

УДК 550.34

**А.В. Троценко, доцент, канд. техн. наук, В.В. Троценко, доцент, канд. техн. наук,
И.А. Маршавка**

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЖИДКОСТНЫХ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Проведены экспериментальные исследования динамики испытательной установки в режимах возбуждения вынужденных и параметрических колебаний. Определены амплитудно-частотная и амплитудно-градуировочная характеристики углового и линейного перемещений камеры установки и фундамента, приведена номенклатура основных технических характеристик.

Для исследовательских функциональных испытаний жидкостных сейсмоакустических преобразователей (САП) в условиях повышенного гидростатического давления используют установку, реализующую флотационный метод путем угловых колебаний герметичной камеры, заполненной жидкостью [1]. Проведены теоретические исследования динамических характеристик испытательной установки в режимах возбуждения вынужденных и параметрических колебаний [2].

Целью исследований является экспериментальное определение амплитудно-частотных (АЧХ) и амплитудно-градуировочных (АГХ) характеристик испытательной установки, установление комплекса основных технических характеристик (ТХ), их взаимосвязи с параметрами испытательных сигналов (ИС).

Экспериментальное исследование разработанной установки включало определение следующих характеристик:

- 1) АЧХ основного движения камеры относительно фундамента;
- 2) АЧХ углового и линейного перемещений фундамента (α , x , z);
- 3) нелинейности АГХ на резонансе камеры и на нижнем пределе диапазона частот (0,01 Гц);
- 4) сейсмовибрационной обстановки в месте размещения фундамента;
- 5) взаимного положения камеры и разделительной колонки, характеризующегося минимумом влияния изменения упругих и диссипативных характеристик гибкого трубопровода под воздействием давления на параметры движения камеры;
- 6) числовых значений параметров системы “электродинамический возбудитель (ЭДВ) – камера – фундамент”;
- 7) параметров колебаний камеры в режиме параметрического возбуждения;
- 8) комплекса нормируемых ТХ установки.

При проведении исследований использована следующая измерительная аппаратура: для измерения амплитуд угловых перемещений – автоколлиматор АК-0,5, линейных перемещений – микроскоп МПВ-1, переменных напряжений – пиковый вольтметр, разности фаз сигналов – комплект виброизмерительной аппаратуры фирмы “Брюль и Кьер” [3]. Сейсмовибрационная обстановка исследована с помощью двух жидкостных САП горизонтальной составляющей линейного ускорения [4] с незначительной чувствительностью к угловому ускорению и поперечным составляющим, измерительные оси которых взаимоперпендикулярны. Выходные сигналы САП после усиления усилителем У7-1 регистрировались на измерительный магнитофон фирмы “Брюль и Кьер” 7003 и анализировались частотными анализаторами.

Для измерения амплитуд угловых и линейных перемещений автоколлиматор и микроскоп располагали на независимом фундаменте. Напряжение, подаваемое на подвижную катушку ЭДВ, при определении АЧХ камеры выбирали из условия обеспечения размаха колебаний, соответствующего области верхнего предела измерений автоколлиматора ($5,6 \cdot 10^{-3}$ рад). АЧХ фундамента по координатам α , x , z определяли при тех же значениях напряжения. АЧХ камеры и фундамента по угловому перемещению в режиме вынужденных колебаний изображены на рисунке 1, фундамента по линейным перемещениям на рисунке 2.

