УДК 621. 039

КРИТЕРИИ НОРМИРОВАНИЯ ВИБРАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ АЭС

Е. С. Агейкина, Ю. Л. Коврижкин[1], В. И. Скалозубов

[1]НАЭК «Энергоатом», Киев
Одесский филиал ГП «Государственный научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности»

Приведена методика нормирования вибрационного состояния трубопроводов и рассмотрены критерии обоснования нормативных требований к вибрационным нагрузкам на трубопроводы при работе реактора на мощности.

Актуальность проблемы

Требования по вибрационным характеристикам элементов трубопроводов включаются обычно в технические условия на конструкцию энергетических установок. Удовлетворение технических условий при создании установок практически всегда контролируется в процессе сдаточных или пусковых испытаний, после которых при необходимости производится доводка характеристик, в том числе и вибрационных.

Однако до настоящего времени отсутствуют нормативные требования к допустимым вибрационным нагрузкам трубопроводов АЭС Украины при работе реактора на мощности (в стационарных режимах). Необходимость таких норм определяется, в первую очередь, следующими эксплуатационными задачами:

– для контроля вибрационного состояния и управления старением трубопроводных систем;

– для реализации программ оценки технического состояния и переназначения ресурса/сроков службы трубопроводных систем.

В работах [3, 8] проведен анализ опыта нормирования вибрационного состояния трубопроводов, в результате которого показано:

– применение известных подходов (например, [6, 7, 9]) нормирования вибрационного состояния трубопроводов по виброскорости и виброперемещениям имеют определенные ограничения, связанные с отсутствием возможности получения универсальных нормативных критериев, не зависящих от геометрических и технических характеристик трубопроводных систем;

– основополагающим критерием вибрационного состояния трубопроводов являются нормированные условия прочности при высокочастотных циклических нагрузках в соответствии с требованиями/положениями ПНАЭ Г-7-002 [1] (далее - Нормы);

– основным нормируемым критерием вибропараметров должны быть допустимые амплитуды вибронапряжений $\langle \sigma_a \rangle$;

– использование для нормирования вибрационного состояния таких вибропараметров, как виброскорость, виброперемещения и виброускорения, целесообразно в случае возможности получения тарировочных зависимостей от вибронапряжений.

В настоящей работе представлен метод нормирования вибрационных нагрузок на трубопроводы по вибронапряжениям.

Основные положения по обоснованию критериев вибрационного состояния

1. Колебания, вызванные вибрацией, являются высокочастотными по отношению к изменению параметров в стационарных и переходных режимах работы реакторной установ-

ки (РУ). В стационарных режимах работы РУ высокочастотные вибрации являются доминантным фактором, влияющим на условия циклической прочности.

В соответствии с п. 5.12 Норм условия циклической прочности при вибрации фактически сводятся к оценке следующих нормативных показателей:

– критерия допустимого количества циклов нагружения и допустимых напряжений, вызванных вибрационными нагрузками;

– критерия отстройки собственных частот колебаний от детерминированных частот возмущения;

– критерия на отсутствие виброударных взаимодействий элементов конструкций с целью исключения повышенного износа.

2. Условием возникновения длительных циклических вибронагрузок является изменение определяющего влияния прочностных характеристик материалов трубопроводов и сварных соединений: при вибронагрузках определяющими прочностными характеристиками являются показатели выносливости R_{-1}^T и длительной прочности R_{mt}^T, а при отсутствии длительных вибронагрузок показатели упругости E^T и пластичности e_c^T.

С учетом этих положений условие длительных циклических вибронагрузок определяется из нормативных условий циклической прочности (п. 5.6.6 Норм, формула 5.25):

$$N_B > [Д] = \frac{1}{4}\left[\frac{E^T e_c^T}{R_{-1}^T}\left(1+\frac{R_{-1}^T}{R_m^T}\cdot\frac{1+r}{1-r}\right)\right]^{\frac{1}{m}}. \qquad (1)$$

При определении допустимых амплитуд вибронапряжений $\langle\sigma\rangle_{доп}$ принимаются следующие дополнительные положения:

– в области относительно недлительных вибронагрузок (N_B < [Д]) допустимые амплитуды вибронапряжений определяются номинально допустимой амплитудой условных упругих напряжений с учетом локальной концентрации $[\sigma_{aF}]$;

– в области длительных вибронагрузок допустимые амплитуды вибронапряжений определяются прочностными характеристиками выносливости R_{-1}^T и длительной прочности R_m^T.

Таким образом, критерии допустимых амплитуд вибронапряжений следующие:

при $N_B \le [Д]$

$$\langle\sigma_a\rangle_{доп} \le [\sigma_{aF}]; \qquad (2)$$

при $N_B > [Д]$

$$\langle\sigma_a\rangle_{доп} \le \frac{0{,}4R_{mt}^T}{1+0{,}4\dfrac{1+r}{1-r}}. \qquad (3)$$

Условие прочности при вибрационных нагрузках имеет вид

$$\frac{\mu_{Bi}N_{Bi}}{[N_0]_i([\sigma_{aF}])} \le [a_N] - a_1 - a_3, \qquad (4)$$

где N_{Bi} – число вибрационных циклов i-го типа за время эксплуатации; $[N_0]_i$ – допускаемое число вибрационных циклов i-го типа; $[a_N]$ – предельное значение накопленного усталостного повреждения; a_1 – повреждение от эксплуатационных циклов нагружения, на которые не накладывались высокочастотные нагружения (сумма отношений числа таких циклов за период эксплуатации к соответствующему допустимому числу циклов нагружения); a_3 – сумма повреждений от высокочастотных напряжений в течении циклов переменных напряжений на переходных эксплуатационных режимах a_3^* и при прохождении резонансных частот a_3^{**} в тех же циклах.

Из уравнений усталостных кривых циклических нагрузок (п. 5.6.6 Норм, формула 5.25) следует:

$$\mu_{Bi} = \begin{cases} \sqrt[m]{\dfrac{\langle \sigma_a \rangle_{максi} - R}{[\sigma_{aF}] - R}}, & \text{при } \langle \sigma_a \rangle_{максi} > R; \\ 0, & \text{при } \langle \sigma_a \rangle_{максi} \le R. \end{cases} \tag{5}$$

где μ_{Bi} – коэффициент, определяющий весовой вклад вибрационных колебаний в повреждения трубопроводов и сварных соединений при стационарных режимах работы реактора.

$$R = \frac{R_{-1}^{T}}{n_{\sigma}\left(1 + \dfrac{R_{-1}^{T}}{R_{m}^{T}} \cdot \dfrac{1+r}{1-r}\right)}. \tag{6}$$

Критерии (2), (3) и (4) являются нормами вибрационного состояния трубопроводов по допустимым циклам напряжений в стационарных режимах РУ. Для определения этих условий необходимы:

– эксплуатационные данные о циклах нагружения в переходных режимах (a_1, a_3);

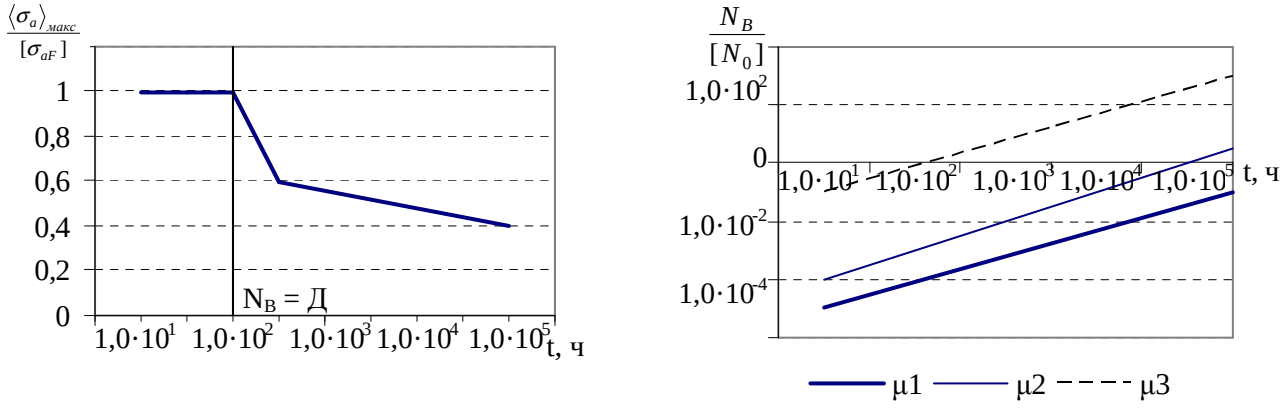
– эксплуатационные данные по измерениям основных частот f_i и соответствующего времени t_{Bi} i-го типа вибрационного состояния;

