

УДК 620.179

А.Ю. Сидоров, В.Е. Десятников, Д.В. Коробов**КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ
ПЕРВОГО КОНТУРА СУДОВЫХ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК
НЕРАЗРУШАЮЩИМИ МЕТОДАМИ КОНТРОЛЯ**АО «Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова»,
г. Нижний Новгород

Приводятся результаты проведенных комплексных исследований состояния трубопроводов первого контура судовых реакторных установок неразрушающими методами контроля (акустические и вибрационные), с целью обоснования безопасной эксплуатации атомной реакторной установки (РУ) в пределах продляемого ресурса и срока службы систем и оборудования.

Ключевые слова: система компенсации давления (СКД); система охлаждения и расхолаживания (СОиР); накопленная эксплуатационная поврежденность; собственная частота; вынужденные колебания трубопроводов.

Введение

Трубопроводы в энергетических установках являются одним из самых распространенных элементов. Трубопроводы связаны с агрегатами высокого давления, циркуляционными насосами, турбоагрегатами, с элементами, имеющими большие нестационарные расходы рабочих сред [1].

На трубопроводы энергетических установок воздействует сложный спектр нагрузок, обусловленных конструктивно-технологическими и эксплуатационными факторами, который вызывает в них переменные и постоянные напряжения. Уровень напряжений определяется как видом и интенсивностью нагрузок, так и пространственно-геометрическими особенностями трубопроводов, жесткостью отдельных участков труб и опор, механическими и упругопластическими характеристиками материалов трубопроводов, их элементов и опор. В частности, эксплуатационная поврежденность материала конструктивных элементов трубопроводов СКД и СОиР, входящих в состав системы первого контура РУ, в той или иной степени зависит от термо- и вибронагруженности оборудования.

Длительный срок эксплуатации приводит к проявлению различных механизмов деградации конструкционных материалов, значительная часть которых происходит скрытно и поврежденное состояние материала конструктивного узла не может быть выявлено в течение инкубационного периода традиционными методами неразрушающего контроля. Примером такого инкубационного периода является фаза накопления рассеянных по объему материала усталостных повреждений, предшествующая образованию усталостной трещины. Поэтому важную роль играет определение состояния объектов, которое вследствие воздействия внешних и внутренних факторов изменяется с течением времени.

В штатных эксплуатационных условиях для несменяемого оборудования и систем основными механизмами деградации конструкционных материалов (за исключением активной зоны) являются [2]:

- многоцикловая термическая усталость;
- малоцикловая термическая усталость;
- развитие усталостных трещин;
- коррозия под напряжением.

Вибрации трубопроводов часто могут достигать значительных величин и служить причиной разрушения элементов энергетических установок. Их длительная работа с повы-

шенной вибрацией может привести к увеличению темпов накопления усталостных повреждений элементов трубопроводов, сокращению их усталостной долговечности, зарождению и развитию усталостных трещин. Распространенным видом отказа является разгерметизация трубопроводов из-за их усталостных разрушений при вибрации.

Оценка вероятности появления дефектов трубопроводов при конкретных условиях их работы в общем случае включает задачу по определению фактической поврежденности конструкционного материала трубопроводов и характеристик вибраций, которым подвергаются конструкции энергетических установок. Поэтому большое значение имеют экспериментальные комплексные исследования фактического состояния элементов трубопроводов. Данные исследования дают важную реальную информацию о нагруженности трубопроводов, а периодический контроль за величинами накопленной эксплуатационной поврежденности материала трубопроводов позволяет расчетному анализу проводить оценку их текущего состояния и как следствие определять остаточный ресурс.

Цель и методика исследований

Целью обследований являлось:

- экспериментальное определение накопленной эксплуатационной поврежденности материала конструктивных элементов СКД и СОиР РУ;
- определение собственных частот участков трубопроводов СКД и СОиР;
- определение уровней вынужденных колебаний участков трубопроводов при работающем оборудовании.

Определение накопленной эксплуатационной поврежденности материала

Объектами исследований для определения накопленной эксплуатационной поврежденности являлся материал околошовных зон сварных соединений трубопроводов СКД и СОиР РУ атомных ледоколов. Контролируемые узлы выбирались на основании результатов прочностных расчетов, опыта проектирования, эксплуатации и анализа имевших место отказов.

