

УДК 550.34

А.В. Троценко, доцент, канд. техн. наук, В.В. Троценко, доцент, канд. техн. наук*Севастопольский национальный технический университет,**ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: root@sevtu.sebastopol.ua***РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ**

Проведена разработка конструкции установки для функциональных испытаний сейсмоакустических преобразователей и ее составных элементов: камеры высокого давления, разделительной колонки, гермовводов, трубопроводов и вибровозбудителя.

Ключевые слова: *испытательная установка, камера высокого давления, рабочая жидкость, разделительная колонка, гермоввод, трубопровод высокого давления, электродинамический возбудитель, параметр фундамента, параметрические колебания.*

Анализ динамических характеристик установки для функциональных испытаний жидкостных глубоководных сейсмоакустических преобразователей [1] показал, что параметры ее основных конструктивных элементов существенно влияют на исследуемые технические характеристики.

Целью исследований является определение оптимальных параметров основных конструктивных элементов установки для функциональных испытаний сейсмоакустических преобразователей (САП), оценка возможности возбуждения параметрических резонансных колебаний.

Проанализируем конкретное конструктивное исполнение разработанной установки. Основным элементом конструкции является камера высокого давления. Размеры внутренней полости камеры определены размерами исследуемых САП и выбраны равными: диаметр 130 мм, длина 320 мм. Для снижения момента инерции подвижной системы, обеспечения необходимой прочности и коррозионной стойкости камера выполнена из титана марки ЗВ. Толщину стенки S_c , дна камеры S_o , и крышки S_k определяем в соответствии с нормативными документами. Толщина S_e и ширина h_e выступов запорного кольца выбраны по результатам проверки на смятие и срез. Прочностные расчеты дают следующие значения параметров (таблица 1).

Таблица 1 – Значение параметров установки

Параметры	S_c	S_o	S_k	S_e	h_e
Значения, мм	32	38	35	26	11

Расчетные значения массы и момента инерции камеры: $m = 35$ кг, $J = 0,51$ кг·м².

Разделительная колонка позволяет отделить рабочую жидкость источника давления (касторовое масло) от сменных жидкостей, заполняющих камеру и различающихся вязкостью, плотностью, электрической проводимостью, коэффициентом объемного сжатия и химическим составом (трансформаторное масло, пропилен-карбонат, дианол-глицерин, пресная и морская вода); колонка компенсирует объемную сжимаемость жидкости в камере и ее расход из-за утечек через уплотнения.

Крышки камеры и разделительной колонки уплотнены каждая двумя резиновыми кольцами круглого сечения по ГОСТ 9833, ввертные соединения выполнены в соответствии с ГОСТ 19528 – 19531 с фторопластовыми защитными шайбами.

В результате анализа и опыта применения гермовводов в конструкциях САП предложено три варианта конструкции гермовводов:

- 1) на базе проходного стеклоизолятора ИСПП-1а-400-6 с пайкой оловом его корпуса к стальной крышке;
- 2) в виде металлического конуса с текстолитовой втулкой, установленных в коническое отверстие крышки на эпоксидный компаунд К-115, в нормальных климатических условиях;
- 3) в виде конического ввода с использованием в качестве изоляции сухой стеклослюдинитовой ленты ЛСКИ-160ТТ с последующей пропиткой под вакуумом эпоксидным компаундом ПК-11 и термостатированием при температуре 393 К (120 °С) в течение 24 часов.

Первые две конструкции были изготовлены и испытаны в барокамере при давлении 80 МПа и выдержали испытания. Гермовводы третьей конструкции были изготовлены во ВНИИЭМ г. Москвы в заготовках двух крышек и испытаниям на прочность не подвергались.

Электрическое сопротивление изоляции вводов, измеренное на переменном токе частотой 1000 Гц измерителем Е7-8:

- а) на базе стеклоизолятора – более 1 ГОм;
- б) с текстолитовой втулкой – менее 1 Мом;
- в) со стеклослюдяной изоляцией – более 10 ГОм.

Принято решение в качестве гермовводов камеры высокого давления использовать стеклоизоляторы как более технологичные и удовлетворяющие предъявляемым требованиям.

Проведено определение прочности и герметичности трубопровода высокого давления трех конструкций:

- 1) трубка из стали марки 1X18H9T ГОСТ 9941 наружным диаметром 8 мм, толщиной стенки 1 мм, соединенная сваркой с ниппелями из стали марки 12X18H9T ГОСТ 5632;
- 2) медная трубка наружным диаметром 9 мм и толщиной стенки 1 мм, соединенная пайкой с ниппелями из стали марки 12X18H9T;
- 3) гибкая фторопластовая трубка наружным диаметром 6 мм и толщиной стенки 1 мм с двухслойной металлической оплеткой, соединенная с ниппелями из стали марки 35 ГОСТ 1050 путем обжима металлической гильзы, охватывающей трубку (шланг ВДУ 4).

В результате испытаний установлено следующее:

- 1) стальной и фторопластовый трубопроводы герметичны при гидростатических давлениях до 60 МПа;
- 2) медный трубопровод герметичен до 55 МПа, дальнейшее поступление в трубопровод рабочей жидкости не привело к повышению давления, что обусловлено пластической деформацией медной трубки.

