

УДК 621.039.4:62-78

Г. С. КІПОРЕНКО

Українська інженерно-педагогічна академія, г. Харків, e-mail: kiporenkoannna@mail.ru

РОЗРАХУНКОВИЙ АНАЛІЗ ВІБРАЦІЙНОГО СТАНУ ТРУБОПРОВОДІВ РІВНЕНСЬКОЇ АЕС ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЇХ БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Рассмотрены причины повышенной вибрации трубопроводных систем и построена модель участка трубопровода на основе метода конечных элементов. Определены амплитудно-частотные характеристики и сечения системы с наибольшей амплитудой колебаний. На основе полученных результатов даны рекомендации по снижению вибраций до безопасного уровня путем установки дополнительных опор.

Розглянуто причини підвищеної вібрації трубопровідних систем і побудована модель ділянки трубопроводу на основі методу кінцевих елементів. Визначено амплітудно-частотні характеристики і перетини системи з найбільшою амплітудою коливань. На основі отриманих результатів дано рекомендації щодо зниження вібрацій до безпечного рівня шляхом установки додаткових опор.

Вступ та мета дослідження

У зв'язку із закінченням проектного терміну експлуатації деяких енергоблоків АЕС України, особлива увага приділяється забезпеченню безпеки роботи як окремих елементів обладнання, так і всього паливно-енергетичного комплексу. Одним з факторів, що робить істотний вплив на безпечну роботу енергоустановки, є вібрація трубопровідних систем. На деяких ділянках трубопровідних систем рівень вібрації настільки високий, що призводить до різних ушкоджень (обрив кріплень, утворення свищів і інше) і відмов трубопроводів, і, як наслідок виникають простої енергоблоків і високі матеріальні втрати при проведенні ремонту.

Постановка задачі

Отже, у дійсний час актуальним є розробка заходів з забезпечення безпеки експлуатації трубопроводів атомних електричних станцій понад проектного. З 2010 року закінчився проектний термін експлуатації наступних енергоблоків атомних електричних станцій України: Рівненська АЕС - 1-ий, 2-ий енергоблоки у 2010 році; Південно-Українська АЕС - перший енергоблок у 2012 рік. У зв'язку з цим, необхідно провести наукове обґрунтування експлуатації енергоустановки відповідно до вимог п. 2.1.11 "Правил будови і безпечної експлуатації установок трубопроводів атомних енергетичних установок" ПН АЕ Г-7-008-89 і розробити заходи з безпечної експлуатації трубопровідних систем атомних електростанцій за критерієм віброміцності.

Визначення динамічних характеристик трубопроводу

Об'єктом обстеження є трубопроводи обв'язки ПВТ ТА-1, 2 на енергоблоці №1 ВП РАЕС, що мають значні коливання при транспортуванні теплоносія (Рис. 1).

Аналіз конструкторської документації дозволив встановити необхідні для розрахунку геометричні і масові параметри труб Ø426x22, Ø325x13; Ø219x11; Ø57x4, які виконані зі сталі 08X18H10T (ОСТ 108.320.101-76, ОСТ 108.321.101-76), трійникові з'єднання труб і переходи зі сталі 08X18H10T (ОСТ 108.320.101-76, ОСТ 108.321.101-76).

Аналіз креслень блоків труб дозволив встановити масові параметри труб, відводів, трійників і переходів, необхідних при проведенні розрахунків на міцність і вібраційних розрахунків.

Для обліку впливу маси середовища, що транспортується, і інерційних мас на інерційні властивості системи, необхідно розрахувати еквівалентну густину, яка припускає, що в масі труби враховані ці особливості. Щільність теплоносія, що транспортується, визначимо за таблицями теплофізичних властивостей води і водяної пари [1].

