

С.В. Самуся

*(Украина, Днепрпетровск, Институт геотехнической механики НАН Украины
им. Н.С.Полякова)*

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СТРУНЕ И ОТВЕСЕ КАНАТА МОБИЛЬНОЙ ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ

При проведении экспериментальных исследований динамики мобильной аварийно-спасательной подъемной установки АСППУ-6,3 на шахте им. Калинина ГП «Донецкуголь» исследовались динамические и кинематические параметры подъемной установки в режиме предохранительного торможения. Для регистрации этих параметров использовалось три комплекта аппаратуры: аппаратура «МАК» ИГТМ НАН Украины для измерения динамических параметров колебаний клетки, аппаратура НИИГМ им. М.М.Федорова для фиксации кинематических параметров барабана и характеристики предохранительного тормоза, видеоаппаратура для съемки поперечных колебаний струны каната [1].

Предохранительный тормоз включался после разгона подъемной машины до максимальной скорости 2 м/с в режимах спуска и подъема грузовой клетки. Для анализа было выбрано 6 наиболее характерных фрагментов численных данных – 3 для режима спуска сосуда и 3 для его подъема при различных длинах каната.

Для каждого процесса торможения было получено три набора численных данных: кинематические параметры барабана и характеристика тормозного усилия, вертикальные ускорения подъемного сосуда и поперечные перемещения одного из сечений струны каната. Все данные были синхронизированы и имели временные отметки. Частота регистрации параметров датчиком вертикальных ускорений сосуда составляла 300 Гц, частота регистрации параметров работы тормоза и скорости вращения барабана – 200 Гц, информация о поперечных колебаниях струны каната фиксировалась видеоаппаратурой и в дальнейшем обрабатывалась при помощи программного пакета, частота видеоряда в котором составляет 30 Гц.

Регистрация местоположения клетки в момент начала торможения и, соответственно, длины отвеса каната проводилась по показаниям указателя глубины подъемной машины, а также проверялась путем интегрирования текущей скорости вращения барабана. Момент включения предохранительного тормоза фиксировался по исчезновению напряжения в обмотке контактора ГП.

Для синхронизации и последующего анализа были выбраны фрагменты экспериментальных данных, соответствующие процессам торможения, причем продолжительность каждого составляла 13 секунд, из них – 3 секунды до момента включения тормоза и 10 секунд после начала торможения. Синхронизация

ция экспериментальных данных осуществлялась в соответствии с информацией датчиков о моменте включения предохранительного тормоза.

При предварительной обработке выбранных фрагментов было проведено сглаживание по методу скользящего среднего с индивидуально подобранными для каждого набора данных параметрами, учитывающими частоты электрических наводок в датчиках и рабочие частоты самих датчиков.

При обработке данных о колебаниях струны был выполнен пересчет абсолютного значения отклонения точки струны с учетом расстояния от центра струны до ее сечения, колебания которого фиксировались с помощью видеокамеры.

Результаты описанной выше предварительной обработки были сохранены в виде файлов с соответствующими массивами данных. Полный набор обработанных результатов представлен в виде семейства графиков на рис. 1 и 2, где начало отсчета времени совпадает с моментом включения предохранительного тормоза.

