

УДК 621.039

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ГЛАВНОГО ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ТРУБОПРОВОДА НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ ТПР

Д.А. КУЗЬМИН, аспирант

г.Москва, ул. Ферганская, 25, АО «ВНИИАЭС», 109431,

Kuzmin_DA@yahoo.com

Исследованы условия обеспечения безопасности на основе концепции ТПР («Течь перед разрушением»). Показаны методы и подходы, используемые для расчетов на основе концепции ТПР. Продемонстрированы результаты работ, выполненных для АЭС типа ВВЭР -440, с использованием нормативных документов США, Словакии, Чехии и России по концепции ТПР.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: концепция «течь перед разрушением», трубопровод, критическая длина трещины, стабильность трещины, истечение и чувствительность систем контроля течей.

Введение

Концепция ТПР – это совокупность принципов конструирования сосудов и трубопроводов давления, включающая принцип достаточной трещиностойкости материала конструкции, обеспечивающей возможность существования устойчивых сквозных трещин при заданных условиях эксплуатации, и принцип обратной связи, обеспечивающей прекращение эксплуатации конструкции при появлении в ней течи через сквозную устойчивую трещину, практическая реализация которых позволяет исключить полное разрушение сосуда или трубопровода давления и прекратить их эксплуатацию при образовании течи [1].

Успешное применение концепции безопасности «Течь перед разрушением» (ТПР) оказывает положительное влияние на экономику АЭС, а именно:

а) позволяет избежать установки опор-ограничителей биений концов трубопровода в случае его обрыва;

б) отсутствие опор-ограничителей дает существенное сокращение времени эксплуатационного контроля состояния трубопроводов, так как присутствие опор-ограничителей часто усложняет и продлевает работы, связанные с контролем;

в) снижение времени на контроль приводит к снижению дозовых затрат персонала.

Проведено исследование по обеспечению безопасности главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) и дыхательного трубопровода (ДТ) на основе концепции ТПР для АЭС типа ВВЭР-440.

Поставлена задача определить требования к системам контроля течи, дать интегральную оценку безопасности эксплуатации трубопроводов ГЦТ и ДТ ВВЭР-440, а также определить требования к условиям безопасной эксплуатации этих трубопроводов. Для обеспечения безопасности ГЦТ и ДТ ВВЭР-440 на основе концепции ТПР учитывались рекомендации документов США [3], Чехии [4], Словакии [2] и России [5].

Основные принципы ТПР.

Последовательность обеспечения безопасности может быть определена следующим образом:

- проверка полноты входных данных на механические свойства и свойства механики разрушения по каждому расчетному элементу;
- проверка полноты входных данных о геометрии трубопроводов, такой как диаметр, толщина или геометрия гетерогенных швов с графическими иллюстрациями для всех расчетных элементов;
- проверка полноты входных данных о различных режимах эксплуатации;
- оценка влияния деградации металла на систему трубопроводов;
- проверка фактической толщины стенок на ослабления связанных с производством трубопроводов;
- оценка возможности возникновения гидроударов в трубопроводных системах;
- оценка возможности влияния косвенных источников разрыва трубопроводов, такие как аварии опор, демпферов, падение объектов и другие;
- оценка предрасположенности трубопроводов хрупкому разрушению;
- расчет напряжений трубопроводов на статические и сейсмические нагрузки;
- анализ проверки применимости концепции безопасности ТПР.

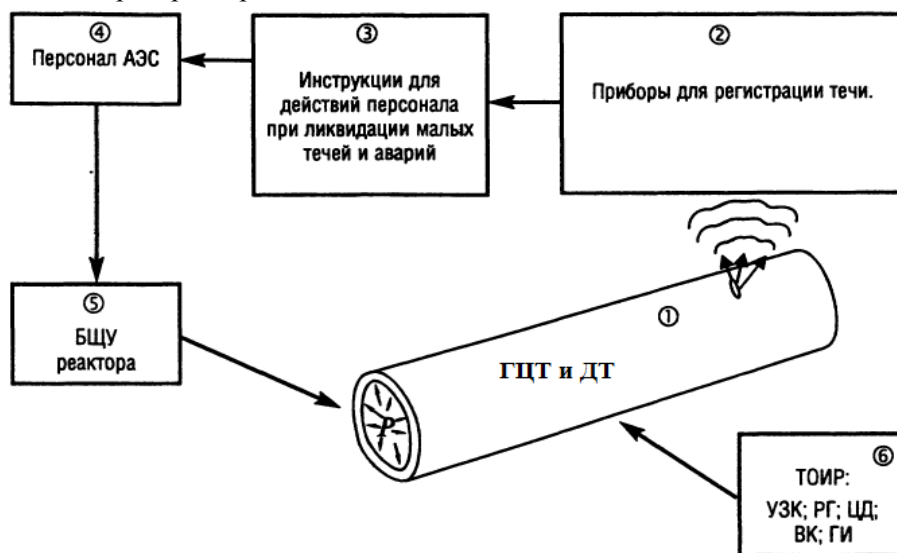


Рис. 1. Блок-схема системы безопасности «течь перед разрушением»

