ТРУБОПРОВОДОВ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Кorableва С.А., к.т.н. (korableva@secnrs.ru),
Рубцов В.С., к.т.н. (vrubtsov@secnrs.ru)
(ФБУ «НТЦ ЯРБ»)

В ФБУ «НТЦ ЯРБ» разработана и поддерживается компьютерная база данных по дефектам металла оборудования и трубопроводов Российских АЭС, которая позволяет выполнять поиск дефектов по различным критериям запроса и может быть использована для отбора наиболее опасных дефектов при выполнении анализа безопасности эксплуатации оборудования и трубопроводов АЭС, содержащих трещиноподобные дефекты, а также с целью установления истории зарождения и развития дефектов. В статье приведен пример использования базы данных для оценки возможности разрушения аустенитных трубопроводов РБМК при наличии трещиноподобных дефектов.

► **Ключевые слова:** атомная электрическая станция, оборудование, трубопроводы, безопасность эксплуатации, эксплуатационный неразрушающий контроль, база данных, металл, трещина.

DATABASE OF FLAWS IN THE METAL OF EQUIPMENT AND PIPELINES OF NUCLEAR POWER PLANTS

Korableva S., Ph. D., Rubtsov V., Ph. D.
(SEC NRS)

The database of flaws in the metal of equipment and pipelines of Russian NPPs in operation was created by specialists of SEC NRS. The specified database allows to search for crack defects using various criteria query and may be used for determination of the most dangerous defects for the following safety analysis of the NPP's equipment and pipelines with crack-like flaws and the background of formation and development of flaws. The example of using the database for failure possibility analysis of austenitic pipelines of RBMK, containing flaws, is given in the article.

► **Key words:** nuclear power plant, equipment, pipeline, operation safety, in-service nondestructive examination, database, metal, flaw.

Расчеты прочности оборудования и трубопроводов действующих в настоящее время отечественных энергоблоков АЭС выполнялись на основе норм расчета на прочность [1] издания 1973 г. или более поздних норм (ПНАЭ Г-7-002-86) [2], при этом как в [1], так и в [2] изначально предполагалось, что оборудование и трубопроводы не содержат дефектов (за исключением расчетов на сопротивление хрупкому разрушению, при выполнении которых постулируются трещины глубиной до 25 % от толщины стенки). В действительности оборудование без дефектов встречается достаточно редко, причем существующие методы неразрушающего контроля не всегда позволяют выявить имеющиеся дефекты. Поэтому констатация того, что дефектов не обнаружено, как показала практика, еще не означает, что дефектов нет, поскольку всегда имеется вероятность того, что дефект при выполнении контроля был пропущен.

Самым опасным типом дефекта с точки зрения возможности разрушения оборудования и трубопроводов является трещина, поскольку именно трещина является концентратором напряжений с наибольшим значением коэффициента концентрации, и при эксплуатации она может подрастать как за счет циклического нагружения оборудования и трубопроводов, так и за счет других механизмов деградации металла, например, за счет процессов межкристаллитной коррозии под напряжением или иных механизмов.

Кроме трещин к трещиноподобным дефектам (здесь и далее под трещиноподобными дефектами понимаются несплошности, которые можно представить в виде эквивалентной по опасности трещины) относят и другие типы дефектов, приводящих к значительной концентрации напряжений. Согласно РД ЭО 1.1.2.05.0330-2012 [3], к трещиноподобным дефектам относят объемные и плоскостные несплошности в виде трещин, пор, включений, непроваров, подрезов и т.д.

Скорость подрастания дефектов является основой для установления в нормативной или иной документации минимального межконтрольного периода, то есть времени между двумя контролями, в течение которого гарантируется с установленной степенью вероятности, что дефект (несплошность), оставленный при предыдущем контроле, за этот период не вырастет до размеров, представляющих опасность целостности проконтролированного элемента. Если скорость подраста трещины оценена неверно или трещина была пропущена при проведении неразрушающего контроля оборудова-

ния и трубопроводов, то она может настолько увеличиться в размерах, что может стать сквозной и вызвать течь теплоносителя или, что наиболее опасно, может привести к разрушению оборудования (трубопровода).