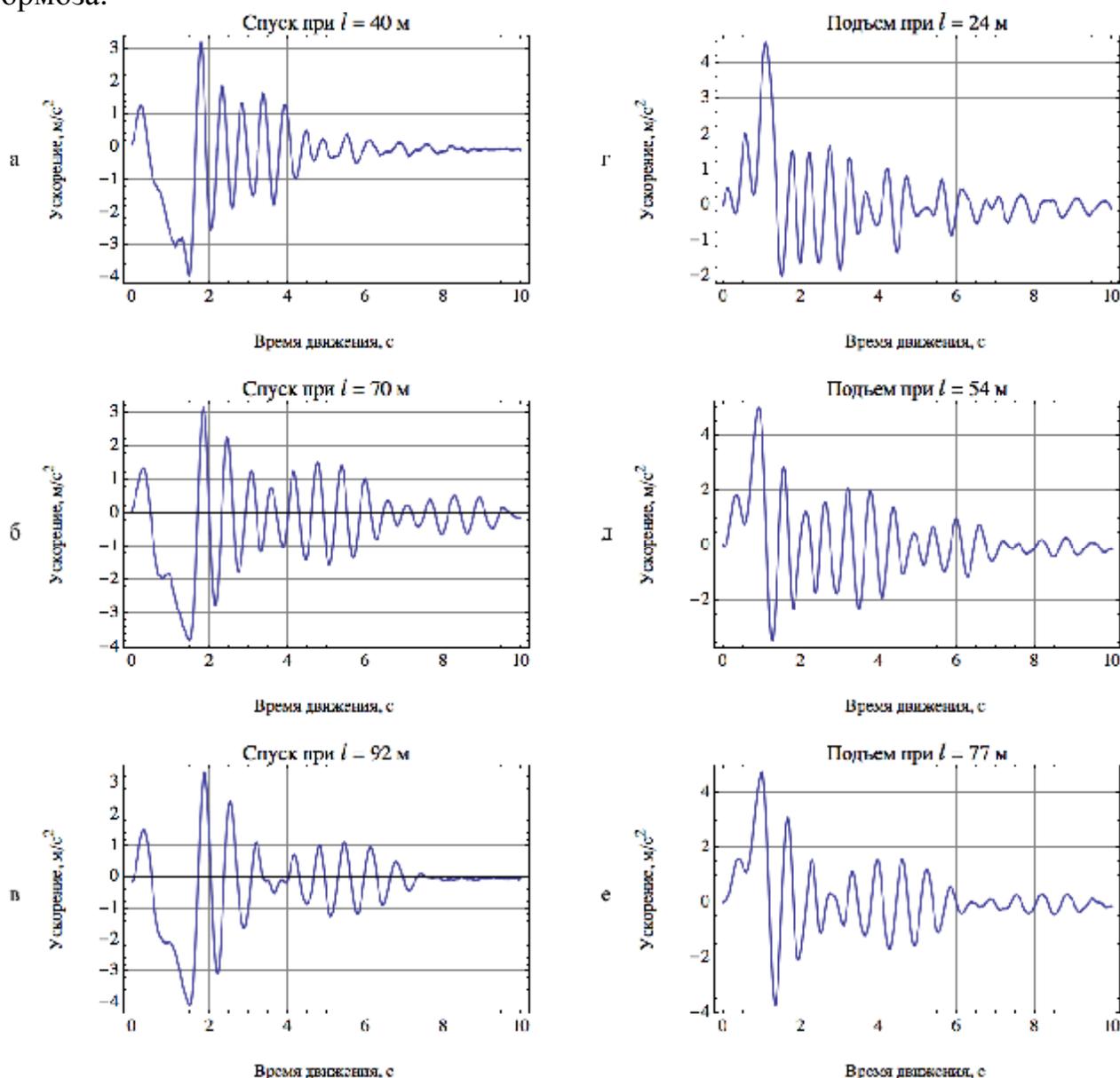


Рис. 1. Графики экспериментально полученных вертикальных ускорений сосуда в режимах торможения для различных длин отвеса каната