Стальной трубопровод применен для соединения источника давления с разделительной колонкой, фторопластовый – для соединения колонки с камерой высокого давления.

Система «источник давления – разделительная колонка – камера» была испытана при давлении до 60 МПа. Установлено в результате исследований:

- 1) материал запорного кольца не соответствует требованиям чертежа (кольцо изготовлено из углеродистой стали обыкновенного качества), что привело к его значительной остаточной деформации и смятию выступов, взаимодействующих с выступами корпуса камеры; после изготовления кольца из легированной конструкционной стали 40Х ГОСТ 4543 и повторных испытаний остаточная деформация не обнаружена;

2) уплотнения ввертных соединений крышек камеры и разделительной колонки обеспечивают герметичность;

3) установка может быть использована для исследовательских испытаний САП при гидростатическом давлении до 60 МПа.

В качестве электродинамического возбудителя (ЭДВ) применен малогабаритный вибровозбудитель с двумя магнитными системами, у которого в качестве упругого элемента применены две концентрично расположенные текстолитовые «ириновые» мембраны (мембраны с концентрическими вырезами). Основные технические параметры ЭДВ: магнитная индукция в кольцевом зазоре магнитопровода $B = 1$ Тл, длина провода подвижной катушки $l = 9$ м, сопротивление обмотки подвижной катушки $r = 16$ Ом, индуктивность обмотки $L = 4 \cdot 10^{-2}$ Гн.

Коэффициент линейной жесткости фундамента установки в вертикальном направлении для мелкозернистых песков, засыпаемых под фундамент, определяется выражением

$$C_z = C_{zc} \cdot F,$$

где C_{zc} – коэффициент упругого равномерного сжатия; F – площадь подошвы фундамента.

Для фундамента с параметрами

$$C_{zc} = 2 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^3 \text{ и } F = 0,5 \text{ м}^2; \quad - C_z = 10^7 \text{ Н/м}.$$

Коэффициенты линейной в горизонтальном направлении и угловой жесткости принимаем $C_x = 0,7 C_z = 7 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$; $C_a = 2 C_{zc} \cdot I$, где I – момент инерции сечения фундамента относительно горизонтальной оси. Принимаем $I = 0,075 \text{ м}^4$, тогда $C_a = 3 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Момент инерции фундамента определим по приближенной формуле

$$J_\phi = 0,1 \cdot m_\phi \cdot l^2,$$

где l – длина верхней плиты фундамента. При $l = 0,5$ м; $m_\phi = 1,2 \cdot 10^3$ кг; $J_\phi = 30 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Коэффициент демпфирования фундамента можно представить в виде

$$H = \Phi \cdot C,$$

где Φ – модуль затухания, с.

На основе опытных данных принято $\Phi_a = \Phi_z = 10^{-3}$ с; $\Phi_x = 0,86 \Phi_z$, тогда $H_a = 3 \cdot 10^7 \text{ Нм} \cdot \text{с}$; $H_x = 6 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{с/м}$; $H_z = 10^4 \text{ Н} \cdot \text{с/м}$.

Полученные значения параметров фундамента использованы при расчете динамических характеристик угловых и линейных перемещений основания камеры.

Для определения основных технических характеристик установки и анализа параметров испытательного сигнала при различных режимах возбуждения колебаний рассмотрим возможные варианты взаимного расположения продольной оси камеры и измерительной оси (ИО) исследуемого САП.

Ускорение в направлении ИО САП для этих вариантов:

$$\alpha_{\alpha} = g(\sin \varphi + \sin \alpha) + R_1 \frac{d^2 \varphi}{dt^2} - (L_1 - R_1) \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \frac{d^2 x}{dt^2} + R_3 \left[\left(\frac{d\alpha}{dt} \right)^2 + \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 \right], \quad (1)$$

$$\alpha_{\phi} = R_2 \left(\frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \frac{d^2 \alpha}{dt^2} \right) + R_1 \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 + \frac{d^2 z}{dt^2} + (L_1 + R_1) \left(\frac{d\alpha}{dt} \right)^2 + \frac{1}{2} g(\alpha^2 + \varphi^2), \quad (2)$$

$$\alpha_{\varepsilon} = g(\sin \varphi + \sin \alpha) + R_1 \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + (L - R_1) \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \frac{d^2 x}{dt^2} + R_3 \left[\left(\frac{d\alpha}{dt} \right)^2 + \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 \right], \quad (3)$$

$$\alpha_{\Gamma} = R_3 \left(\frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \frac{d^2 \alpha}{dt^2} \right) - R_1 \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 - (L - R_1) \left(\frac{d\alpha}{dt} \right)^2 + \frac{d^2 z}{dt^2} + \frac{1}{2} g(\alpha^2 - \varphi^2). \quad (4)$$

Варианты реализуют, как правило, для задания испытательных сигналов в низкочастотной области гравитационным методом, в высокочастотной области – инерционным методом, при этом градуировочным ускорением является тангенциальная составляющая, а также для определения коэффициента поперечного преобразования и задания малых уровней испытательного сигнала гравитационным методом.