В соответствии с РД ЭО 1.1.2.05.0330-2012 [3] в эксплуатацию могут быть допущены оборудование и трубопроводы АЭС, содержащие трещиноподобные дефекты. В процессе своей работы Ростехнадзору приходится рассматривать техническую документацию по обоснованию безопасности эксплуатации энергоблока АЭС с содержащими подобные дефекты оборудованием и трубопроводами.

Для оказания научной поддержки Ростехнадзору при рассмотрении технической документации по обоснованию безопасности эксплуатации энергоблоков АЭС с содержащими дефекты оборудованием и трубопроводами необходимо:

- создать компьютерную базу данных по трещиноподобным и иным дефектам металла оборудования и трубопроводов АЭС;
- выполнить расчетное обоснование допустимости эксплуатации трубопроводов и оборудования АЭС с трещиноподобными дефектами и оценить время, в течение которого эксплуатация трубопроводов и оборудования с указанными дефектами будет безопасной;
- проводить систематическую поддержку и обновление указанной базы данных.

Первой из поставленных выше задач являлась задача по созданию базы данных по трещиноподобным и иным дефектам металла оборудования и трубопроводов АЭС. Начиная с 2008 г., специалистами ФБУ «НТЦ ЯРБ» собиралась и систематизировалась информация о дефектах сварных соединений и основного металла оборудования и трубопроводов АЭС, полученная из различных официальных источников. С целью удобства пользования в 2009 г. была разработана усовершенствованная компьютерная версия базы данных по дефектам металла оборудования и трубопроводов АЭС, которая в настоящее время своевременно пополняется новыми данными.

При разработке компьютерной версии базы данных использовалась система управления базами данных (СУБД) на базе Microsoft Access. На данный момент компьютерная база данных по дефектам металла оборудования и трубопроводов АЭС содержит информацию, взятую из следующих источников, поступивших в ФБУ «НТЦ ЯРБ»:

- годовых отчетов по состоянию безопасности энергоблоков АЭС за 2006 – 2015 гг.;

- цеховых отчетов, полученных с энергоблоков АЭС за 2009 – 2015 гг.;
- актов обследования дефектных узлов, полученных непосредственно с энергоблоков за 2009 – 2015 гг.

С целью последующего анализа безопасности эксплуатации оборудования и трубопроводов АЭС в базе данных приводится информация не только по допущенному к эксплуатации оборудованию, содержащему дефекты, но и по оборудованию, дефекты которого были отремонтированы или удалены.

Пример интерфейса базы данных по дефектам металла оборудования и трубопроводов АЭС приведен на рис. 1, где представлено загрузочное меню базы данных. В качестве сведений по дефектам металла оборудования и трубопроводов АЭС в базу данных заносится следующая информация:

- название АЭС;
- номер энергоблока;
- год контроля;
- источник контроля;
- наименование оборудования;

- дата обнаружения, метод контроля;
- место расположения дефекта;
- тип дефекта;
- геометрические характеристики дефекта;
- принятые меры;
- дефект устранен (да/нет).

Разработанная база данных по дефектам металла оборудования и трубопроводов АЭС позволяет выполнять поиск дефектов по различным критериям запроса (наименование энергоблока АЭС, год обнаружения и т.д.), при этом на мониторе компьютера могут отображаться как все обнаруженные дефекты, так и только дефекты оборудования и трубопроводов, которые были допущены в эксплуатацию.

База данных используется для поиска наиболее опасных дефектов и последующей оценки безопасности эксплуатации оборудования и трубопроводов АЭС при наличии трещиноподобных дефектов. Далее рассматривается пример использования базы данных для оценки возможности разрушения аустенитных трубопроводов РБМК при наличии трещиноподобных дефектов.