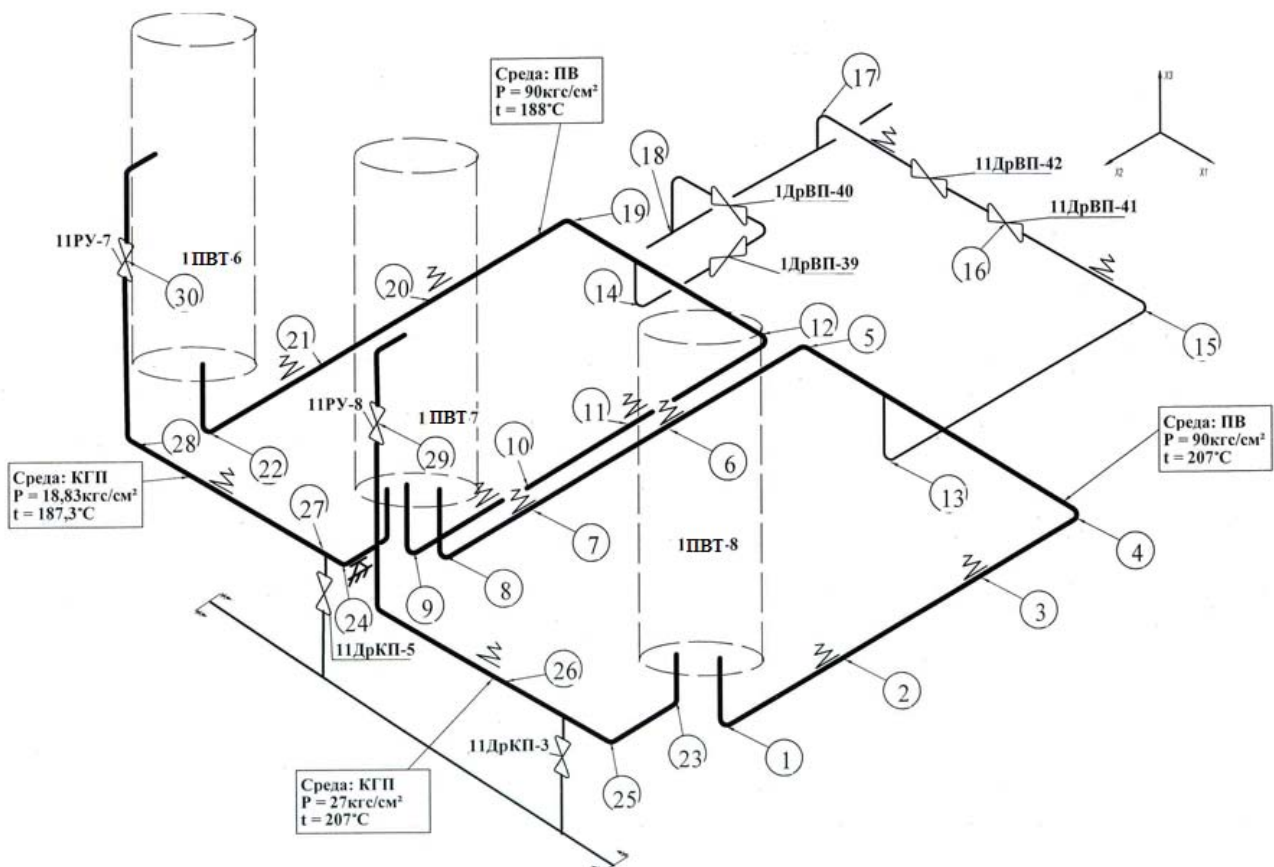


Рис.1. Аксонометрична схема трубопроводів об'язки ПВТ ТА-1.2

○ – переріз вібровиміру; – пружинна підвіска; – ковзна опора

Згідно даних робочих параметрів середовища ПВТ ТА 1,2:

- тиск $P = 90 \text{ кгс/см}^2$, температура $t = 207^\circ\text{C}$, щільність води при робочій температурі $\rho_v = 856 \text{ кг/м}^3$ (1ПВТ7÷1ПВТ8);
- тиск $P = 90 \text{ кгс/см}^2$, температура $t = 188^\circ\text{C}$, (1ПВТ6÷1ПВТ7); щільність води при робочій температурі $\rho_v = 881 \text{ кг/м}^3$ (1ПВТ7÷1ПВТ8);
- тиск $P = 27 \text{ кгс/см}^2$, температура $t = 207^\circ\text{C}$, щільність води при робочій температурі $\rho_v = 853 \text{ кг/м}^3$ (конденсат пари, що гріє 1ПВТ7÷1ПВТ8);
- тиск $P = 18,83 \text{ кгс/см}^2$, температура $t = 187,3^\circ\text{C}$, щільність води при робочій температурі $\rho_v = 876 \text{ кг/м}^3$ (1ПВТ6÷1ПВТ7).