Система безопасности ТПР рассмотрена в конфигурации, указанной на рисунке 1. В соответствии с методологией [2] в случае обнаружения течи через стенку трубопровода время, в течение которого надо принять решение и начать останов энергоблока, составляет 60 минут или меньше.

Расчет напряжений для различных режимов эксплуатации.

Напряженно-деформированное состояние анализировалось с учетом возможности возникновения гидроударов и стратификации, а также аварийных режимов, в том числе максимально расчетных землетрясений (МРЗ).

Существует два варианта расчета результирующих сил и моментов [2]:

- вариант №1:

$$F_{sup} = |F_w| + |F_t| + |F_p| + |F_{MDE}|;$$

$$M_{supi} = |M_{iw}| + |M_{it}| + |M_{ip}| + |M_{iMDE}|, i = 1,2,3;$$

$$M_{sup} = (M_{sup1}^2 + M_{sup2}^2 + M_{sup3}^2)^{1/2};$$

- вариант №2:

$$F_{sup} = F_w + F_t + F_p + F_{MDE};$$

$$M_{supi} = M_{iw} + M_{it} + M_{ip} + M_{iMDE}, i = 1,2,3;$$

$$M_{sup} = (M_{sup1}^2 + M_{sup2}^2 + M_{sup3}^2)^{1/2};$$

где индекс *w* обозначает данные полученные за счет собственного веса, индекс *t* обозначает данные вызванные температурным расширением, индекс *p* показывает данные полученные от действия внутреннего давления и индекс *MDE* от сейсмического воздействия (МРЗ).

Полученные результирующие силы и моменты позволяют рассчитать мембранные (σ_m) и изгибные (σ_b) напряжения, действующие на расчетные сечения трубопроводных систем.

$$\sigma_m = \frac{F_{sup}}{A}; \quad \sigma_b = \frac{M_{sup}}{W};$$

где *A* – площадь сечения трубопровода, *W* – момент сопротивления.

Анализ проверки применимости концепции безопасности «течь перед разрушением».

Для проверки применимости концепции ТПР необходимо определить опасные участки или сечения трубопроводных систем, где наименее благоприятное сочетание напряжений и свойств материала. В соответствии с международной практикой все сварные швы являются опасными участками, и подлежат проверке по концепции ТПР.

Для каждого опасного участка необходимо провести ряд расчетов:

- расчет максимально возможной длины стабильной сквозной поперечной трещины;
- расчет критической длины трещины;
- расчет стабильности трещины в режиме НУЭ+МРЗ;
- расчет площади раскрытия трещины при НУЭ;
- расчет величины истечения теплоносителя;
- определение минимальной необходимой чувствительности.

В том случае, если все расчеты и оценки будут удовлетворять критериям безопасности ТПР, концепция ТПР является применимой для данных участков трубопровода. Принципиальным вопросом для обеспечения безопасности эксплуатации на основе концепции ТПР является вопрос о возможности существования стабильных сквозных трещин на трубопроводе и вопрос о возможности эти течи своевременно диагностировать.

Используя методы механики разрушения, проводились расчеты для всех сварных соединений. Для расчета выбраны «модифицированный метод нагрузки пластического шарнира» и «метод *J*-интеграла».

«Модифицированный метод нагрузки пластического шарнира» [2] основан на следующих соотношениях:

$$ZM(\sigma_m + \sigma_b) - M\sigma_m = \sigma_{blimit}, \quad (1)$$

где $Z = 1.15[1 + 0.013(OD - 4)]$ - для дуговой сварки,
 $Z = 1.30[1 + 0.010(OD - 4)]$ - для сварки под флюсом,
 $Z = 1$ - для основного металла, $M = 1$.