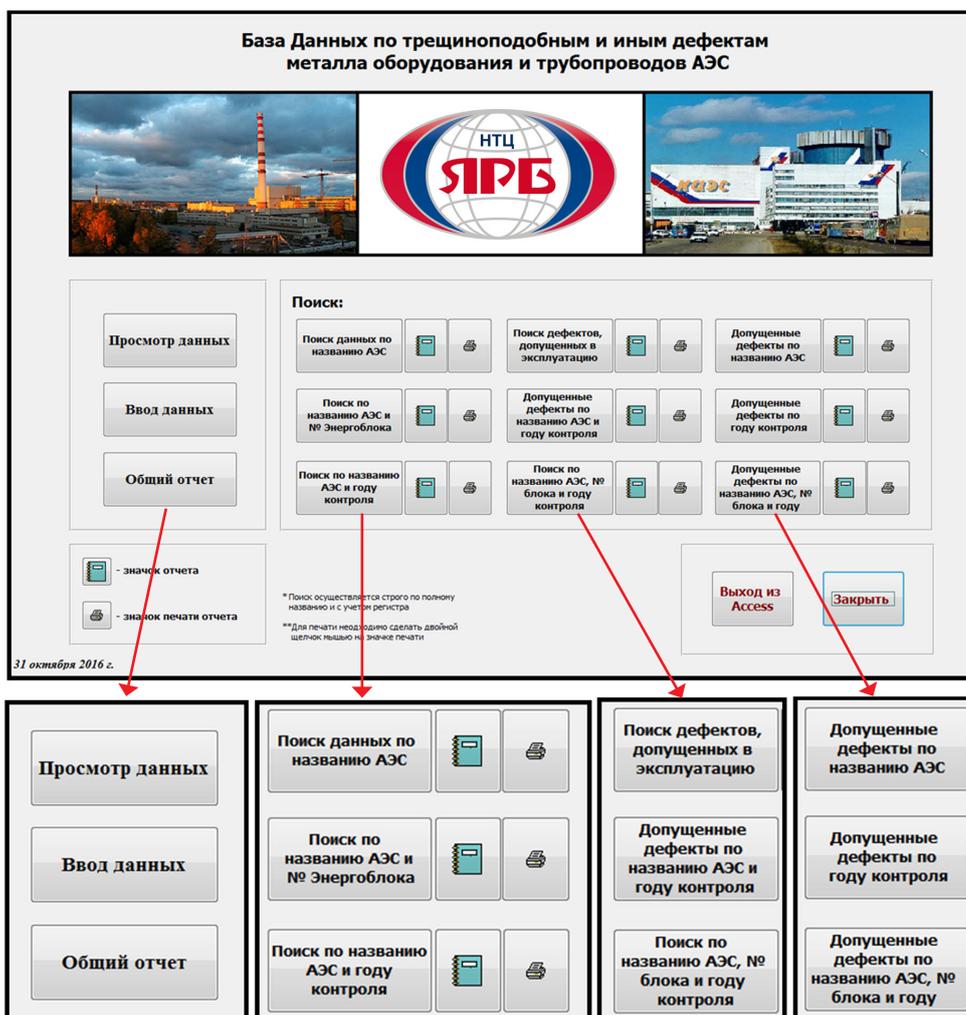


Рис. 1. Загрузочное меню базы данных по трещиноподобным и иным дефектам металла оборудования и трубопроводов АЭС

В настоящее время одной из проблем безопасности эксплуатации АЭС является проблема прочности сварных соединений трубопроводов Ду300 реакторов РБМК-1000, изготовленных из аустенитной нержавеющей стали. По состоянию на 2016 г. на всех энергоблоках с реакторами РБМК имеется более 15000 таких сварных соединений, и на многих из них имеет место образование и быстрый рост размеров трещин. Количество упомянутых сварных соединений на энергоблоках РБМК-1000 с каждым годом увеличивается из-за применяемой технологии ремонта – вырезка дефектного сварного соединения, вставка на место вырезки участка трубопровода и сварка двух новых сварных соединений в местах стыка вставленного участка с трубопроводом.

Анализ базы данных по дефектам металла оборудования и трубопроводов АЭС показал, что в настоящее время на некоторых АЭС с реакторами РБМК-1000 находятся в эксплуатации аустенитные трубопроводы, содержащие трещины в зоне сварных соединений глубиной до 5,0 мм. С помощью построения диаграммы конструкционной целостности была выполнена оценка возможности разрушения наиболее нагруженного трубопровода диаметром 325x16 мм, содержащего трещину указанной глубины, а также проведен расчет кинетики подраста трещины за 2 года.

На основе анализа базы данных по дефектам металла оборудования и трубопроводов АЭС в качестве исходного дефекта для расчета была выбрана ориентированная в окружном направлении полуэллиптическая трещина на внутренней поверхности трубопровода в зоне сопряжения сварного шва и основного металла глубиной 5,0 мм и длиной 75 мм. В расчете консервативно принято, что трещина является кольцевой, то есть охватывает всю длину окружности. Расчетная оценка возможности разрушения наиболее нагруженного сварного соединения трубопровода диаметром 325x16 мм с постулированной кольцевой трещиной выполнялась по компьютерной программе «ProSACC».