Швидкість руху теплоносія розрахуємо за даними номінальної масової витрати в секунду $G_m = (G \cdot 1000) / 3600 = 405 \text{ кг/с}$ із співвідношення:

$$w = G_m / (S \cdot \rho_v) \quad (1)$$

де G_m – масова витрата;

S – площа поперечного перерізу;

ρ_v – щільність води при робочій температурі.

$$S = (\pi \cdot d^2) / 4 = 0,128 \text{ м}^2;$$

$$w = 405 / (0,128 \cdot 881) = 3,59 \text{ м/с}.$$

Частоту гідродинамічних сил, пов'язану зі зливом потоку при русі теплоносія, розрахуємо за формулою [2]:

$$\omega = (2\pi \cdot St) / d \quad (2)$$

де St – безрозмірне число Струхаля рівне 0,3 для чисел Рейнольдса $300 \div 5 \cdot 10^5$;

d – внутрішній діаметр трубопроводу.

Частота пульсацій гідродинамічних сил дорівнює:

$$\omega_1 = (2 \cdot 3,14 \cdot 0,3) / 0,404 = 4,6 \text{ Гц};$$

$$\omega_2 = (2 \cdot 3,14 \cdot 0,3) / 0,312 = 6,0 \text{ Гц};$$

$$\omega_3 = (2 \cdot 3,14 \cdot 0,3) / 0,053 = 35,5 \text{ Гц.}$$

У зв'язку з перехідними процесами, пов'язаними з місцевими опорами (згини трубопроводу, зварні стики, овальності) в системі відбуваються зміни внутрішнього тиску, частота пульсації яких ω – 4,6 Гц.

При русі середовища на трубопровід діють динамічні сили, що призводить до підвищеної вібрації. Для зниження впливу динамічних сил потрібно ввести додаткові опори трубопроводу для відбудови від резонансу та зменшення амплітуд коливань.

Для визначення місця раціонального розташування додаткових опор необхідно встановити амплітуду коливань і частотні характеристики трубопроводів обв'язки ПВТ ТА-1, 2, з цією метою на енергоблоці № 1 ВП РАЕС, було проведено вібраційні вимірювання. Застосовувана апаратура: віброаналізатор SKF CMVA55.

Це дозволило встановити наступне: підвищення рівня вібрації пов'язане з пульсаціями тиску і швидкісним рухом потоку теплоносія, який спостерігався при проведенні вимірювання вібрації. В табл. 1 наведені дані віброшвидкості і вібропереміщення по перерізах згідно [3].

Таблиця 1

Результати вібровимірів трубопроводів обв'язки ПВТ ТА-1, 2

| Номер перерізу | Складова вібрації | Значення вимірювань | | |
|----------------|-------------------|--|---|--|
| | | Середнє квадратичне значення віброшвидкості V_e , (мм/с) | Частота максимального розмаху вібропереміщення F_0 , (Гц) | Загальний рівень вібропереміщення $2A$, (мкм) |
| 1 | X1 | 2,3 | 5,0 | 161 |
| | X2 | 1,8 | 4,5 | 97 |
| | X3 | 0,6 | 5,0 | 18 |
| 2 | X1 | 6,0 | – | – |
| | X2 | 6,2 | 24,0 | 223 |
| | X3 | 1,2 | 4,5 | 30 |
| 3 | X1 | 7,5 | 5,0 | 713 |
| | X2 | 3,8 | 4,5 | 331 |
| | X3 | 2,5 | 21,5 | 53 |
| 4 | X1 | 9,5 | 5,0 | 467 |
| | X2 | 1,7 | 4,5 | 78 |
| | X3 | 3,6 | 4,5 | 228 |
| 5 | X1 | 9,4 | 4,5 | 1070 |
| | X2 | 1,1 | 6,0 | 32 |
| | X3 | 2,6 | 5,0 | 94 |
| 6 | X1 | 6,5 | 4,5 | 647 |
| | X2 | 3,9 | 5,5 | 221 |
| | X3 | 3,1 | 5,0 | 110 |
| 7 | X1 | 3,3 | 5,0 | 487 |
| | X2 | 4,1 | 21,0 | 216 |
| | X3 | 1,3 | 4,5 | 29 |
| 8 | X1 | 2,0 | 5,0 | 144 |
| | X2 | 1,5 | 4,5 | 67 |
| | X3 | 0,6 | 4,5 | 39 |
| 9 | X1 | 2,6 | 4,5 | 81 |
| | X2 | 2,0 | 4,5 | 73 |
| | X3 | 0,5 | 4,5 | 11 |
| 10 | X1 | 4,3 | 4,5 | 223 |
| | X2 | 2,5 | 6,0 | 108 |