Ключевым вопросом в проблеме мониторинга технического состояния оборудования и систем ЯЭУ атомных ледоколов является вопрос выбора физического метода определения характеристик поврежденности материала, а также проведение комплекса экспериментальных исследований с целью установления соответствующих функциональных или корреляционных связей. Среди неразрушающих физических методов контроля состояния материала одним из наиболее перспективных следует признать акустический метод.

В настоящее время в АО «ОКБМ Африкантов» проходит экспериментальную отработку, адаптацию и внедрение для контроля оборудования и трубопроводов, определяющих ресурс РУ, метод контроля накопленной эксплуатационной поврежденности. Актуальность такого контроля несомненна, так как именно в сварных соединениях трубопроводов происходит зарождение основной массы макродефектов.

Акустический метод контроля поврежденности реализован в системе ИВК «Астрон», состоящего из средств измерения и математического обеспечения, позволяющего по результатам измерений параметров акустических импульсов, распространяющихся в материале объекта контроля, проводить оценку объемной поврежденности материала.

ИВК «Астрон» (ООО «Интеллект-НН») предназначен для измерения временных интервалов между импульсами упругих волн, распространяющимися в материале исследуемого объекта, и отношения размахов регистрируемых импульсов.

Измерения накопленной поврежденности конструктивных элементов трубопроводов 1-го контура атомных ледоколов проводились по обе стороны от валика усиления сварного шва (в технически возможном объеме) в четырех точках поперечных сечений околошовных (у края валика усиления шва) и периферийных (60 мм от края валика усиления шва, в зоне основного металла) областей. Точки измерений расположены эквидистантно по сечению трубы (рис. 1).