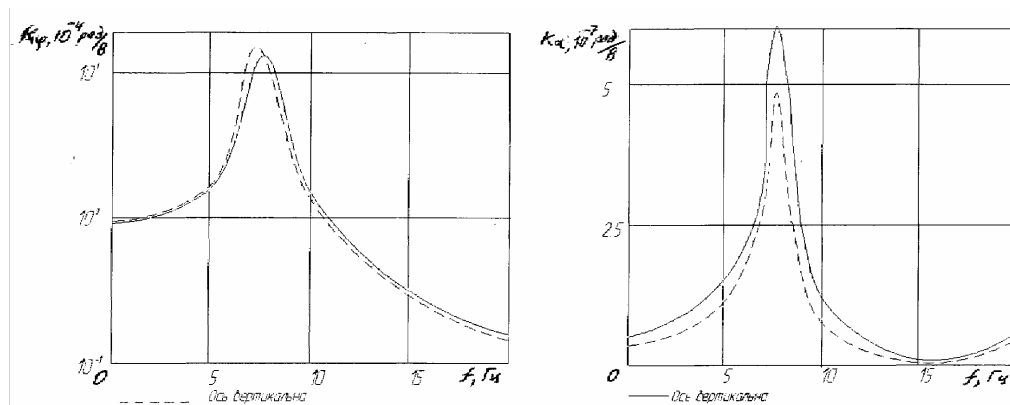


Рисунок 1 – Экспериментальные АЧХ камеры и фундамента по угловому перемещению

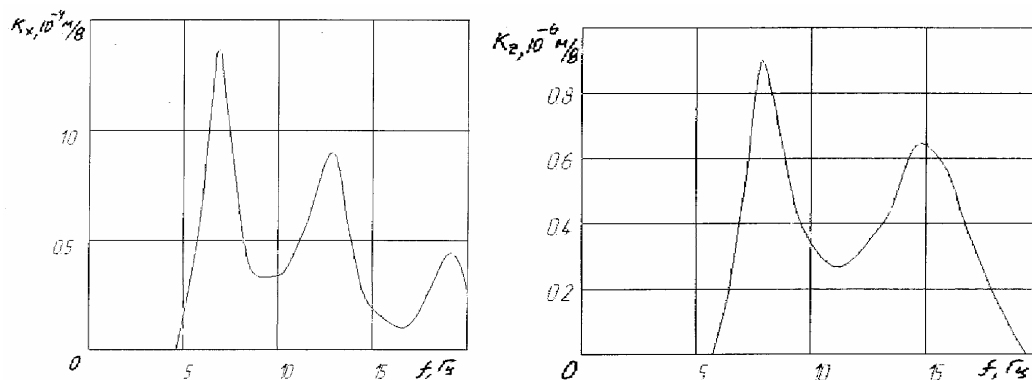


Рисунок 2 – Экспериментальные АЧХ камеры и фундамента по линейным перемещениям

Анализ полученных зависимостей и их сравнение с расчетными позволяет сделать следующие выводы.

1. Экспериментальные АЧХ установки по основному движению при горизонтальном и вертикальном положениях продольной оси камеры (ПОК) достаточно хорошо согласуются с расчетными. Максимальное отклонение на резонансе составило: по частоте 4 %, по амплитуде 5,5 %, что свидетельствует о правильности выбора динамической модели и числовых значений ее параметров.

2. АЧХ линейного перемещения фундамента по координате z при горизонтальном положении ПОК имеет два максимума на частотах 7,7 и 15 Гц, отклонение от расчетных значений: по частоте соответственно 8,5 и 4,6 %, по амплитуде составляет 12,8 и 4 %.

3. АЧХ линейного перемещения фундамента по координате x при вертикальном положении ПОК имеет три максимума на частотах 7,3, 13 и 19 Гц. Отклонение первых двух максимумов от расчетных: по частоте 4 и 9,6 %; по амплитуде 14 и 13 %. Наличие на экспериментальной АЧХ третьего максимума на частоте 19 Гц, отсутствующего на расчетной, свидетельствует о присутствии по координате x дополнительной степени свободы.

АГХ установки на резонансной частоте изображена на рисунке 3, а на частоте 0,01 Гц – на рисунке 4.