Предельные напряжения σ_{blimit} рассчитываются так:

$$\sigma_{blimit} = \left(\frac{2\sigma_f}{\pi}\right) (2\sin\beta - \sin\theta), \beta = \frac{1}{2} \left[(\pi - \theta) - \pi \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_f}\right) \right], \theta + \beta \leq \pi, \quad (2)$$

$$\sigma_{blimit} = \left(\frac{2\sigma_f}{\pi}\right) 2\sin\beta, \beta = -\pi \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_f}\right), \theta + \beta > \pi, \quad (3)$$

где σ_b – изгибные напряжения; σ_m – мембранные напряжения;

$$\sigma_f = \frac{R_{p0.2} + R_m}{2}.$$

Модифицированный «метод J -интеграла» [7] основан на методе GE/EPR1 в соответствии с документом [6] и изменен таким образом, чтобы учитывать изгибающий момент и силовой фактор. Модифицированный метод подробно описан в методических рекомендациях [7], основные выражения:

$$J = J_e + J_p \quad (4)$$

$$J_e = f_1 \left(\frac{\theta}{\pi}, \frac{R_m}{t} \right) \frac{M^2}{E}, \quad (5)$$

$$J_p = \alpha \sigma_0 \varepsilon_0 R_m \theta \left(1 - \frac{\theta}{\pi} \right) h_1 \left(\frac{\theta}{\pi}, \frac{R_m}{t}, n \right) \left(\frac{M}{M_0} \right)^{n+1}. \quad (6)$$

Для использования этого метода необходимо определить экспериментально коэффициенты упрочнения сталей, для которых будет проводиться проверка применимости ТПР, а так же определить критическую величину J -интеграла.

Для примера взят трубопровод Ду500, изготовленный из стали марки 08X18H10T. Моделировался режим максимально-расчетных землетрясений в сочетании с нормальными условиями эксплуатации (НУЭ+МРЗ), что соответствует механическим нагрузкам $\sigma_m=41$ МПа, $\sigma_b=132$ МПа. Проведен расчет с помощью модифицированного метода нагрузки пластического шарнира и метода J -интеграла см. рис. 2 и 3.

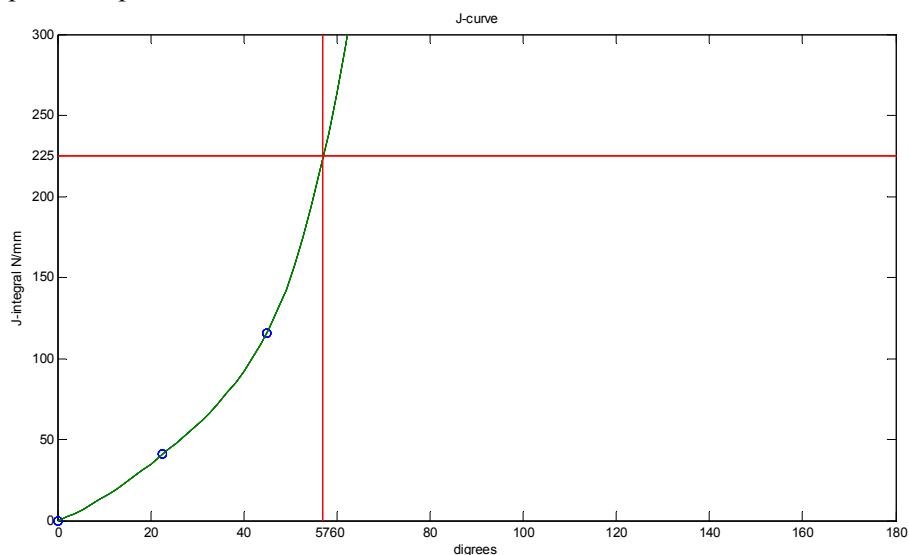


Рис. 2. Критическая длина трещины методом J -интеграла

На рис. 2, 3 показано, что при методе J -интеграла половина критической длины трещины равна $\varphi = 57^\circ$, а при модифицированном методе НПШ $\varphi = 44^\circ$. Модифицированный метод НПШ является более консервативным по отношению к методу J -интеграла для данного расчета, и, следовательно, является более предпочтительным к использованию.