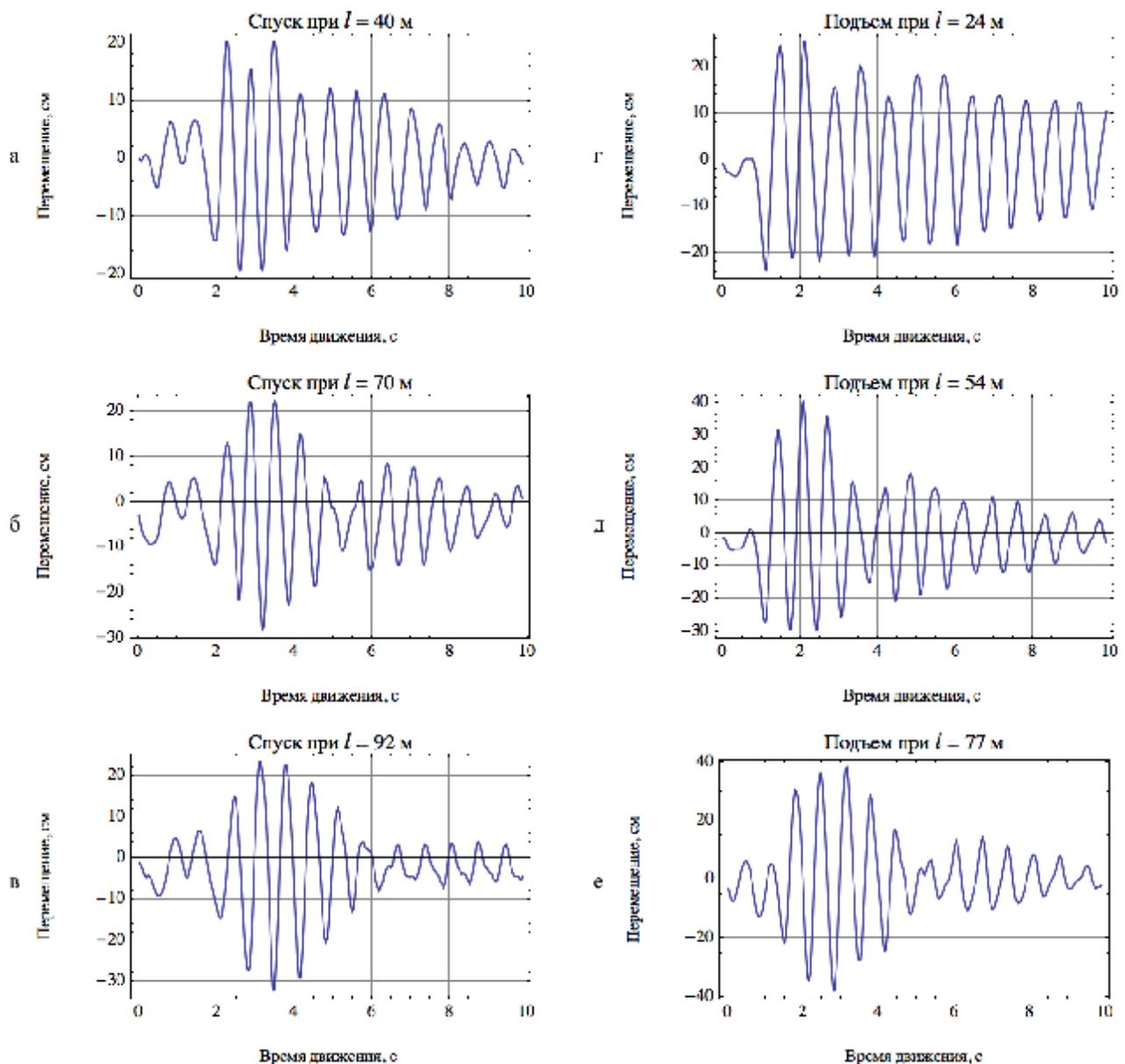


Рис. 2. Графики экспериментально полученных перемещений центра струны каната в режимах торможения для различных длин отвеса каната

На рис. 1 и 2 фрагменты а - в – соответствуют режимам торможения при спуске груза для длин отвеса каната 40, 70 и 92 м; фрагменты д - ж – режимам торможения при подъеме груза для длин отвеса каната 24, 54 и 77 м.

Анализ полученных фрагментов экспериментальных данных был проведен при помощи различных численных и аналитических методов. Учитывая физическую природу исследуемого процесса – взаимосвязанных гармонических колебаний струны и отвеса каната с грузом, было предложено аппроксимировать как данные измерений вертикальных колебаний сосуда, так и измерений поперечных колебаний струны суммой двух взвешенных затухающих синусоид вида

$$a_1 e^{-m_1 t} \sin(w_1 t + q_1) + a_2 e^{-m_2 t} \sin(w_2 t + q_2) + b, \quad (1)$$

где a_1, a_2 – амплитуды; w_1, w_2 – частоты; q_1, q_2 – фазы; m_1, m_2 – коэффициенты диссипации; b – относительное смещение.

Первое слагаемое отражает «поперечную» составляющую в колебаниях, вызванную поперечными колебаниями струны каната, а второе – «продольную», вызванную вертикальными колебаниями сосуда. Независимо от того, в каком элементе каната фиксировались эти колебания (вертикальные колебания нижнего конца каната или поперечные перемещения сечения струны), в обоих случаях, судя по наличию модуляции на большинстве приведенных графиков, присутствуют обе составляющие и их следует учитывать.

Для анализа экспериментальных данных в прикладном математическом пакете Mathematica был реализован программный модуль, который при помощи численного метода наименьших квадратов позволяет найти такие значения набора параметров – амплитуд, частот, фаз и коэффициентов диссипации, чтобы расстояние между массивом экспериментальных данных и соответствующим массивом значений функции (1) в тех же самых точках было минимальным. В качестве критерия расстояния была взята норма разности этих массивов первого порядка.

Для параметров функции вида (1) были заданы ограничения, соответствующие их физическому смыслу и реальным диапазонам их изменения :

$$\begin{aligned} a_1 > 0, a_2 > 0; \\ q_1 > 0, q_2 > 0; \\ 0,05 < m_1 < 0,5, 0,05 < m_2 < 0,5; \\ 1,35 < w_1 < 1,45, 1,5 < w_2 < 2,5. \end{aligned} \tag{2}$$

Предполагалось, что для реальных параметров подъемной установки частота w_1 соответствует собственным поперечным колебаниям струны каната, а частота w_2 – собственным вертикальным колебаниям сосуда. Параметр b введен для учета погрешности измерительных датчиков и возможного смещения экспериментальных данных относительно 0.