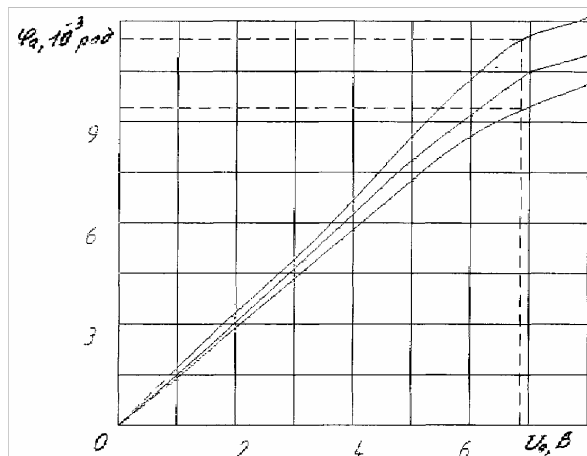


Рисунок 3 – АГХ установки на резонансной частоте

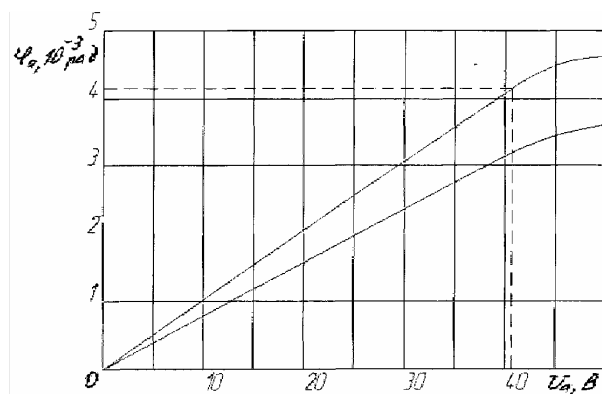


Рисунок 4 – АГХ установки на частоте 0,01 Гц

Сейсмическая обстановка в месте размещения фундамента анализировалась в нерабочее (ночное) время путем осреднения ряда реализаций линейных перемещений грунта в диапазонах частот (0,05...2) Гц и (0,5...20) Гц. Характерные спектрограммы сейсмической обстановки по 16 и по 128 реализациям изображены на рисунке 5.

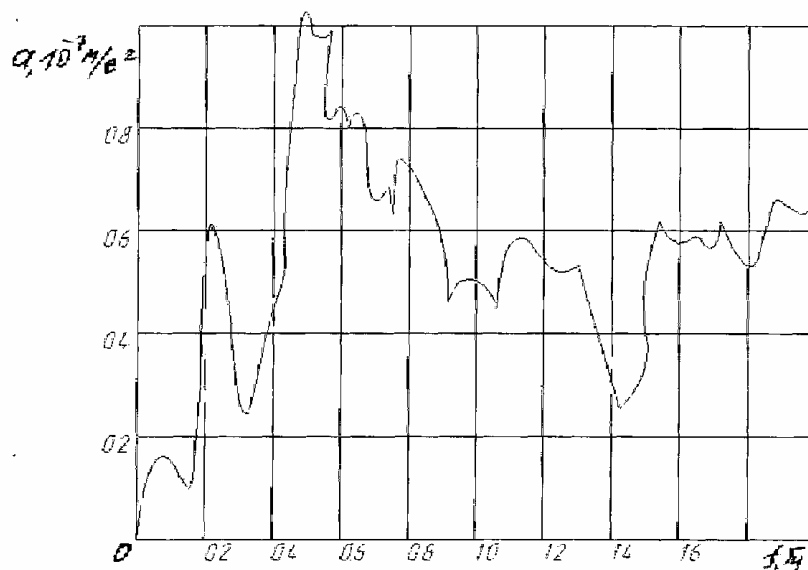


Рисунок 5 – Характерная спектрограмма сейсмической обстановки по 16 и по 128 реализациям

В результате анализа вибрационной обстановки от работающих машин и механизмов установлено, что угловые колебания в вертикальной плоскости в частотном диапазоне до 50 Гц не превышают $2 \cdot 10^{-6}$ рад, а линейные вертикальные и горизонтальные колебания имеют максимумы на частотах 23,6, 33 и 41 Гц, и в диапазоне частот до 20 Гц достигают значений $1,2 \cdot 10^{-6}$ м, что соответствует максимальному ускорению $3,2 \cdot 10^{-6} \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ (на частоте 20 Гц).

Анализ полученных результатов показал следующее.

1. Погрешность от влияния на параметры задаваемых ИС на нижнем пределе измерений угловых и линейных сейсмических колебаний грунта в рабочем диапазоне частот не превышает 1 %, а угловых вибрационных колебаний 5 %.

2. Наибольшая погрешность от влияния линейных вибрационных ускорений лежит в диапазоне частот (11...15,5) Гц.

3. Виброизоляционный фундамент позволяет уменьшить уровень внешних вибраций, передаваемых на рабочую платформу на частоте 20 Гц, по координате x в 8 и по координате z в 6 раз.

В результате экспериментов определены АЧХ установки в диапазоне частот от 1 до 20 Гц и статическое угловое перемещение камеры под воздействием давления (см. таблицу 1). При давлении 50 МПа относительное изменение резонансной частоты составило 2,63 %, коэффициента демпфирования соответственно – 2,67 %.

Таблица 1 – Коэффициенты преобразования установки, 10^{-4} рад/В

Частота, Гц		1	2	3	4	5	7	7,6	10	15	20	Статич. перемещ., 10 ⁻⁴ рад
Гидростатическое, давление, МПа	0	0,929	0,990	1,11	1,29	1,65	4,76	13,94	1,48	0,338	0,163	-
	10	0,924	0,980	1,10	1,27	1,64	1,64	13,89	1,42	0,335	0,160	0,825
	20	0,914	0,969	1,08	1,26	1,62	1,62	13,79	1,40	0,327	0,161	2,06
	30	0,908	0,957	1,07	1,24	1,60	1,60	13,43	1,42	0,332	0,163	3,35
	40	0,908	0,960	1,07	1,23	1,60	1,60	13,41	1,43	0,327	0,148	4,22
	50	0,901	0,953	1,07	1,23	1,59	1,59	13,16	1,43	0,324	0,157	5,14

Основные параметры подвижной системы установки: момент инерции (J_k), жесткость (C) и коэффициент демпфирования (H) определены стандартными методами по результатам статистической обработки многократных наблюдений. Жесткость упругого элемента определена по зависимости нагрузка-деформация при статическом нагружении грузом массой 5 кг на плече 0,2 м. Коэффициент демпфирования определен по осциллограмме свободных колебаний камеры, по отношению амплитуд

угловых колебаний на резонансе и в дорезонансной области и по ширине интервала частот на уровне 0,707 от амплитуды резонансного пика. Момент инерции подвижной системы рассчитан по формуле

$$J = \frac{C}{\omega_p^2}.$$

Значения найденных параметров и среднеквадратическое отклонение результатов измерения приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры колебательной системы установки

Наименование параметра, размерность	Жесткость C , Нм	Коэффициент демпфирования H , Нм·с	Момент инерции J_k , кг·м ²
Числовое значение	1150	1,52	0,505
СКО, 10^{-2}	2,1	6,5	4,3

Для определения положения центра жесткости фундамента – точки, вокруг которой фундамент совершает угловые колебания, испытания проведены для двух положений преобразователя типа 8305 фирмы “Брюль и Кьер” на рабочей платформе установки – выше и ниже оси колебаний. Из первого во второе положение преобразователь переведен путем поворота на 180° крышки камеры вокруг ПОК. В каждом положении камере заданы угловые перемещения одинаковой амплитуды на частоте 10 Гц. Проведены измерения амплитуд выходных сигналов преобразователя (V_{a1} , V_{a2}) и амплитуд угловых перемещений камеры и фундамента. Амплитуда ускорения в каждом положении соответственно равна

$$a_{a1} = (\varphi_a + \alpha_a)g + \varphi_a R_1 \omega^2 + (L_1 + R_1)\alpha_a \omega^2 = \frac{V_{a1}}{k}, \quad (1)$$

$$a_{a2} = (\varphi_a + \alpha_a)g - \varphi_a R_1 \omega^2 + (L_1 - R_1)\alpha_a \omega^2 = \frac{V_{a2}}{k}, \quad (2)$$

где k – коэффициент преобразования преобразователя.

Суммируя (1) и (2), получаем

$$2(\varphi_a + \alpha_a)g + 2(L_1 \alpha_a \omega^2) = \frac{V_{a1} + V_{a2}}{k},$$

откуда

$$L_1 = \frac{1}{\alpha_a \omega^2} \left[\frac{V_{a1} + V_{a2}}{2k} - (\varphi_a + \alpha_a)g \right].$$

По результатам испытаний $L_1 = (0,42 \pm 0,01)$ м.