Теоретические исследования показали, что амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) подвижной системы установки и фундамента имеют явно выраженный резонансный характер, при этом резонанс находится в области рабочих частот (1...20) Гц. Поэтому для оценки верхнего предела задаваемых испытательных сигналов нелинейность амплитудно-градуировочной характеристики (АГХ) установки, обусловленную нелинейностью характеристики упругого элемента и неоднородностью магнитного поля в зоне подвижной катушки электродинамического возбудителя, необходимо определять на резонансе. В свою очередь нелинейность АГХ, обусловленную ограничением мощности используемого усилителя электрического сигнала, подаваемого на подвижную катушку электродинамического возбудителя, необходимо определять на нижнем пределе частотного диапазона.

Нижний предел воспроизводимых испытательных сигналов ограничен уровнем промышленных помех и сейсмического шума, передаваемого на рабочую платформу и ускорениями, обусловленными податливостью фундамента. Применение предложенных способов уменьшения амплитуды испытательного сигнала без уменьшения амплитуды угловых перемещений камеры позволяет не учитывать при оценке нижнего предела испытательного сигнала нечувствительность и гистерезис упругого элемента, а также механический шум ЭДВ.

Отличие ускорений от номинальных обуславливает появление систематических погрешностей задания испытательных сигналов, проявляющихся в искажении как параметров ИС, так и их формы. Для малых значений угловых перемещений камеры и горизонтального положения ИО САП первые слагаемые в (1)–(4) можно представить в виде номинальных ускорений $a_n = a_{\text{вн}} = g\varphi$,

$a_{\phi n} = a_{\varepsilon n} = R_{2,3} \frac{d^2 \varphi}{dt^2}$, учёт погрешностей, обусловленных тангенциальной составляющей ускорения и отклонением ИО САП от вертикали может быть осуществлен известными методами [2,3].

При проведении экспертизы разработанной установки 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 [3] с незначительной чувствительностью к угловому ускорению и поперечным составляющим, измерительные оси которых взаимно перпендикулярны. 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.

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.

Проведены выбор параметров основных конструктивных элементов испытательной установки и фундамента, их прочностной расчет и испытания на прочность и герметичность, уточнено типовое исполнение элементов. Анализ вариантов расположения в пространстве и относительно друг друга продольной оси камеры высокого давления и ИО исследуемых САП позволил определить зависимость от частоты систематической погрешности задания испытательных сигналов, установить связь составляющих погрешности с параметрами элементов установки и фундамента.

Параметры устройства гармонической модуляции момента инерции камеры выбраны из пороговых условий возбуждения параметрических колебаний. Частоту свободных колебаний камеры без упругих элементов принимаем равной 2 Гц. Для первой области параметрического резонанса масса одного груза $m > H / \omega_c r^2$.

При $r = 0,3$ м, $m > 1,34$ кг. Грузы выполнены сферическими из оловянистой бронзы. Радиус груза $R_c > 32,4$ мм. Принимаем диаметр груза 65 мм. Амплитуда параметрических колебаний 0,44 рад. Угловая скорость штанги определяется удвоенной частотой изменения момента инерции $\omega = 12,56$ рад/с = 120 об/мин. В качестве привода штанги выбран электродвигатель постоянного тока ДР-1,5Р со встроенным редуктором.

Проведены выбор параметров основных конструктивных элементов испытательной установки и фундамента, их прочностной расчет и испытания на прочность и герметичность, уточнено типовое исполнение элементов. Экспериментальное исследование элементов разработанной установки в основном подтвердило правильность выбранной динамической модели и значений ее параметров.

Дальнейшие исследования предполагают разработку методики экспериментального определения составляющих погрешности измерения и диапазонов изменения основных технических характеристик жидкостных САП.

Бibliографический список использованной литературы

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. Резонансный стенд с параметрическим возбуждением / А.В. Троценко, Ю.Г. Брунштейн // Контрольно-измерительная техника. — 1984. — Вып. 36. — С. 130–134.
3. Троценко А.В. Способы расширения диапазона градуировки преобразователей ускорения гравитационным методом / А.В. Троценко, Ю.Г. Брунштейн // Метрология. — 1989. — № 2. — С. 30–35.

Поступила в редакцию 04.12.2012 г.

Троценко О.В., Троценко В.В. Розробка конструкції випробувальної установки

Проведено розробку конструкції установки для функціональних випробувань сейсмоакустичних перетворювачів та її складових елементів: камери високого тиску, розділювальної колонки, гермовводів, трубопроводів і віброзбуджувача.

Ключові слова: випробувальна установка, камера високого тиску, робоча рідина, розділювальна колонка, гермоввод, трубопровід високого тиску, електродинамічний збудник, параметри фундамента, параметричні коливання.

Trotsenko A.V., Trotsenko V.V. Development of the construction of the test setup

We develop the facility design for functional testing of seismic transducers and its components: a high-pressure, separation column, cable glands, conduits and exciter.

Keywords: Test set, high-pressure chamber, the working fluid, separation column, cable gland, high pressure pipe, an electrodynamics exciter parameters foundation, parametric oscillation.