Продовження таблиці 1

| | | | | |
|----|----|------|------|------|
| | X3 | 0,9 | 4,5 | 26 |
| 11 | X1 | 7,8 | 4,5 | 174 |
| | X2 | 5,2 | 4,5 | 332 |
| | X3 | 1,5 | 4,5 | 56 |
| 12 | X1 | 11,8 | 4,5 | 1657 |
| | X2 | 1,0 | 15,0 | 31 |
| | X3 | 2,3 | 13,0 | 63 |
| 13 | X1 | 6,6 | 4,5 | 1063 |
| | X2 | 1,4 | 4,5 | 116 |
| | X3 | 2,5 | 5,0 | 257 |
| 14 | X1 | 16,1 | 4,5 | 1133 |
| | X2 | 3,9 | 4,5 | 99 |
| | X3 | 2,7 | 13,5 | 114 |
| 15 | X1 | 9,4 | 4,5 | 529 |
| | X2 | 3,6 | 5,0 | 176 |
| | X3 | 5,5 | 4,5 | 476 |
| 16 | X1 | 11,2 | 4,5 | 1014 |
| | X2 | 13,3 | 5,5 | 1019 |
| | X3 | 5,4 | 4,5 | 407 |
| 17 | X1 | 14,1 | 4,5 | 833 |
| | X2 | 3,1 | 4,5 | 276 |
| | X3 | 5,7 | 4,5 | 619 |
| 18 | X1 | 13,2 | 5,0 | 624 |
| | X2 | 2,1 | 4,5 | 171 |
| | X3 | 4,7 | 5,0 | 504 |
| 19 | X1 | 9,2 | 4,5 | 1389 |
| | X2 | 1,8 | 4,5 | 99 |
| | X3 | 2,0 | 6,5 | 57 |
| 20 | X1 | 8,4 | 4,5 | 417 |
| | X2 | 3,2 | 4,5 | 217 |
| | X3 | 1,5 | 4,5 | 73 |
| 21 | X1 | 5,1 | 4,5 | 333 |
| | X2 | 3,9 | 4,5 | 157 |
| | X3 | 1,2 | 4,5 | 31 |
| 22 | X1 | 1,3 | 4,5 | 123 |
| | X2 | 1,3 | 4,5 | 59 |
| | X3 | 0,4 | 4,5 | 10 |
| 23 | X1 | 2,4 | 11,5 | 69 |
| | X2 | 2,1 | 12,0 | 40 |
| | X3 | 1,3 | 12,0 | 39 |
| 24 | X1 | 4,7 | 11,5 | 179 |
| | X2 | 4,0 | 23,0 | 112 |
| | X3 | 1,6 | 12,0 | 35 |
| 25 | X1 | 4,6 | 12,0 | 132 |
| | X2 | 2,8 | 11,5 | 78 |
| | X3 | 3,1 | 11,5 | 98 |
| 26 | X1 | 4,4 | 11,5 | 206 |
| | X2 | 3,4 | 5,5 | 162 |
| | X3 | 2,5 | 23,5 | 67 |

Продовження таблиці 1

| | | | | |
|----|----|-----|------|-----|
| 27 | X1 | 7,3 | 12,0 | 375 |
| | X2 | 2,6 | 6,0 | 97 |
| | X3 | 3,7 | 12,0 | 109 |
| 28 | X1 | 5,6 | 12,5 | 306 |
| | X2 | 3,2 | 6,0 | 199 |
| | X3 | 2,0 | 12,0 | 80 |
| 29 | X1 | 6,3 | 11,0 | 29 |
| | X2 | 6,8 | 11,5 | 148 |
| | X3 | 3,2 | 15,0 | 107 |
| 30 | X1 | 6,6 | 12,0 | 327 |
| | X2 | 4,0 | 12,0 | 244 |
| | X3 | 3,2 | 12,0 | 98 |

В результаті вимірювань було виявлено наступне:

– для трубопроводів обв'язки ПВТ ТА-1,2 рівень вібрації не перевищує нормованих 15 мм/с згідно [3];

– найбільші коливання спостерігаються на трубопроводі ПВТ-6 до ПВТ-7 в перерізі 14 з максимальною амплітудою віброшвидкості 16,1 мм/с та вібропереміщення до 1133 мкм по осі X1 на частоті 4,5 Гц.

Результати розрахунку вібраційного стану трубопроводу обв'язки ПВТ-6 до ПВТ-7 ТА-1, 2

Для проведення розрахункового аналізу вібраційного стану обрано ділянку з найбільшими коливаннями та задано перерізи для розрахунку (Рис.2). На рис. 3 представлена кінцево-елементна модель ділянки ПВТ-6 в ПВТ-7 ТА -1.2.

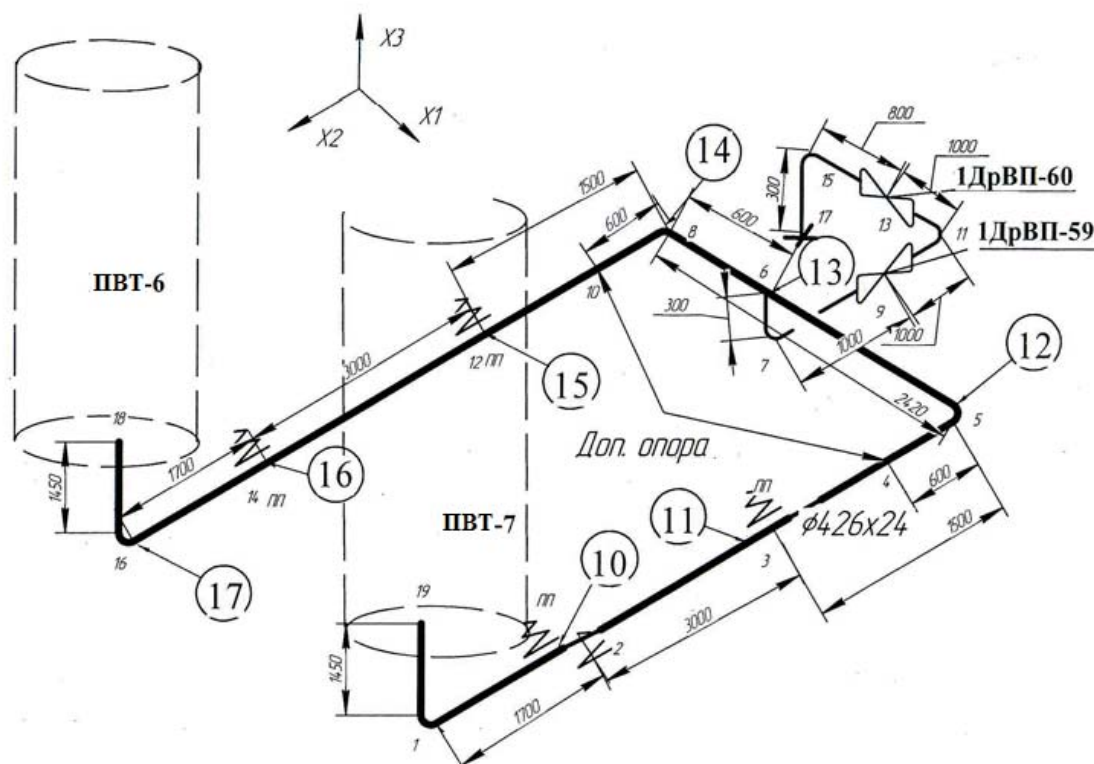


Рис. 2. Кінцево-елементна модель трубопроводів обв'язки ПВД-6 до ПВД-7
1,2,...18 розрахункові перерізи