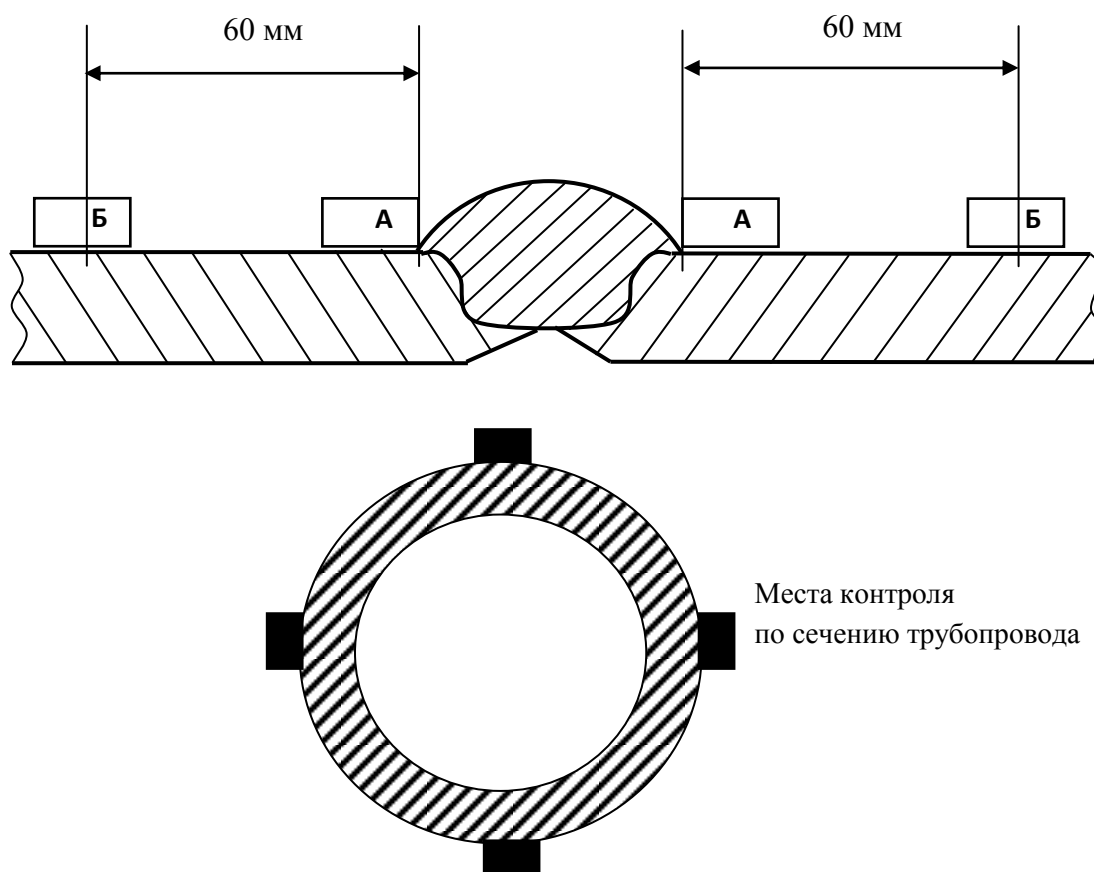


Рис. 1. Расположение точек измерения относительно валика усиления сварного шва:

А – датчик, производящий измерения в околошовной области;

Б – датчик, производящий измерения в периферийной (зона основного металла) области

В процессе исследований проводились измерения задержек импульсов объемных волн с продольной и поперечной поляризацией необходимых для расчета накопленной эксплуатационной поврежденности материала по разработанной методике.

Для расчета накопленных повреждений использовался подход, связывающий процесс деградации материала с изменениями параметров акустических волн. В основу подхода заложено то, что наиболее адекватная мера наработки материала для процесса накопления усталостных повреждений в объеме материала является плотность энергии, затраченная на образование дефектов в данном объеме [1]. Предельное состояние данного объема материала (образование макроскопической трещины определенной длины) достигается тогда, когда энергия, затраченная на образование дефектов, достигает критической величины. То есть методика расчета накопленных повреждений основана на определенной связи между энергией, затраченной на пластическое деформирование, и параметрами акустических волн.

Методика была отработана на образцах из сталей аустенитного и перлитного класса при испытаниях на многоцикловую и малоцикловую усталость при одноосном симметричном растяжении – сжатии и термопульсациях [3].

Исследование вибрационного состояния элементов трубопроводов

Для исследования вибрационного состояния трубопроводов СКД и СОиР использовалась измерительная система, состоящая из измерительно-вычислительного комплекса (ИВК) МІС-200 с усилителем заряда типа МЕ-908 (ООО НПП «Мера») и пьезоакселерометров типа 4371. ИВК МІС-200 оснащен специализированными программными пакетами регистрации и математической обработки, полученных временных сигналов.

Пространственные схемы исследуемых трубопроводов СКД и СОиР приведены на рис. 2, 3.

