

## МЕТОД РАСЧЕТА ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПРИ ВЫСОКОЧАСОТНОМ НАГРУЖЕНИИ

А.Н. Баранов<sup>1</sup>, С. М. Полищук<sup>1</sup>, А.С. Кипоренко<sup>1</sup>, А.А. Манузин<sup>2</sup>  
(<sup>1</sup>Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков,  
<sup>2</sup>ОП Южно-Украинская АЭС, Южно-Украинск)

*Предлагается метод расчета трубопроводов при высокочастотном нагружении. Приведен алгоритм расчета. Расчет по данному методу позволяет проводить оценку амплитудно-частотных характеристик трубопровода и срока службы.*

***трубопровод, ресурс, амплитудно-частотные характеристики, высокочастотное нагружение***

**Анализ и актуальность проблемы.** Трубопроводы АЭС рассчитанные на номинальное допускаемое напряжение при температуре  $T_t = 350^\circ\text{C}$  и выше, рассчитывают по пределу текучести, временному сопротивлению и пределу длительной прочности (для углеродистых, легированных, кремнемарганцовых и высокохромистых сталей). Ресурс связан с циклами переменных напряжений, а устойчивость элементов конструкций будет обеспечена рядом условий [1]. Амплитуда эксплуатационного напряжения не должна превышать допускаемую амплитуду напряжения  $[\delta_{aF}]$ , получаемую для заданного числа циклов  $N$ .

Допускаемая амплитуда условно упругого напряжения при  $[N_o] \leq 10^{12}$  определяется по формулам

$$\begin{cases} [\delta_{aF}] = \frac{E^T e_c^T}{n_\delta (4[N_O])^m} + \frac{R_c^T}{n_\delta \left[ (4[N_O])^{m_e} + \frac{1+r}{1-r} \right]}; \\ [\delta_{aF}] = \frac{E^T e_c^T}{(4n_N [N_O])^m} + \frac{R_c^T}{(4n_N [N_O])^{m_e} + \frac{1+r}{1-r}}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $n_\delta$ ,  $n_N$  – коэффициенты запаса прочности по напряжениям и числу циклов;  $m$ ,  $m_e$  – характеристики материала;  $r$  – коэффициент асимметрии цикла напряжений;  $R_c^T$  – характеристика прочности;  $e_c^T$  – характеристика пластичности;  $E^T$  – модуль упругости.

Актуальным является расчет на циклическую прочность с учетом высокочастотного нагружения, связанного с пуском, остановкой, изменением мощности, срабатыванием аварийной защиты, пульсациями давления, что вызывает колебания трубопровода. **Целью** данной работы является определение допускаемых амплитуд напряжений при двухчастотном и более нагружениях.

**Метод расчета.** Исходные данные о высокочастотном нагружении получают при анализе результатов измерений при эксплуатации или их расчетом [2]. В расчете допускаемого числа циклов при высокочастотном нагружении используются кривые усталости, полученные по формулам (1).

На рис. 1 приведена расчетная кривая усталости для углеродистых и легированных сталей.

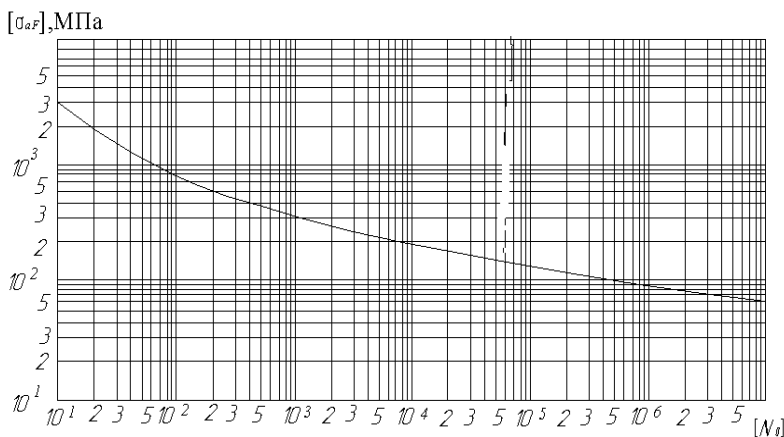


Рис. 1. Расчетная кривая усталости для углеродистых и легированных сталей с  $R_{p0,2}^T/R_m^T \leq 0,7$  до  $T = 350^\circ \text{ C}$

Условие прочности при наличии различных циклических нагрузок проверяется по формуле

$$\sum_{i=1}^k \frac{N_i}{[N_0]_i} = a \leq [a_N], \quad (2)$$

где  $N_i$  – число циклов  $i$ -того типа за время эксплуатации;  $k$  – общее число типов циклов;  $[N_0]_i$  – допускаемое число циклов  $i$ -го типа;  $a$  – накопленное усталостное повреждение, предельное значение которого  $[a_N] = 1$ .