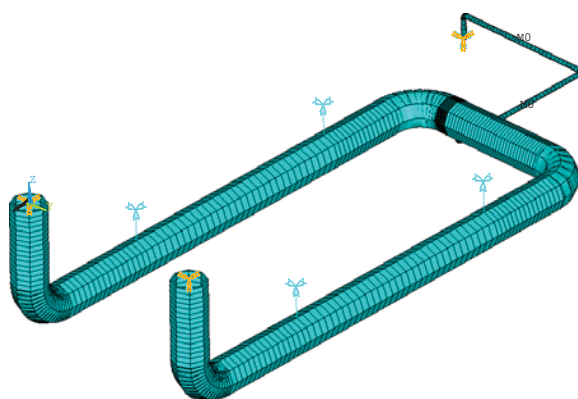


Рис. 3. Кінцево-елементна модель трубопроводів обв'язки ПВД-6 до ПВД-7

Власні частоти трубопроводу до (f_1) і після (f_2) установки додаткових опор представлені в табл. 2. На рис.4 представлені форми власних коливань трубопроводу обв'язки ПВД-6,7.

Таблиця 2

Власні частоти трубопроводу до f_1 і після f_2 установки додаткових опор та Δf
відносна зміна власних частот у відсотках

| № | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $f_1, \text{Гц}$ | 3,17 | 4,37 | 8,81 | 14,71 | 16,17 | 20,43 | 20,82 | 36,08 | 38,28 | 40,17 |
| $f_2, \text{Гц}$ | 3,15 | 4,07 | 14,63 | 16,17 | 20,43 | 20,81 | 36,18 | 40,15 | 41,47 | 47,67 |
| $\Delta f, \%$ | 1 | 2 | 40 | 9 | 21 | 2 | 42 | 10 | 8 | 16 |
| № | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| $f_1, \text{Гц}$ | 43,71 | 53,18 | 55,81 | 58,32 | 60,09 | 75,30 | 91,57 | 108,27 | 129,30 | 138,13 |
| $f_2, \text{Гц}$ | 51,66 | 54,00 | 58,33 | 60,08 | 74,56 | 104,61 | 106,64 | 129,33 | 138,01 | 156,44 |
| $\Delta f, \%$ | 15 | 2 | 4 | 3 | 19 | 28 | 14 | 16 | 6 | 12 |

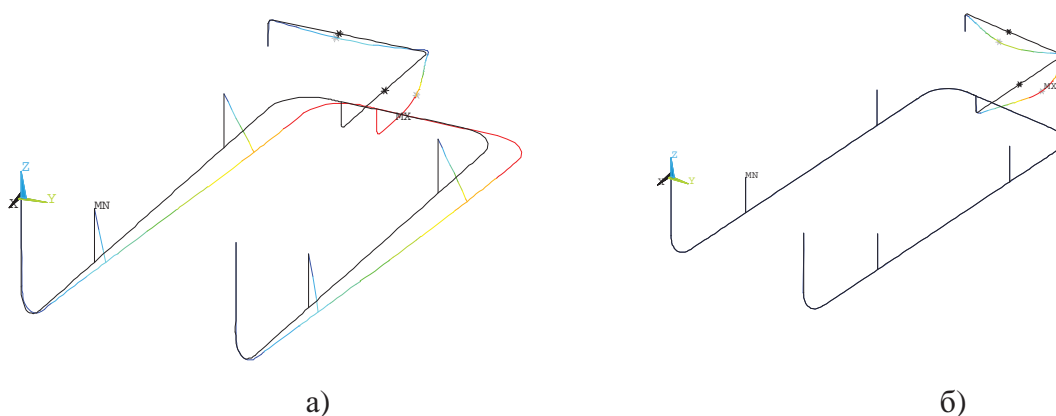


Рис. 4. Форми власних коливань трубопроводу обв'язки ПВД-6,7 вихідного стану (а) та з додатковими опорами (б)

Виходячи з отриманих даних, було запропоновано встановити додаткові демпфуючі опори з гумовими елементами в перерізі 4, 10 (рис. 2) та проведено розрахунок за програмою «ANSYS» вібраційного стану трубопроводу вихідного стану і з додатковими опорами.

На рис. 5, 6 представлений гармонійний аналіз трубопроводу обв'язки ПВД-6,7 вихідного стану і з додатковими опорами в перерізі 4,10 рис. 2. Червоним кольором позначено переміщення по осі X1, зеленим – щодо осі X2 і блакитним – щодо осі X3.

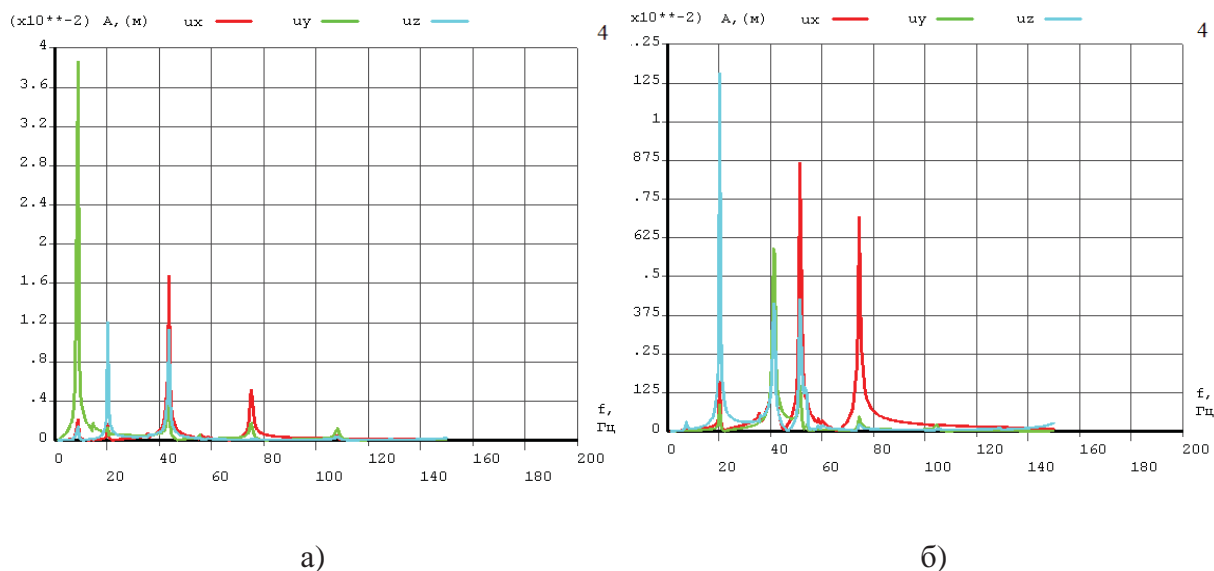


Рис. 5. Амплітудно-частотні характеристики трубопроводу обв'язки вихідного стану (а) та з додатковими опорами (б) в перерізі 4