В режиме возбуждения параметрических колебаний камера испытана на частоте свободных колебаний (2 Гц) при вертикальном положении ПОК. В первой области параметрического резонанса амплитуда угловых перемещений 0,424 рад, что достаточно хорошо согласуется с расчетным значением. Во второй области параметрического резонанса колебания возбудить не удалось, что обусловлено значительным коэффициентом демпфирования гибкого трубопровода и недостаточным уровнем коэффициента возбуждения μ .

Основные ТХ разработанной установки следующие.

1. Рабочий диапазон частот, Гц:
 - 1.1) в режиме вынужденных колебаний – $10^{-3} \dots 20$;
 - 1.2) в режиме параметрических колебаний – $1,5 \dots 3$.
2. Диапазон амплитуд угловых колебаний, рад:
 - 2.1) в режиме вынужденных колебаний – $4 \cdot 10^{-5} \dots 10^{-2}$;
 - 2.2) в режиме параметрических колебаний – $0,1 \dots 0,42$.
3. Диапазон амплитуд линейных ускорений, м·с⁻² (эквивалентных перепадов давлений, Па):
 - 3.1) в режиме вынужденных колебаний – $8 \cdot 10^{-5} \dots 0,12$ ($8 \cdot 10^{-4} \dots 8$);
 - 3.2) в режиме параметрических колебаний – до 4 (до 270).
4. Нелинейность АГХ на верхнем пределе измерений, %, не более 2.
5. Предел допускаемого значения основной погрешности задания амплитуды угловых колебаний, %

$$\pm \left(2,5 + \frac{5 \cdot 10^{-4}}{\varphi} \right).$$
6. Диапазон гидростатических давлений, МПа $1 \dots 60$.
7. Дискретность задания гидростатического давления, МПа 0,5.

8. Предел допустимого значения абсолютной погрешности задания гидростатического давления, МПа 0,1.
9. Время установления рабочего режима, мин 2.
10. Нестабильность амплитуды задаваемых колебаний в течение времени непрерывной работы в диапазонах частот ($10^{-3} \dots 4$) Гц и амплитуд ($4 \cdot 10^{-4} \dots 6,5 \cdot 10^{-3}$) рад, %, не более 5.
11. Объем рабочей полости камеры, м^3 $4 \cdot 10^{-3}$.
12. Электрическое напряжение подмагничивания ЭДВ, В 12...0,5.
13. Количество герметичных электроводов, шт 8.
14. Электрическое сопротивление изоляции электрических цепей совместно с гермоводами, МОм, не менее:
 - 14.1) без рабочей жидкости – 100;
 - 14.2) с рабочей жидкостью – 10.

Исследование сейсмической и вибрационной обстановки в месте размещения фундамента позволило оценить влияние сейсмических и вибрационных помех на параметры задаваемых ИС. Экспериментальное исследование ТХ разработанной установки подтвердило правильность выбранной динамической модели и значений ее параметров.

Дальнейшие исследования предполагают анализ конкретного конструктивного исполнения установки и определение с ее помощью основных ТХ жидкостных глубоководных САП различного назначения и конструктивного исполнения.

Библиографический список

1. Троценко А.В. Стенд для испытаний жидкостных преобразователей при повышенных гидростатических давлениях / А.В. Троценко, Ю.Г. Брунштейн // Измерительная техника. — 1987. — № 7. — С. 60–62.
2. Троценко А.В. Исследование динамических характеристик установки для гидростатических испытаний жидкостных сейсмоакустических преобразователей / А.В. Троценко, С.Г. Шевченко // Оптимизация производственных процессов: сб. науч. тр. — Севастополь, 2006. — Вып. 9. — С. 179–186.
3. Фирма “Брюль и Кьер” предлагает приборы для анализа звука, вибраций и обработки данных. Каталог данных фирмы “Брюль и Кьер”. — Копенгаген, 1988/1989. — 124 с.
4. Брунштейн Ю.Г. Жидкостный акселерометр для гидрофизических исследований / Ю.Г. Брунштейн, А.В. Троценко, Ю.А. Пороцкий // Морской гидрофизический журнал. — 1989. — № 5. — С. 63–65.

Поступила в редакцию 9.07.2007 г.