Построение диаграмм конструкционной целостности в целях оценки возможности разрушения элементов оборудования и трубопроводов широко используется как за рубежом (так называемый R6-метод [4]), так и в отечественных нормативных документах (например, РД ЭО 0513-03 [5]). Компьютерная программа «ProSACC» специально разработана для выполнения независимых экспертных расчетных оценок безопасности эксплуатации

оборудования и трубопроводов АЭС при наличии в них наиболее опасных типов дефектов – трещин. Разработчиком программы является независимая сертификационная компания Det Norske Veritas (Швеция-Норвегия). Указанная программа верифицирована в соответствии с [6].

С использованием компьютерной программы «ProSACC», которая позволяет проводить расчеты подраста трещиноподобных дефектов как при длительном циклическом нагружении, так и при эксплуатации в присутствии теплоносителей различных типов за счет межкристаллитного коррозионного растрескивания под напряжением, была также проведена оценка скоростей подраста трещин.

Ввиду того, что скорость подрастания трещин в значительной степени зависит от величин растягивающих напряжений, перпендикулярных плоскости трещины, было рассмотрено несколько вариантов расчетов, в которых напряжения меняются от минимальных значений, определяемых только давлением теплоносителя 8 МПа, до максимальных значений, допускаемых ПНАЭ Г-7-002-86 [2] в нормальных условиях эксплуатации при температуре 300 °С по расчетной группе категорий напряжений (σ_2), то есть по сумме мембранных и изгибных напряжений (см. таблицу).

Как видно из таблицы, величина напряжений варьировалась от минимально-возможного уровня 50,4 МПа (только напряжения от давления теплоносителя) до максимально-допустимого уровня напряжений 155 МПа.

Кинетика подраста трещины в глубину толщины стенки сварного соединения трубопровода представлена на рис. 2.

Как видно из представленных на рис. 2 результатов расчетов, скорость подрастания трещины существенно (в десять и более раз) зависит от величины напряжений, перпендикулярных плоскости трещины. При напряжениях только от давления теплоносителя (вариант 1 на рис. 2) трещина за 2 года подрастает несущественно (в рамках погрешности методов контроля). При напряжениях, равных 32,5 % от максимально-допустимых по ПНАЭ Г-7-002-86 [2] по категории (σ_2), трещина за 2 года подрастает на 1,7 мм, то есть в рамках прогноза РД ЭО 0489-03 [7] (вариант 2 на рис. 2). При напряжениях, составляющих 2/3 от максимально-допустимых по ПНАЭ Г-7-002-86 [2] категории (σ_2), трещина за 2 года вырастет до 10 мм, то есть до размера, способного привести к разрушению трубопровода с появлением течи теплоносителя. При напряжениях, превышающих 83 % от максимально-допустимых по ПНАЭ

Г-7-002-86 [2] категории (σ)₂, рассматриваемая трещина вырастет до размера, способного привести к разрушению трубопровода с появлением течи теплоносителя в течение одного года.

Таким образом, допуск в эксплуатацию аустенитных трубопроводов Ду300 реакторов РБМК, содержащих трещины в сварных соединениях глубиной 5 мм, не приведет к их заметному подрастанию только в тех случаях, когда уровень напряжений, перпендикулярных плоскости трещины, не превышает 50 % от максимально-допустимых по ПНАЭ Г-7-002-86 [2] по категории (σ)₂. При больших величинах напряжений трещина может вырасти до сквозной за 2 года или даже за 1 год. Вследствие этого решение о допуске в эксплуатацию аустенитных трубопроводов Ду300 реакторов РБМК глубиной до 5 мм следует принимать

с учетом уровня напряжений, перпендикулярных плоскости трещины.

Построенная с помощью компьютерной программы «ProSACC» диаграмма конструкционной целостности рассматриваемого участка трубопровода диаметром 325x16 мм, содержащего кольцевую трещину глубиной 5 мм, приведена на рис. 3.