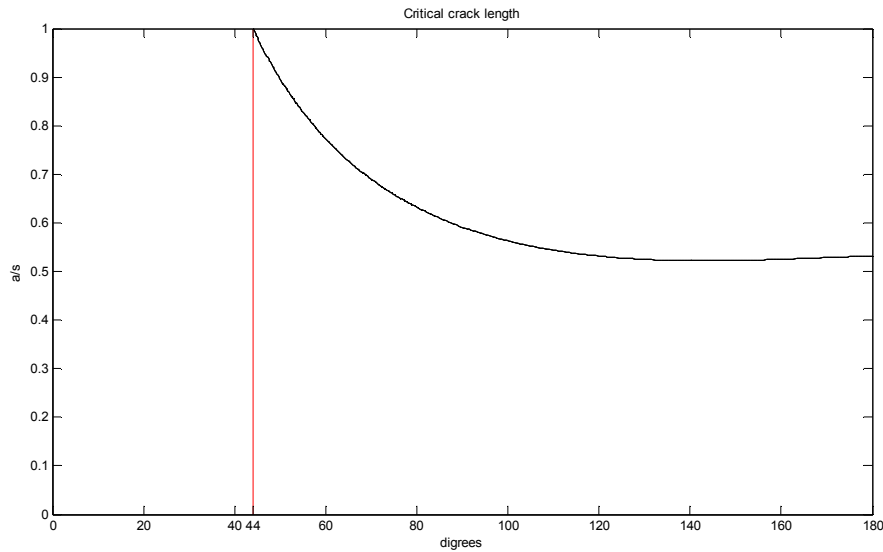


Рис. 3. Критическая длина трещины модифицированным методом НПС

Для всех расчетных сечений были получены критические размеры трещин двумя методами для основного металла и околошовной зоны.

Определение критической длины трещины.

Для определения критической длины l_c трещины необходимо учесть коэффициент безопасности на длину $n = 2$ [5], если силы и моменты рассчитывались по варианту №1, если по варианту №2, то коэффициент $n = 1$:

$$l_c = \frac{l_l}{n}.$$

Оценка стабильности трещин в режиме НУЭ+МРЗ

Полученные протяженности трещин необходимо проверять на стабильность в режиме НУЭ+МРЗ, с помощью соотношения [2]:

$$F_m = M_c / M_{sup} \geq 1, \tag{7}$$

где M_c - критический момент нагрузки для трещины длиной c_l , который можно определить по методам механики и M_{sup} – суммарный момент нагрузки, определяемый суммированием всех моментов действующих на расчетное сечение:

$$M_{supi} = |M_{iw}| + |M_{it}| + |M_{ip}| + |M_{iMDE}|, \quad i=1,2,3; \tag{8}$$

$$M_{sup} = (M_{sup1}^2 + M_{sup2}^2 + M_{sup3}^2)^{1/2}; \tag{9}$$

M_{iw} – момент возникший в результате весовых нагрузок,

M_{it} – момент возникший в результате температурных расширений,

M_{ip} – момент возникший в результате действия внутреннего давления,

M_{iMDE} – момент возникший в результате сейсмических нагрузок.

Расчет площади раскрытия трещины

Площадь раскрытия трещин рассчитывается исходя из аналитических методик линейной механики разрушения, с учетом дополнительных параметров учитывающих эффекты нелинейной механики разрушения. Данные методики учитывают геометрию конструкции и влияние пластических деформаций. Наплавка в трубопроводах реакторов типа ВВЭР-1000 и РБМК-1000 оказывает большое влияние на площадь раскрытия трещины, так как наплавка и основной металл трубопровода имеют различные коэффициенты линейного расширения.

Метод истечения теплоносителя

Динамика жидкости в заданном поле течения определяется нестационарным уравнением сохранения энергии Бернулли, которое для линии тока Γ , со-

единающей открытой конец трубопровода с выходным сечением трещины. Для определения интенсивности истечения теплоносителя использовались соотношения [1]:

$$\Delta P = P - P_{AT} = P_C + P_A = \frac{1}{2}(\alpha + \xi)\rho V^2 + \rho \int_r \frac{\partial U_S}{\partial t} dr, \quad (10)$$

где P_C - перепад давления, обусловленный конвективными ускорениями и диссипацией энергии на поверхности трещины; P_A - перепад давления, обусловленный локальными ускорениями; ξ - коэффициент гидравлического сопротивления; α - число Кориолиса; ρ - плотность жидкости; V - скорость течения в струе; U_S - тангенциальная компонента скорости течения воды в трубопроводе; t - время. В дальнейшем полагаем $P_A \ll P_C$, т.е. считаем, что поле течения ведет себя как квазистационарное.

Решая уравнение (10) относительно V , находим

$$V = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \xi}} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}. \quad (11)$$

Коэффициент гидравлического сопротивления определяется суммой:

$$\xi = \xi_m + \xi_{mp}, \quad (12)$$

где ξ_m - коэффициент местного сопротивления входа жидкости в трещину; ξ_{mp} - коэффициент сопротивления трению, обусловленный вязкими свойствами жидкости; α - число Кориолиса. Коэффициенты сопротивления и число Кориолиса уточнялись экспериментально. Критическими областями являются те области, где истечение теплоносителя меньше 38 л/мин [2-5].

Заключение.

Вышеописанные методы и подходы были применены в соответствии с требованиями нормативных документов [2-5]. Проанализированы результаты истечения теплоносителя, отметим, что для главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) расход теплоносителя больше 38 л/мин, а именно: $Q \geq 420$ л/мин. Таким образом, все расчетные соединения ГЦТ проходят с большим запасом по критерию безопасности ТПР.

Результаты истечения теплоносителя по сварным соединениям дыхательного трубопровода (ДТ), так же проходят по критерию безопасности ТПР, но с существенно меньшим запасом, даже очень близким к критическим значениям, т.к. их параметр Q лежит в пределах 56 л/мин $> Q \geq 38$ л/мин.

Методология ТПР [2] показывает, что чувствительность систем контроля течей должна быть не менее 3,8 л/мин с учетом временного интервала 60 минут на реакцию персонала по реагированию на утечку теплоносителя.

Минимальная чувствительность необходимая для обнаружения утечек для всех сварных соединений ГЦТ и ДТ можно определить согласно следующей формуле [2-5]: $Q_{sk} = Q/n$, где Q – максимальный расход теплоносителя через стабильную трещину длиной $l_t = 2c_t$; n - коэффициент, обеспечивающий 10-и кратный запас, $n = 10$, k – номер сварного соединения.

Далее (рис. 4) представлена схема трубопровода ГЦТ ВВЭР-440 с указанием номеров сварных соединений и минимальной чувствительности Q_{sk} необходимой для обнаружения утечек. Например:

02	1	7
3,9		

где 102 – стационарный номер сварного соединения, а 73,9 – минимальная необходимая чувствительность Q_{s102} (л/мин) для данного сварного соединения:

$$Q_{s102} = 73,9 \text{ л/мин.}$$

Также стоит отметить, что стрелкой показаны сварные соединения с минимальной чувствительностью по отношению к остальным сварным соединениям этой петли.

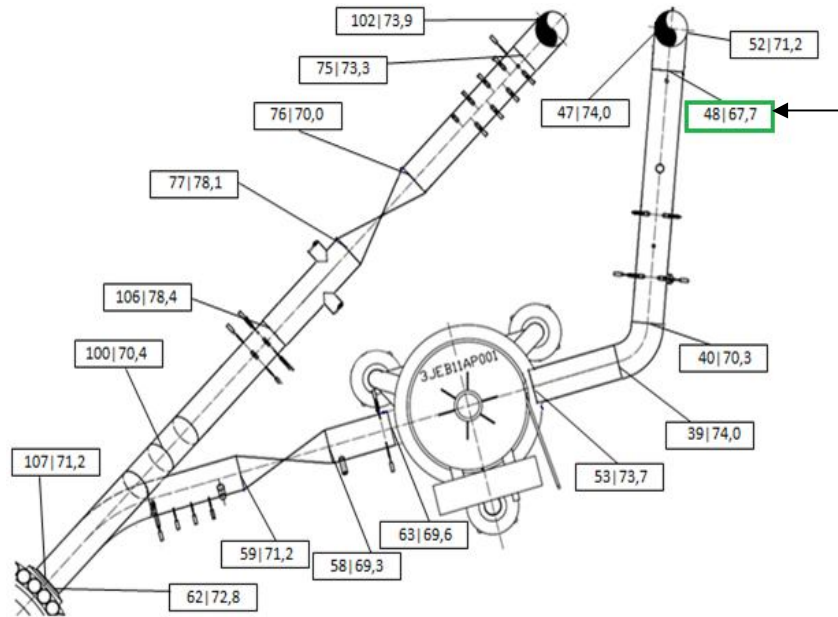


Рис. 4. Схема петли ГЦТ ВВЭР-440

Выводы.

Выполнен расчетно-аналитический и экспериментальный комплекс исследований для обеспечения безопасности эксплуатации главных трубопроводов Ду500 (ГЦТ) и Ду200 (ДТ) реакторной установки ВВЭР-440.