– конструкционные и прочностные характеристики трубопроводной системы;

– эксплуатационные данные по измерениям вибронапряжений в критических элементах трубопроводных систем.

Примеры расчетных обоснований

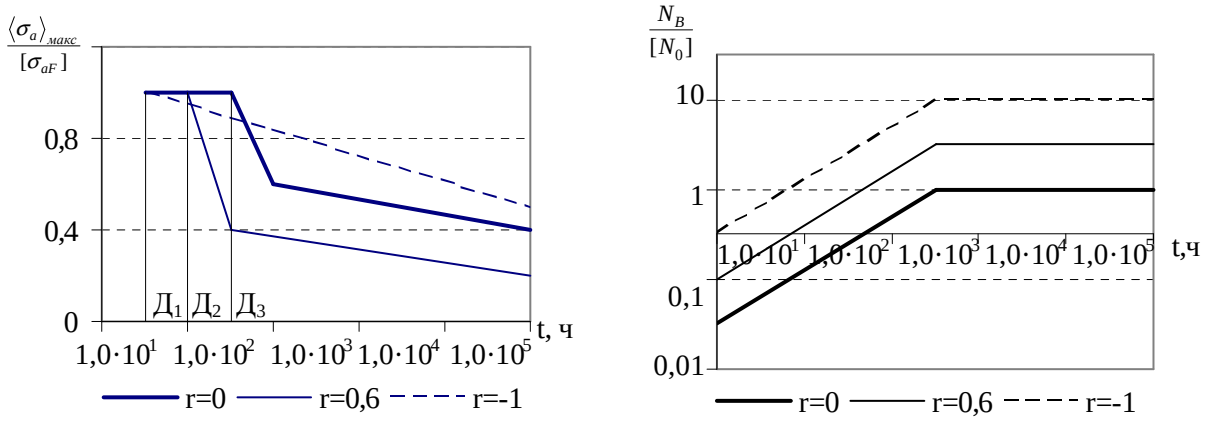
На рис. 1 – 3 приведен пример расчета условий выполнения норм вибрации по допустимым напряжениям для главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) ВВЭР-1000 при различных допущениях.



а *б*

Рис. 1. Пример оценки выполнимости норм вибрации по допустимым вибронапряжениям при $\mu_1 = 10^{-4}$; $\mu_2 = 10^{-3}$; $\mu_3 = 0{,}347$:

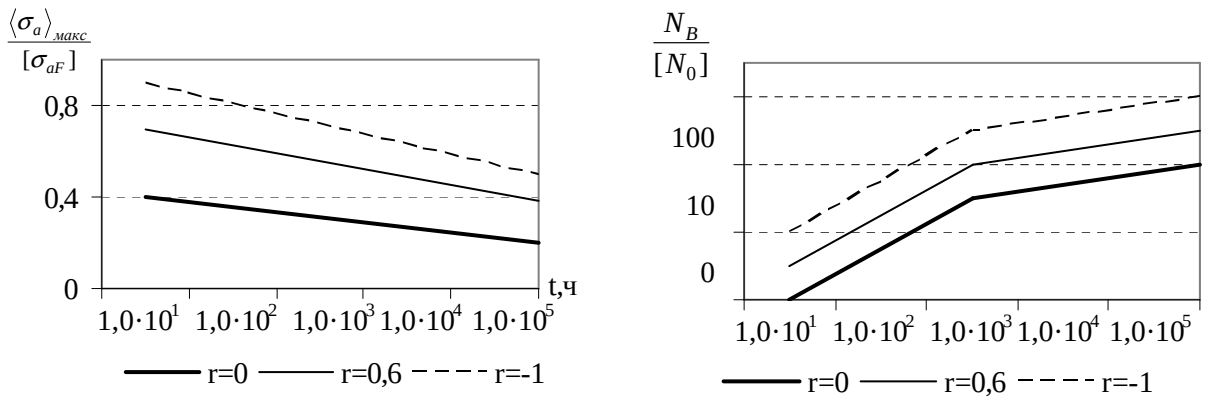
а – зависимость $\dfrac{\langle \sigma_a \rangle_{\max}}{[\sigma_{aF}]}$ от времени; *б* – зависимость $\dfrac{N_B}{[N_0]}$ от времени.



а *б*

Рис. 2. Пример оценки выполнимости норм вибрации по допустимым вибронапряжениям при различных значениях коэффициента ассиметрии *r* и частоте *f* = 1 Гц:

а – зависимость $\frac{\langle\sigma_a\rangle_{\max}}{[\sigma_{aF}]}$ от времени; *б* – зависимость $\frac{N_B}{[N_0]}$ от времени.



а *б*

Рис. 3. Пример оценки выполнимости норм вибрации по допустимым вибронапряжениям при различных значениях коэффициента ассиметрии *r* и частоте *f* = 10 Гц:

а – зависимость $\frac{\langle\sigma_a\rangle_{\max}}{[\sigma_{aF}]}$ от времени; *б* – зависимость $\frac{N_B}{[N_0]}$ от времени.

Из полученных результатов вариантных расчетов следует:

- увеличение вибронапряжений и основных частот вибраций существенно сокращает допустимые сроки эксплуатации трубопроводов;
- при весовом вкладе вибрационных нагрузок μ_B менее 10^{-4} вибрационные состояния допустимы практически на всем назначенном сроке эксплуатации энергоблока АЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *ПНАЭ Г-7-002-86*. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.
2. *Вибрация* энергетических машин: Справ. пособ. – Л.: 1974. – 464 с.
3. *Агейкина Е.С, Зарицкий Н.С., Клочко В.В., Комаров В.А*. Опыт нормирования вибрационного состояния трубопроводов при работе на мощности реакторной установки // Ядерная и радиационная безопасность. - 2005. - № 3. - С. 69 - 73.

4. *Вильнер П.Д*. Вибростойкость как критерий вибрационной напряженности упругих систем // Проблемы прочности. - 1970. - № 9. - С. 42 - 45.
5. *Самарин А.А*. Вибрация трубопроводов энергетических установок и методы их устранения. - М.: Энергия, 1979. - 288 с.
6. *Повышение* динамической надежности и продление срока службы трубопроводов при использовании технологии высоковязкого демпфера // Тяжелое машиностроение. - 2000. - № 8.
7. *Критерии* допустимой вибрации трубопроводов: (Отчет) / ЦКТИ - Вибросейм № 02 Ch NPP/B 4.1/3/040-2000.
8. *Методика* переназначения допустимых циклов нагружения на тепломеханическое оборудование АЭС / НАЭК «Энергоатом» - ОФ ГП ГНТЦ ЯРБ. – 2005.
9. *РД 10-249-98*. Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов / Гостехнадзор России. – 1999.

Поступила в редакцию 03. 07. 06

26 КРИТЕРІЇ НОРМУВАННЯ ВІБРАЦІЙНОГО СТАНУ ТРУБОПРОВОДІВ АЕС

К. С. Агейкіна, Ю. Л. Коврижкін, В. І. Скалозубов

Наведено методику нормування вібраційного стану трубопроводів та критерії обґрунтування нормативних вимог до вібраційних навантажень на трубопроводи під час роботи реактора на потужності.

26 CRITERIA OF THE STANDERTIZATION OF THE VIBRATORY CONDITION PIPELINE NPP

K. S. Ageykina, Yu. L. Kovrizhkin, V. I. Skalozubov

In article is brought methods of the experience of the standertization of the vibratory condition pipeline and is considered criteria of the motivation of the normative requirements to vibratory load on pipelines when working the reactor on powers.