В общем случае

$$a = \max \left\{ (a_1 + a_2 + a_3) / a_2^* \right\} \leq [a_N], \quad (3)$$

где  $a_1$  – повреждение от эксплуатационных циклов нагружения на которые не наложены высокочастотные напряжения;  $a_2$  – повреждения от высокочастотных напряжений при постоянных эксплуатационных напряжениях (стационарные режимы);  $a_2^*$  – повреждение типа  $a_2$ , определяемое для условий нагружения при стационарном режиме, приводящем к наибольшему повреждению за все время эксплуатации;  $a_3$  – сумма повреждений от высокочастотных напряжений в течение циклов переменных напряжений на переходных эксплуатационных режимах  $a_3^*$  и при прохождении резонансных частот  $a_3^{**}$  в тех же циклах.

Накопленные повреждения  $a_1$  и  $a_2$  определяются по формуле (2).

При расчете повреждения  $a_2$  в случае узкополосного спектра используем максимальную среднеквадратическую амплитуду высокочастотных местных напряжений и соответствующую ей частоту. При широкополосном спектре определяем эти повреждения, как сумму амплитуд местных напряжений и соответствующих им частот.

Повреждение  $a_3^*$  определяется с учетом трех максимальных амплитуд высокочастотных напряжений.

Сочетание основного циклического нагружения с амплитудой  $(\sigma_{aF})$  и частотой  $f_0$  и наложенного с амплитудой  $\langle \sigma_a \rangle$  и частотой  $f$  вызывает снижение числа циклов основного низкочастотного нагружения от  $[N_0]$  до  $[N]$ , определяемого по формуле

$$[N] = [N_0] / \aleph, \quad (4)$$

где  $\aleph$  – коэффициент снижения долговечности при наложении высокочастотных циклов, используемых при определении повреждения  $a_3^*$ .

Для основного цикла нагружения  $i$ -го типа повреждения  $a_3^*$  определяются по формуле

$$(a_3^*)_i = \aleph_i N_i / [N_0]_i, \quad (5)$$

Коэффициент  $\aleph$  независимо от степени концентрации напряжений, остаточных напряжений, асимметрии цикла, значения номинальных напряжений и температуры определяют по номограммам [1], или вычисляют по формуле

$$N = (f/f_0)^\eta \frac{\langle \sigma_a \rangle}{(\sigma_a)}, \quad (6)$$

где  $f_0 = 1/(t_1 + t_2)$  – частота основного цикла переменных напряжений, определяемая без учета периода времени, в течении которого происходит наложение дополнительных напряжений на постоянные (рис. 2);  $(\sigma_a)$  – амплитуда приведенных напряжений основного цикла без учета концентрации напряжений;  $\eta$  – коэффициент, зависящий от материала (для углеродистых сталей  $\eta = 1,3$ , для легированных сталей  $\eta = 1,8$ , при отсутствии экспериментальных данных для предварительных оценок значения  $\eta = 2$ ).

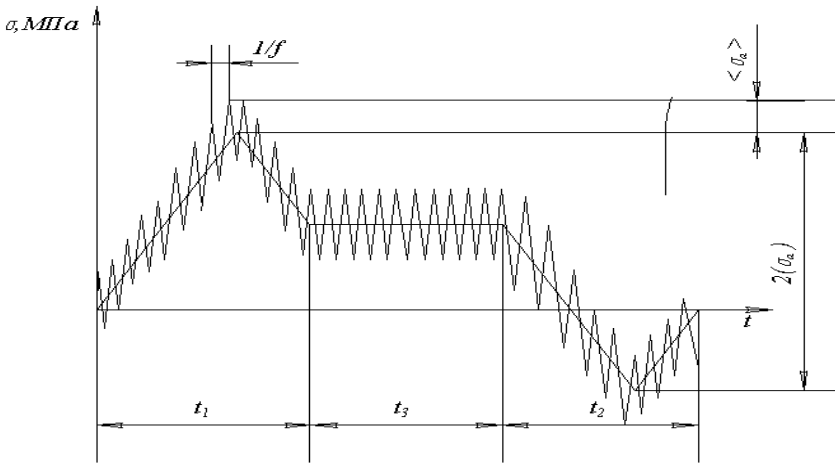


Рис. 2. Форма цикла при двухчастотном нагружении

Расчет при двухчастотном циклическом нагружении применим при выполнении всех следующих условий:

1) отношение амплитуды напряжений  $\langle \sigma_a \rangle$  к амплитуде напряжений  $(\sigma_a)$  находится в интервале

$$0 < \langle \sigma_a \rangle / (\sigma_a) \leq 0,5; \quad (7)$$

2) абсолютное значение максимального и минимального напряжений при двухчастотном нагружении не превышает значения

$$(0,2 \cdot 10^{-2} E^T + R_{p0,2}^T)$$

при расчетной температуре;

3) отношение  $f/f_0$  не превышает  $5 \cdot 10^6$ ;

4) число циклов с амплитудой  $\langle \sigma_a \rangle$  в пределах времени  $t_1 + t_2$  превышает 10 (рис. 2).

Новизна данного метода заключается в решении задачи при двухчастотном нагружении. Авторами разработана программа, позволяющая произвести оценку вибро смещений и вибронпряжений трубопроводных систем при двухчастотном нагружении.