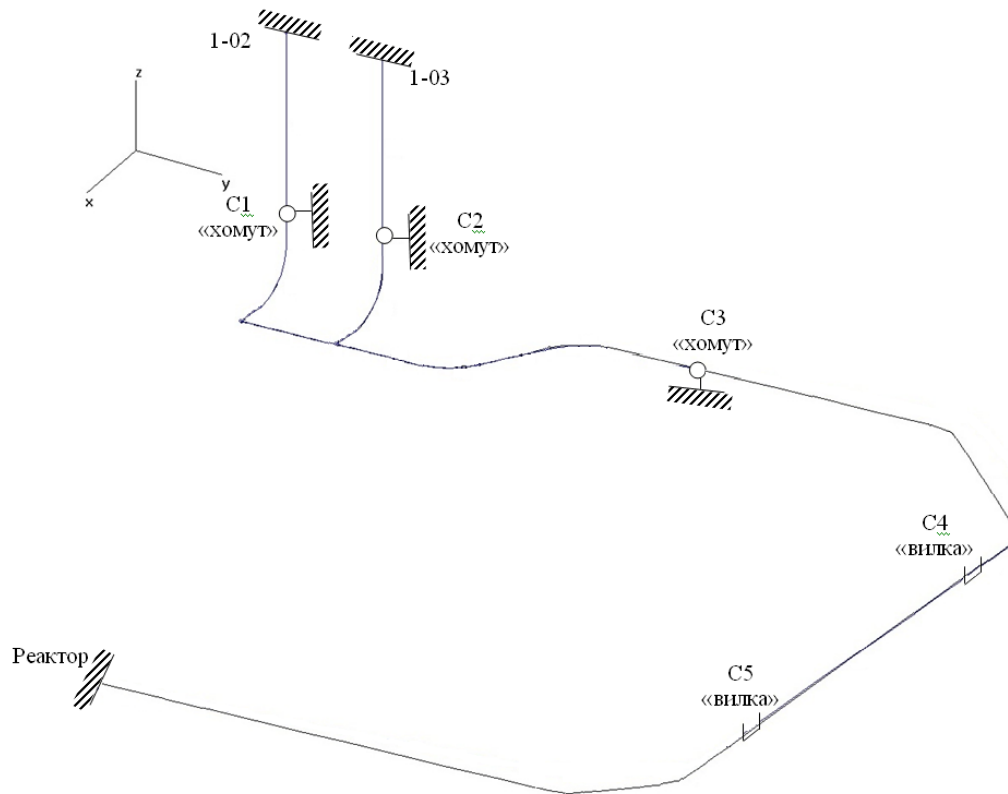


Рис. 2. Пространственная схема трубопроводов СОиР

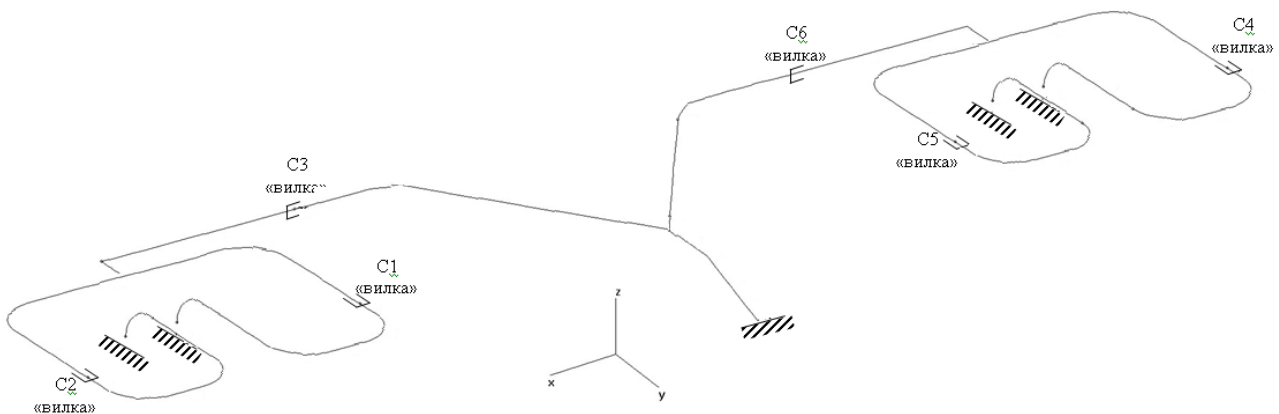


Рис. 3. Пространственная схема трубопроводов СКД

Одной из задач определения собственных частот являлась проверка функционирования опор трубопроводов. При колебаниях трубопроводов возникают усилия, под действием которых происходит деформирование опор, вследствие чего происходят перемещения и повороты опорных сечений трубопроводов. Упругие деформации опор снижают собственные частоты колебаний трубопроводов [2].

Важным этапом, в рамках проведенных исследований, являлась проверка выполнения условий отстройки собственных частот от вынужденных колебаний, вызываемых внешним оборудованием (например, циркуляционным насосом). Условие отстройки собственных частот для первых трех форм колебаний принималось в виде [4]:

$$\Omega_i / \omega \geq 1,3 \text{ или } \Omega_i / \omega \leq 0,7,$$

где ω – частота возбуждения; Ω_i – низшая собственная частота колебаний ($i=1,2,3$).

Определение собственных частот колебаний участков трубопроводов выполнялось "методом начальных отклонений". Измерения проводились в серединах участков трубопроводов между опорами в двух взаимоперпендикулярных направлениях. Обработка полученных результатов осуществлялась в программном продукте WinПОС (ООО НПП «Мера»).

Определение параметров вынужденных колебаний участков трубопроводов СОиР проводилось при штатных параметрах работы насосного оборудования. При работающем насосном оборудовании фиксировались параметры вибрации в двух взаимоперпендикулярных направлениях в серединах участков трубопроводов.

В качестве параметра для оценки вибропрочности трубопроводов была выбрана амплитуда виброперемещения, которая пропорциональна возникающим в трубопроводах напряжениям и является показателями прочности трубопроводов (в случае колебаний близких к гармоническим) [2].