Из представленных на рис. 3 результатов расчетов видно, что рассмотренный консервативный случай нагружения сварного шва, содержащего постулированную кольцевую трещину глубиной 5,0 мм (третья часть от толщины стенки трубопровода), не представляет опасности, т.е. при заданных заведомо консервативных условиях разрушение невозможно, так как рассматриваемый случай находится в безопасной области с большими запасами прочности.

Величины напряжений, перпендикулярных плоскости трещины, заложенные в расчет

№ варианта	Величина мембранных напряжений (только от давления теплоносителя), МПа	Величина изгибных напряжений, МПа	Суммарные напряжения, МПа	Доля напряжений от максимально-допустимых по ПНАЭ Г-7-002-86 категории (σ) ₂
1	50,4	0	50,4	32,5 %
2	50,4	26,2	76,6	49 %
3	50,4	52,3	102,7	66 %
4	50,4	78,5	128,9	83 %
5	50,4	104,6	155	100 %

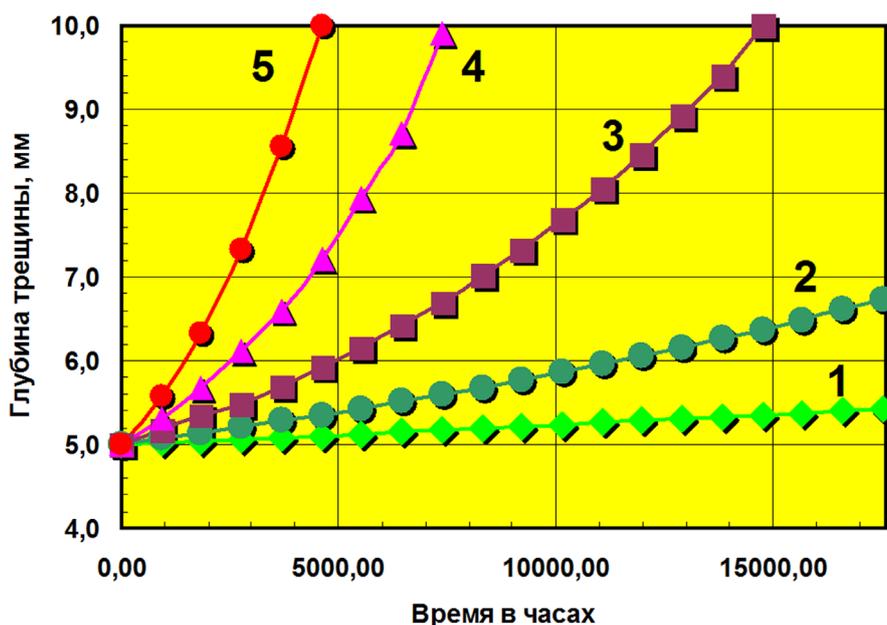


Рис. 2. Результаты расчетов кинетики подраста трещины за 2 года в зависимости от величины напряжений, перпендикулярных плоскости трещины

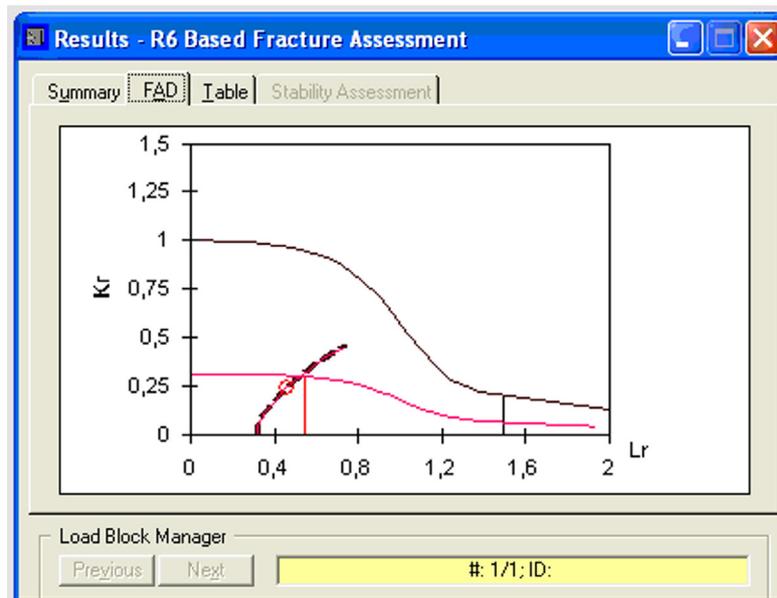


Рис. 3. Диаграмма конструктивной целостности для сварного шва с постулированной кольцевой трещиной глубиной 5,0 мм