Примером может служить расчет трубопровода всаса от КЭН-2 Ст. (конденсаторные электронасосы 2-й ступени) до ПНД-4 (подогреватель низкого давления) блока №1 Южно-украинской АЭС. На рис. 3 приведена аксонометрическая схема трубопровода.

На рис. 4, 5 представлены результаты расчета максимальных амплитуд вибро смещений по сечениям трубопровода и максимальных амплитуд вибронпряжений соответственно.

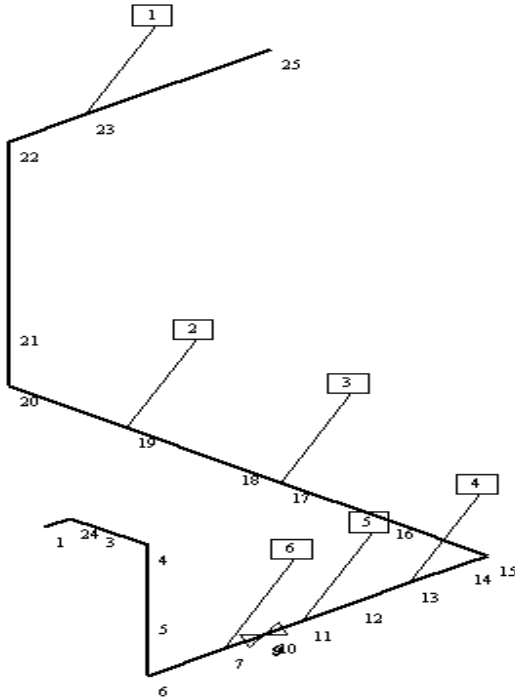


Рис. 3. Аксонометрическая схема трубопровода всаса от КЭН-2 Ст. до ПНД-4 (1-25 – расчетные сечения, цифры в прямоугольниках – опоры и подвески)

$A, 10^{-2}$  см

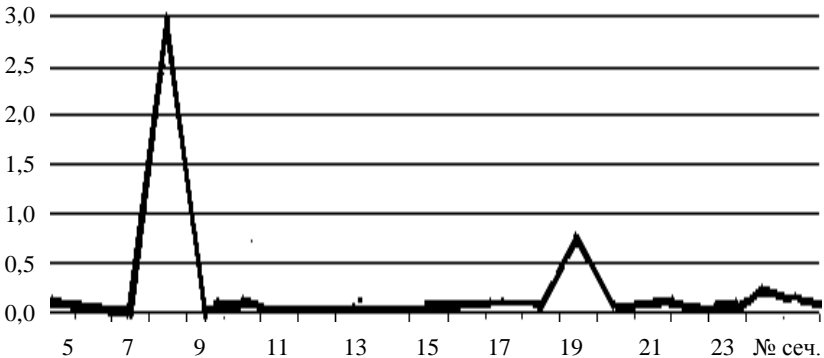


Рис. 4. Расчетная амплитудно-частотная характеристика вибросмещений трубопровода всаса от КЭН-2 Ст. до ПНД-4

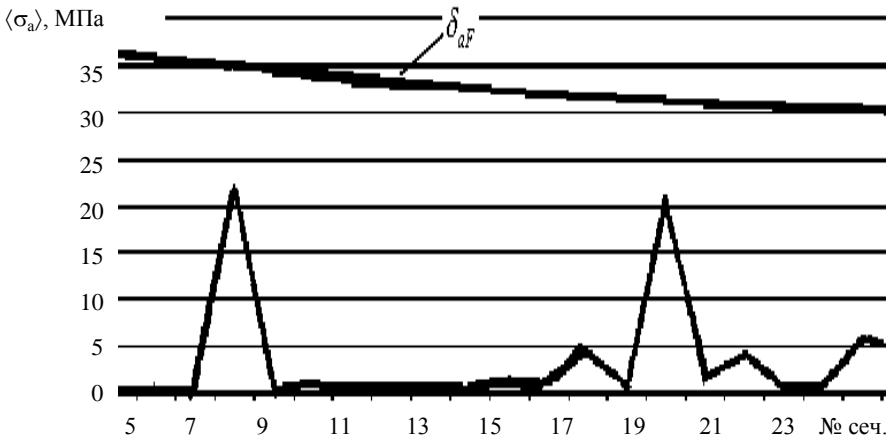


Рис. 5. Расчетная амплитудно-частотная характеристика вибронапряжений трубопровода всаса от КЭН-2 Ст. до ПНД-4

**Выводы.** Таким образом, предложенный метод позволяет произвести оценку амплитуды вибронапряжений в зависимости от амплитудно-частотного возмущения, а также провести оценку остаточного ресурса (срока службы) трубопроводных систем по допускаемым амплитудам напряжения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86) / Госатомэнергонадзор СССР. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.*
2. *Полицук С.М., Гончар И.А. Системный анализ контроля вибрационного состояния трубопроводов энергетических установок // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – Х.: Національний аерокосмічний університет „ХАІ”, 2002. – Вип. 27. – С. 248-251.*

Поступила 20.02.2006

**Рецензент:** доктор технических наук, профессор А.А. Мельниченко,  
Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков.