

УДК 621.039.4:62-78

Г. С. КІПОРЕНКО

Українська інженерно-педагогічна академія, г. Харків, e-mail: kiporenkoanna@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 енергоустаткування, 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 енергоустаткування відповідно до вимог п. 2.1.11 "Правил будови і безпечної експлуатації устаткування 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 $\varnothing 426 \times 22$, $\varnothing 325 \times 13$; $\varnothing 219 \times 11$; $\varnothing 57 \times 4$, 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].

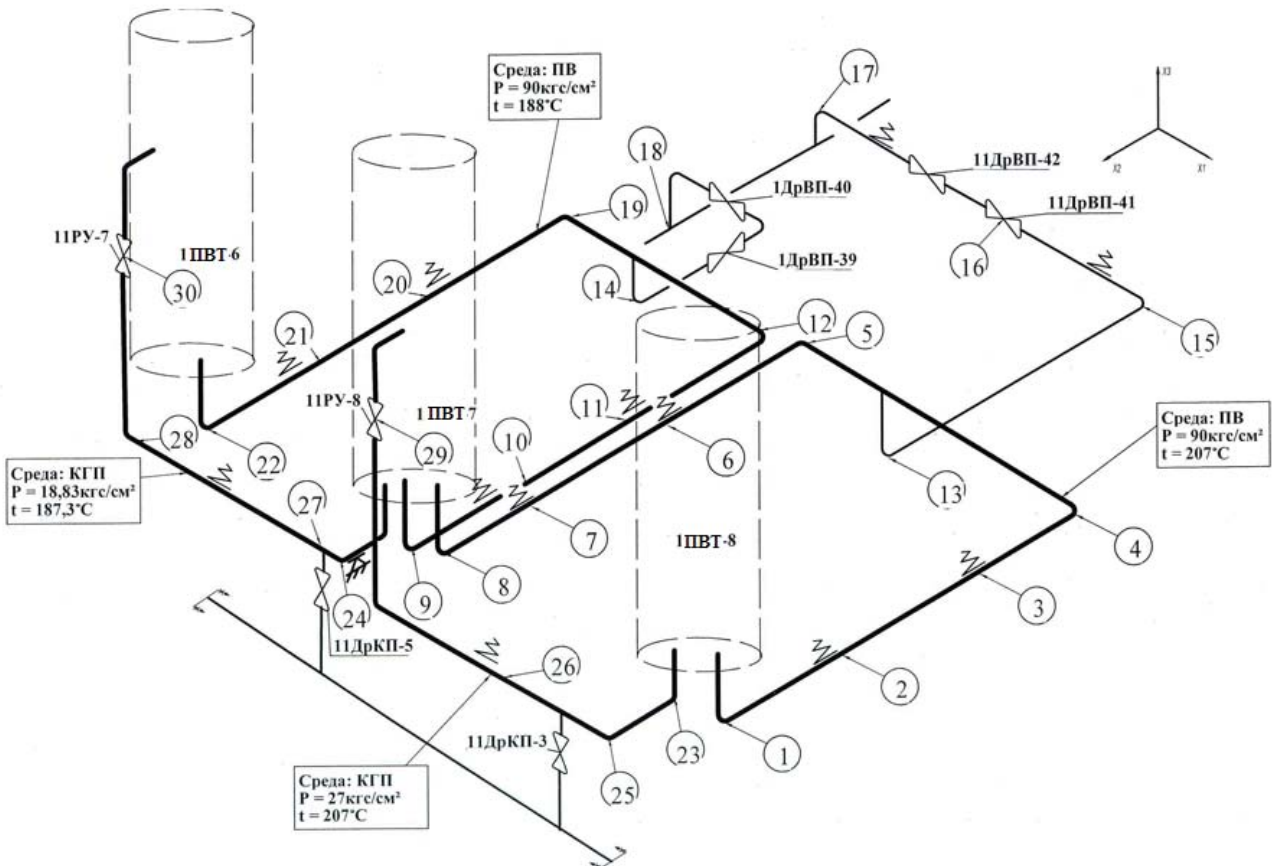


Рис.1. Аксонометрична схема трубопроводів об'язки ПВТ ТА-1.2
 ○ – переріз вібровиміру; – пружинна підвіска; – ковзна опора

Згідно даних робочих параметрів середовища ПВТ ТА 1,2:

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

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

$$w = G_m / (S \cdot \rho_v) \tag{1}$$

- 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 зривом потоку при русі теплоносія, розраховуємо за формулою [2]:

$$\omega = (2\pi \cdot St) / d \tag{2}$$

- де St – безрозмірне число Струхалія 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 ПВД ТА-1,2 рівень вібрації не перевищує нормованих 15 мм/с згідно [3];

– найбільші коливання спостерігаються на трубопроводі ПВД-6 до ПВД-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 ПВД-6 до ПВД-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 ПВД-6 в ПВД-7 ТА -1,2.

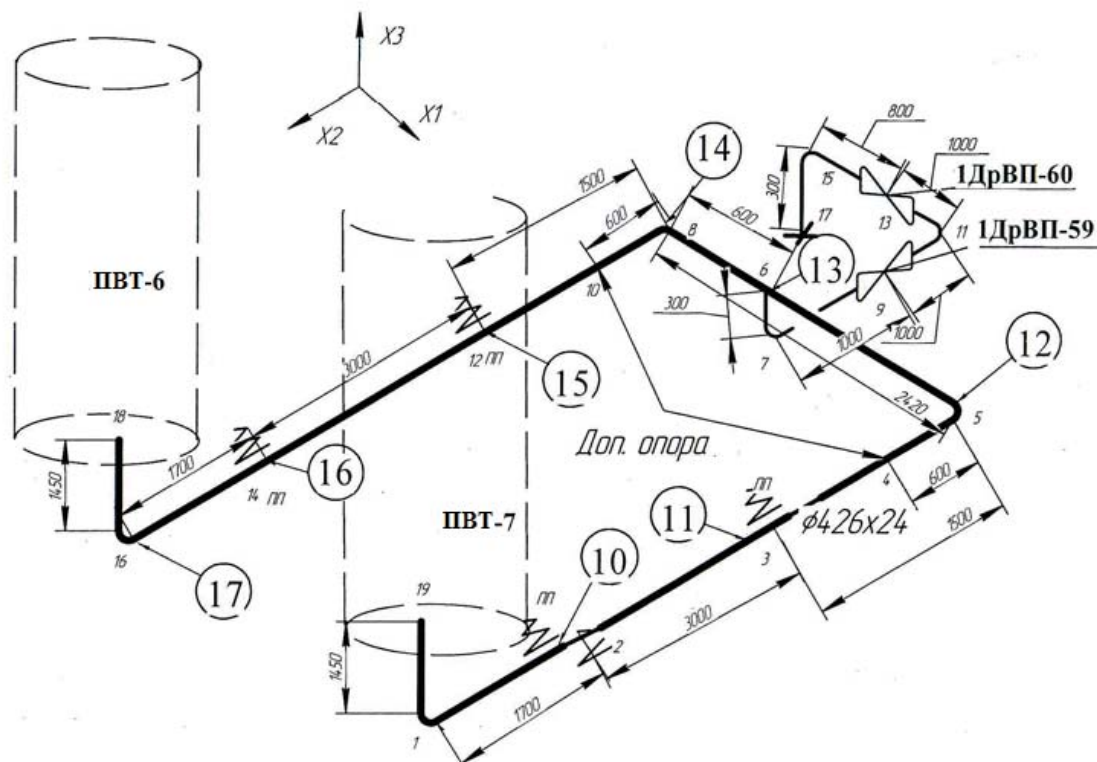


Рис. 2. Кінцево-елементна модель трубопроводів обв'язки ПВД-6 до ПВД-7 1,2,...18 розрахункові перерізи

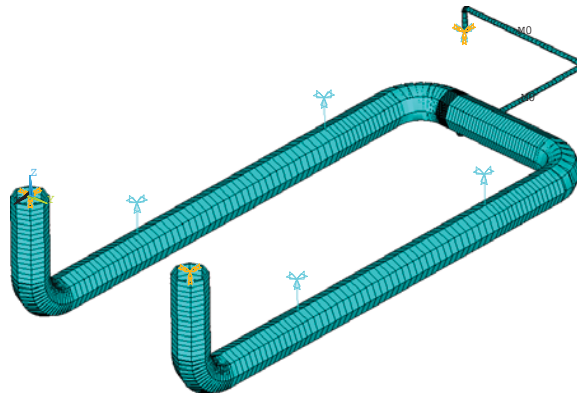


Рис. 3. Кінцево-елементна модель трубопроводів обв'язки ПВД-6 до ПВД-7

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
$df, \%$	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
$df, \%$	15	2	4	3	19	28	14	16	6	12

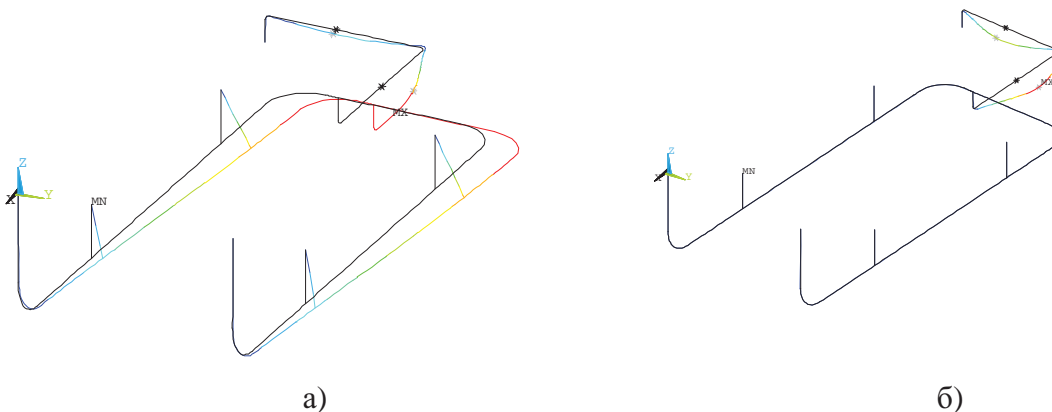


Рис. 4. Форми власних коливань трубопроводу обв'язки ПВД-6,7 вихідного стану (а) та з додатковими опорами (б)

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.