Заключение

В ФБУ «НТЦ ЯРБ» разработана и поддерживается компьютерная база данных по дефектам металла оборудования и трубопроводов АЭС, которая позволяет выполнять поиск дефектов по различным критериям запроса и может быть использована для отбора наиболее опасных дефектов при выпол-

нении анализа безопасности эксплуатации оборудования и трубопроводов АЭС, содержащих трещиноподобные дефекты, а также с целью установления истории зарождения и развития дефектов.

Приведен пример использования базы данных для оценки возможности разрушения аустенитных трубопроводов РБМК при наличии трещиноподобных дефектов.

Список литературы

1. Нормы расчета на прочность элементов реакторов, парогенераторов, сосудов и трубопроводов атомных электростанций, опытных и исследовательских ядерных реакторов и установок. – М.: Металлургия, 1973.
2. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-002-86. – М.: Металлургия, 1973.
3. Руководство по расчету на прочность оборудования и трубопроводов реакторных установок РБМК, ВВЭР и ЭГП на стадии эксплуатации, включая эксплуатацию за пределами проектного срока службы. РД ЭО 1.1.2.05.0330-2012 // Указатель технических документов, регламентирующих обеспечение безопасности на всех этапах жизненного цикла атомных станций, ОАО «Концерн Росэнергоатом», 2015.
4. R6 Revision 4, 2001: «Assessment of the integrity of structures containing defects», British Energy Ltd, April 2001.
5. Применение концепции «исключение разрывов» для трубопроводов и коллекторов Ду300 КМПЦ и СВБ энергоблоков АЭС с РБМК-1000 : РД ЭО 0513-03 // Указатель технических документов, регламентирующих обеспечение безопасности на всех этапах жизненного цикла атомных станций, ОАО «Концерн Росэнергоатом», 2015.
6. Требования к составу и содержанию отчета о верификации и обосновании программных средств, применяемых для обоснования безопасности объектов использования атомной энергии. РД-03-34-2000. – М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ».
7. Методика расчета и нормы допускаемых размеров дефектов в сварных соединениях трубопроводов Ду300 КМПЦ РБМК. РД ЭО 0489-03¹ // Указатель технических документов, регламентирующих обеспечение безопасности на всех этапах жизненного цикла атомных станций, ОАО «Концерн Росэнергоатом», 2015. – М.: Министерство РФ по атомной энергии, 2002.

¹ В настоящее время документ не действует.

References

1. “Strength calculation codes for components of reactors, steamgenerators, vessels and pipelines of nuclear power plants, experimental and research nuclear reactors and installations”. – М.: Metallurgical engineering, 1973.
2. “Strength calculation codes for equipment and pipelines of nuclear power plants. PNAE G-7-002-86. – М.: Metallurgical engineering, 1973.
3. “Strength calculation guideline for equipment and pipelines of RBMK, VVER and EGR reactor installations at the stage of operation, including long-term operation”. RD EO 1.1.2.05.0330-2012 // Index of technical document to regulate safety ensuring at all stages of nuclear plants lifetime, JSC «Concern Rosenergoatom», 2015.
4. R6 Revision 4, 2001: «Assessment of the integrity of structures containing defects», British Energy Ltd, April 2001.
5. Application of the “rupture exception” concept for pipelines and collectors of MCC Dn300 and the safety-related systems of RBMK-1000 units: RD EO 0513-03 // Index of technical document to regulate safety ensuring at all stages of nuclear plants lifetime, JSC «Concern Rosenergoatom», 2015.
6. “Requirements to the composition and the content of Report on verification and justification of software used for nuclear facilities safety analysis”. RD-03-34-2000. – М.: SEC NRS
7. Calculation methodology and codes of permissible welded joints faults of RBMK MCC pipelines Dn300. RD EO 0489-03¹ // Index of technical document to regulate safety ensuring at all stages of nuclear plants lifetime, JSC «Concern Rosenergoatom», 2015. – М.: Atomic energy ministry of the RF, 2002.



¹ Currently this document is not valid.