Исходя из анализа эксплуатируемого оборудования первого контура, являющегося источником вынужденных колебаний трубопроводов, был выбран частотный диапазон до 1000 Гц, учитывающий оборотные и лопастные частоты циркуляционных насосов. Высоко-частотные вибрации, обусловленные акустическими шумами и кавитационными процессами, не рассматривались в виду незначительного влияния на прочность конструкции.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Определение накопленной поврежденности в материале трубопроводов

По измеренным задержкам ультразвуковых импульсов в зонах контроля с помощью разработанной методики проведен расчет накопленной эксплуатационной поврежденности материала околошовных зон сварных соединений трубопроводов 1-го контура атомных ледоколов.

В целом полученные данные свидетельствуют о хорошей чувствительности акустического метода к структурным изменениям в материале контролируемых трубопроводов и возможности выявления опасных мест, которые невозможно учесть в расчетах.

По итогам проведенных исследований, значение поврежденности материала трубопроводов СКД и СОиР не превышает 0,2.

Исследование вибрационного состояния элементов трубопроводов

В результате проведенных исследований были получены осциллограммы свободных затухающих колебаний доступных участков трубопроводов СКД и СОиР. С использованием математического аппарата программного пакета WinПОС получены спектры колебательных процессов. По результатам анализа полученных спектров были определены низшие частоты собственных колебаний участков трубопроводов, которые составили: 18,8 Гц и 22,0 Гц для трубопроводов СКД и СОиР соответственно (рис. 4, 5).

Полученные собственные частоты полностью удовлетворяют условиям отстройки от возбуждающей вынужденной частоты вибрации, возникающей как от работающего оборудования, так и при движении судна.

В результате исследований вибраций трубопроводов СОиР при работающем оборудовании получено, что максимальная амплитуда виброперемещения зафиксирована на номинальной частоте вращения двигателя циркуляционного насоса расхолаживания и не превышала 40 мкм. При таком уровне вибраций амплитуда напряжений, возникающих в трубопроводе, значительно меньше уровня допускаемых напряжений.

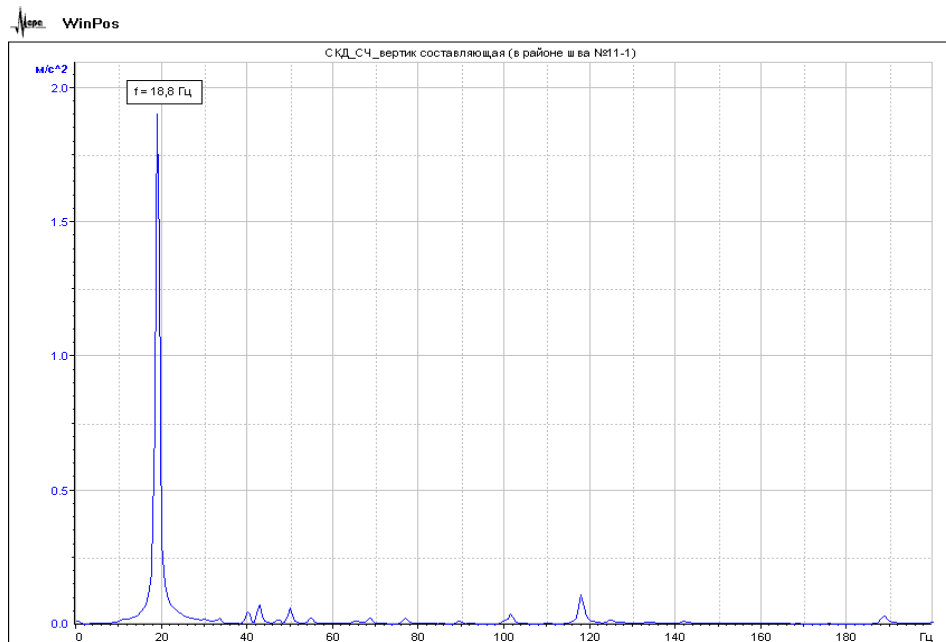


Рис. 4. Низшие частоты собственных колебаний трубопроводов СКД в вертикальном направлении