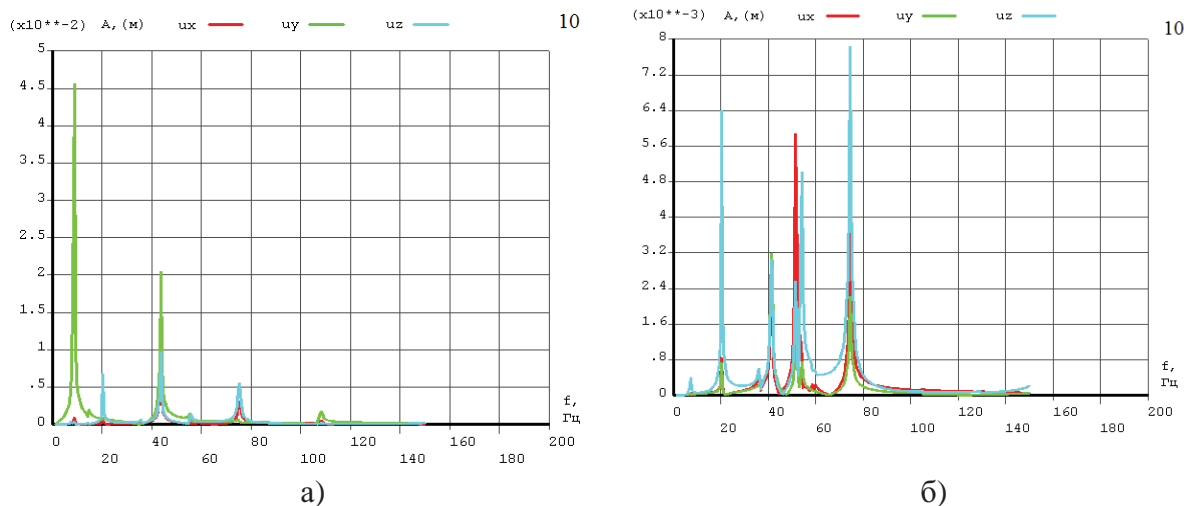


Рис. 6. Амплітудно-частотні характеристики трубопроводу обв'язки вихідного стану (а) та з додатковими опорами (б) в перерізі 10

Як бачимо, з отриманих даних, що після установки додаткових опор рівень амплітуди знизився на порядок, а власні частоти мають інші значення, що свідчить про відбудову від резонансу. Для зниження вібрації трубопроводів необхідно встановити еластомірні вібродемпфуючі пластини [4].

Висновки

У результаті проведених досліджень були визначені динамічні характеристики системи, перерізу з найбільшою амплітудою коливань, визначені місця встановлення демпфуючих елементів і розроблені рекомендації впроваджено на практиці, що дозволило знизити рівень вібрації на порядок. Досвід експлуатації енергоблоку за останні шість місяців підтверджує правильність отриманих рішень.

Список літератури

1. Вукалович М. П. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара [Текст] / М. П. Вукалович, С. Л. Ривкин, А. А. Александров, Гос. служба стандартных и справ. данных. – М.: Изд-во стандартов, 1969. – 408 с.
2. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных

энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86) [Текст] / Госатомэнергонадзор СССР. – М.: Энергоатомиздат, 1989 – 525 с.

3. МВ-Т.0.27.003-09 «Методика вібродослідження трубопровідних систем АЕС», підготовлений відповідно до плану стандартизації НАЕК «Енергоатом» на 2009 р.

4. Віброізолююча опора трубопроводу [Текст]: патент на корисну модель №77243 / Поліщук С. М., Тріщ Р. М., Кіпоренко Г. С., Чижикова В. М. – № у 2012 07725; заявл. 25.06.12; опубл. 11.02.13, бюл. № 3/2013 – 2 с. : іл.

DESIGN ANALYSIS OF VIBRATION BEHAVIOR OF PIPELINES IN RIVNE NPP AND INSURANCE OF ITS SAFE OPERATION

G. S. KIPORENKO

The paper considers the causes of excessive vibration of pipeline systems and builds a model of a pipeline section based on the finite element method. It determines amplitude and frequency characteristics and cross-sections of the system with the greatest amplitude of oscillations. Based on the results obtained it gives recommendations on how to reduce vibration to a safe level by installing additional supports.

1. Vukalovich M. P. Tablitsy teplofizicheskikh svojstv vody i vodyanogo para [Tekst] / M. P. Vukalovich, S. L. Rivkin, A. A. Aleksandrov, Gos. sluzhba standartnykh i sprav. daniykh . – М. : Izd-vo standartov, 1969 . – 408 s.

2. Normy rascheta na prochnost' oborudovaniya i truboprovodov atomnykh ehnergeticheskikh ustanovok (PNAEH G-7-002-86) [Tekst] / Gosatomehnergonadzor SSSR.—М.: EHnergoatomizdat, 1989 – 525 s.

3. МВ-Т.0.27.003-09 «Metodika vibrodoslidzhennya truboprovidnikh sistem AES», pidgotovlenij vidpovidno do planu standartizatsii NAEK «Energoatom» na 2009 r.

4. Vibroizolyuyucha opora truboprovodu [Tekst]: patent na korisnu model' №77243 / Polishhuk S. M., Trishh R. M., Kiporenko G. S., Chizhikova V. M. – № у 2012 07725; zayavl. 25.06.12; opubl. 11.02.13, byul. № 3/2013 – 2 s. : il.

Поступила в редакцию 22.10 2013 г.