Исследования выполнены с учетом фактического состояния трубопроводов, включая оценку состояния трубопроводов, условий предстоящей эксплуатации, режим МРЗ и режим стратификации для дыхательного трубопровода.

Результаты исследования показали:

1. Безопасность эксплуатации главных трубопроводов Ду500 (ГЦТ) и Ду200 (ДТ) реакторной установки ВВЭР-440 обеспечивается в полном объеме, для сварных соединений указанных трубопроводов и для всех режимов эксплуатации, включая НУЭ и НУЭ+МРЗ.

2. Определены минимальные чувствительности для ГЦТ $Q_s=67,7$ л/мин, необходимые для обнаружения утечек через устойчивые сквозные трещины в трубопроводах, которые существенно больше, чем минимально допустимые чувствительности, принятые в международной практике $Q_s=3,8$ л/мин [2-5] и для ДТ $Q_s=10,0$ л/мин.

Рекомендации.

1. Установить системы контроля течей:

Для ГЦТ - 60 л/мин; ДТ - 10 л/мин.

2. По российскому нормативному документу [8] допускается использование двух специальных систем контроля течей, поэтому рекомендуется использовать две независимые системы контроля течей в рамках ТПР, а именно:

- по влажности и по радиоактивным аэрозолям;
- по влажности и по шумовой диагностике;
- по радиоактивным аэрозолям и по шумовой диагностике.

Л и т е р а т у р а

1. Гетман А.Ф. Концепция безопасности «течь перед разрушением» для сосудов и трубопроводов давления АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1999. – 258 с.
 2. PNM340880181. Leak Before Break Methodology. Словакия. – 2009.

3. NUREG-1061, Vol. 3, Report of the U.S. Nuclear Regulatory Commission Piping Review Committee, Evaluation of the Potential for Pipe Breaks, November 1984.
4. Requirements for composing and contents of safety reports and their amendments. Procedure for specifying proof of leak before break. Detection systems of leakage from cooling circulation of nuclear reactor. CSKAЕ, 1/1991, UJI, Прага-Збраслав.
5. Руководство по применению концепции безопасности течь перед разрушением к трубопроводам действующих АЭУ. РД ЭО 1.1.2.05.0939, 2013. – 118 с.
6. NUREG-6235 Assessment of short through-wall circumferential cracks in pipes, April 1995.
7. Методические рекомендации. МР 125-02-95. Правила составления расчетных схем и определение параметров нагруженности элементов конструкций с выявленными дефектами. М.: ЦНИИТМАШ, 1995. – 52 с.
8. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПН АЭ Г-7-008-89). М.: НТЦ ЯРБ Госатомнадзора России, 1989.

References

1. Getman, A.F. (1999). «Leak Before Break» Safety Concept for NPP Pressure Vessels and Piping, Moscow: Energoatomizdat, 258 p.
2. PNM340880181. Leak Before Break Methodology, Slovakia, 2009.
3. NUREG-1061, Vol. 3, Report of the U.S. Nuclear Regulatory Commission Piping Review Committee, Evaluation of the Potential for Pipe Breaks, November 1984.
4. Requirements for Composing and Contents of Safety Reports and Their Amendments. Procedure for specifying proof of leak before break. Detection systems of leakage from cooling circulation of nuclear reactor, CSKAЕ, 1/1991, UJI, Praha-Zbraslav.
5. Guidance on the application of the safety concept «leak before break» operating pipelines NPP. RD EO 1.1.2.05.0939, 2013.
6. NUREG-6235, Assessment of short through-wall circumferential cracks in pipes, April 1995.
7. MR 125-02-95 «Rules of drawing up structural models and definition of parameters of loads for structure elements with discovered defect», TzNIITMASH, Moscow, 1995.
8. PNAE G-7-008-89 «Rules of arrangement and safe operation of nuclear power unit equipment and pipeline», NRS of Gosatomnadzor of Russia, 1989.

**INVESTIGATION OF THE CONDITIONS OF SAFETY ENSURE OF
THE MAIN CIRCULATING PIPELINE ON THE BASIS OF THE LBB CONCEPT**

D.A. Kuz'min
VNIIAES, Moscow, Russia

The conditions of safety ensure based on the LBB concept were investigated. The methods and approaches used for the calculations based on the LBB concept are shown. The results of this work were derived for NPP VVER -440, using the regulations of the USA, Slovakia, the Czech Republic and Russia in the LBB concept.

Keywords: the concept of "leak before break", the pipeline, a critical crack length, crack stability, flow and sensitivity control system leakage.