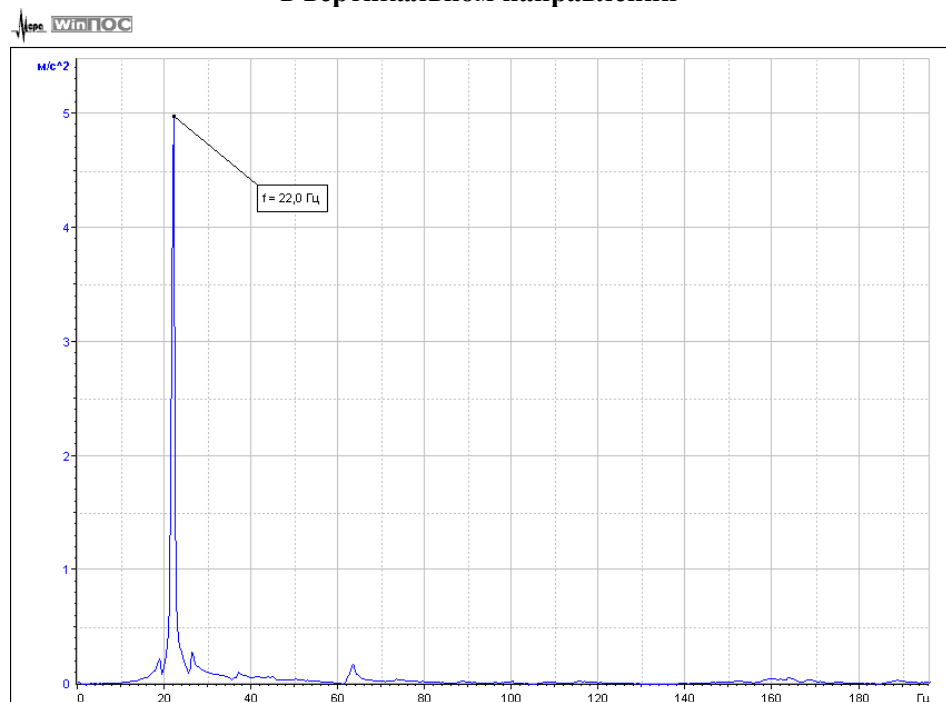


Рис. 5. Низшие частоты собственных колебаний трубопроводов СОиР в вертикальном направлении

Заключение

По результатам комплексных исследований определены параметры воздействия вибрационных нагрузок, создаваемых оборудованием РУ, фактическое состояние материала трубопроводных систем и подтверждено соответствие элементов трубопроводов требованиям нормативной документации.

Результаты исследований позволили провести уточненный расчет напряженно-деформированного состояния конструкции и степени поврежденности исследуемых трубопроводных систем первого контура для обоснования дальнейшей безопасной эксплуатации РУ.

Библиографический список

1. Методы обоснования ресурса ядерных энергетических установок / Ф.М. Митенков, В.Б. Кайдалов, Ю.Г. Коротких [и др.]; под общ. ред. Ф.М. Митенкова. – М.: Машиностроение, 2007.– 448с.
2. **Самарин, А.А.** Вибрации трубопроводов энергетических установок и методы их устранения / А.А. Самарин. – М.: Энергия, 1979. – 288 с.
3. **Захаров, Д.А.** Методология оценки накопленных повреждений акустическим методом в сталях аустенитного класса при малоцикловом нагружении / Д.А.Захаров [и др.] // Наука и технологии: материалы XXXIV Всероссийской конференции, посвященной 90-летию со дня рождения академика В.П. Макеева. – М.: РАН, 2014. – Т. 3.– С. 96–105.
4. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок ПНАЭ Г-7-002-86. – М., 1986.

*Дата поступления
в редакцию 12.01.2017*

A. YU. Sidorov, V. Y. Desyatnikov, D. V. Korobov

**A COMPREHENSIVE STUDY OF THE PIPELINES OF THE PRIMARY CIRCUIT
OF THE SU-DOVICH REACTOR INSTALLATIONS
OF NON-DESTRUCTIVE METHODS**

JSC «Experimental design bureau of machine building named after I. I. Afrikantov»,
Nizhny Novgorod

The article presents the findings of a comprehensive study of the condition of pipelines of the first contour of reactor installations of marine non destructive testing (acoustic and vibration), to justify safe operation of a nuclear reactor unit (ru) within the renewable resource and service life of systems and equipment.

Key words: pressure compensation system (acs); cooling system and cooling (soir); the cumulative operational damage; natural frequency; forced vibrations of pipelines.