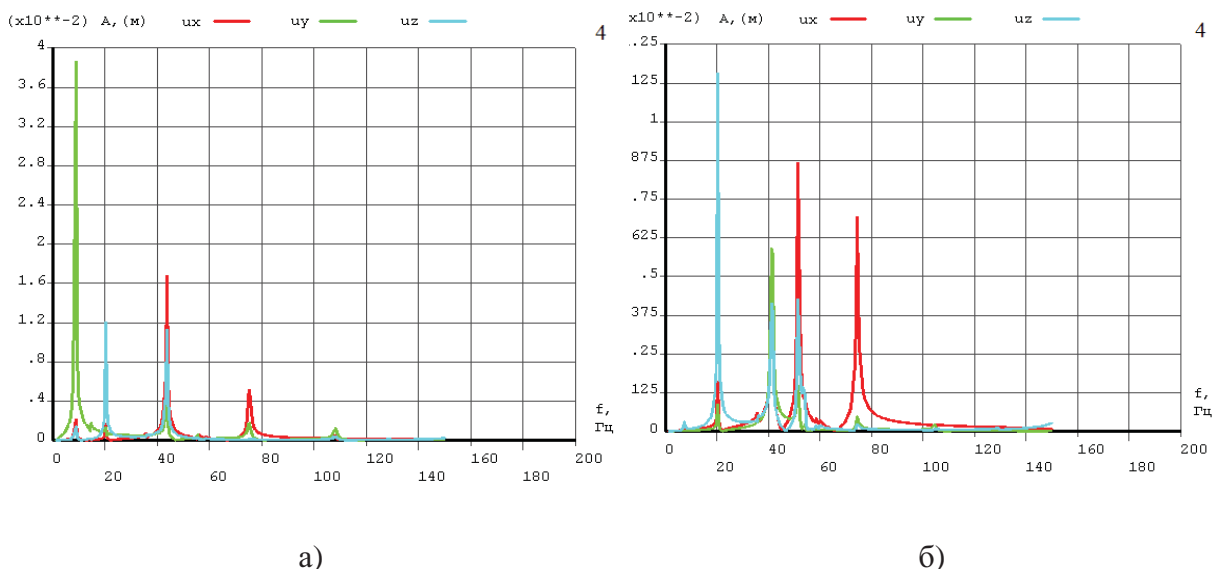


Рис. 5. Амплітудно-частотні характеристики трубопроводу обв'язки вихідного стану (а) та з додатковими опорами (б) в перерізі 4

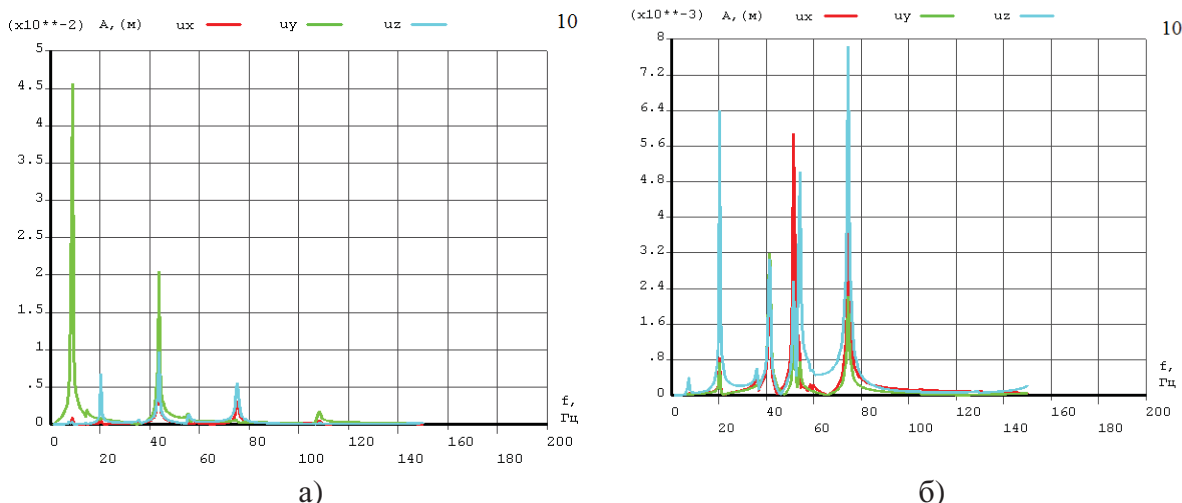


Рис. 6. Амплітудно-частотні характеристики трубопроводу обв'язки вихідного стану (а) та з додатковими опорами (б) в перерізі 10

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

енергетических 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. dan-nykh . – 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.: ЕНнергоатомиздат, 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.