Для обработки в программном модуле были использованы фрагменты полученных экспериментальных данных, соответствующие колебаниям струны и отвеса каната после остановки барабана. Результатом работы программного модуля являются наборы параметров – частот, фаз, амплитуд и коэффициентов диссипации для всех фрагментов экспериментальных данных, соответствующие колебательным процессам в канате после остановки барабана при различных положениях сосуда в стволе.

Для визуальной оценки результатов были получены графики (рис. 3 и 4), построенные с учетом вычисленных значений параметров и отражающие данные эксперимента и их аппроксимацию предложенной функцией (1).

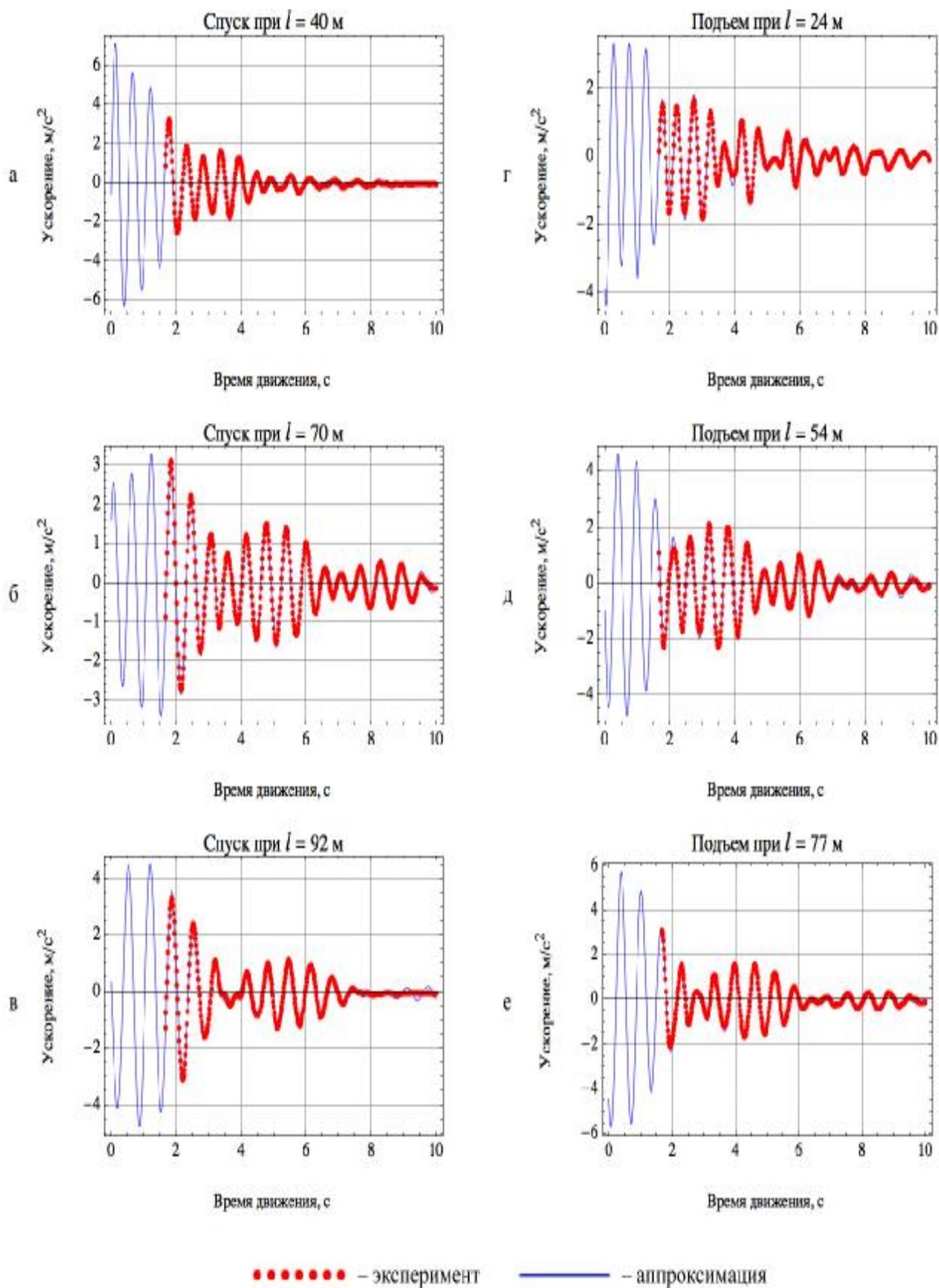


Рис. 3. Графики результатов аппроксимации вертикальных ускорений сосуда аналитическими зависимостями: а - в – для спуска груза; г - е – для подъема груза

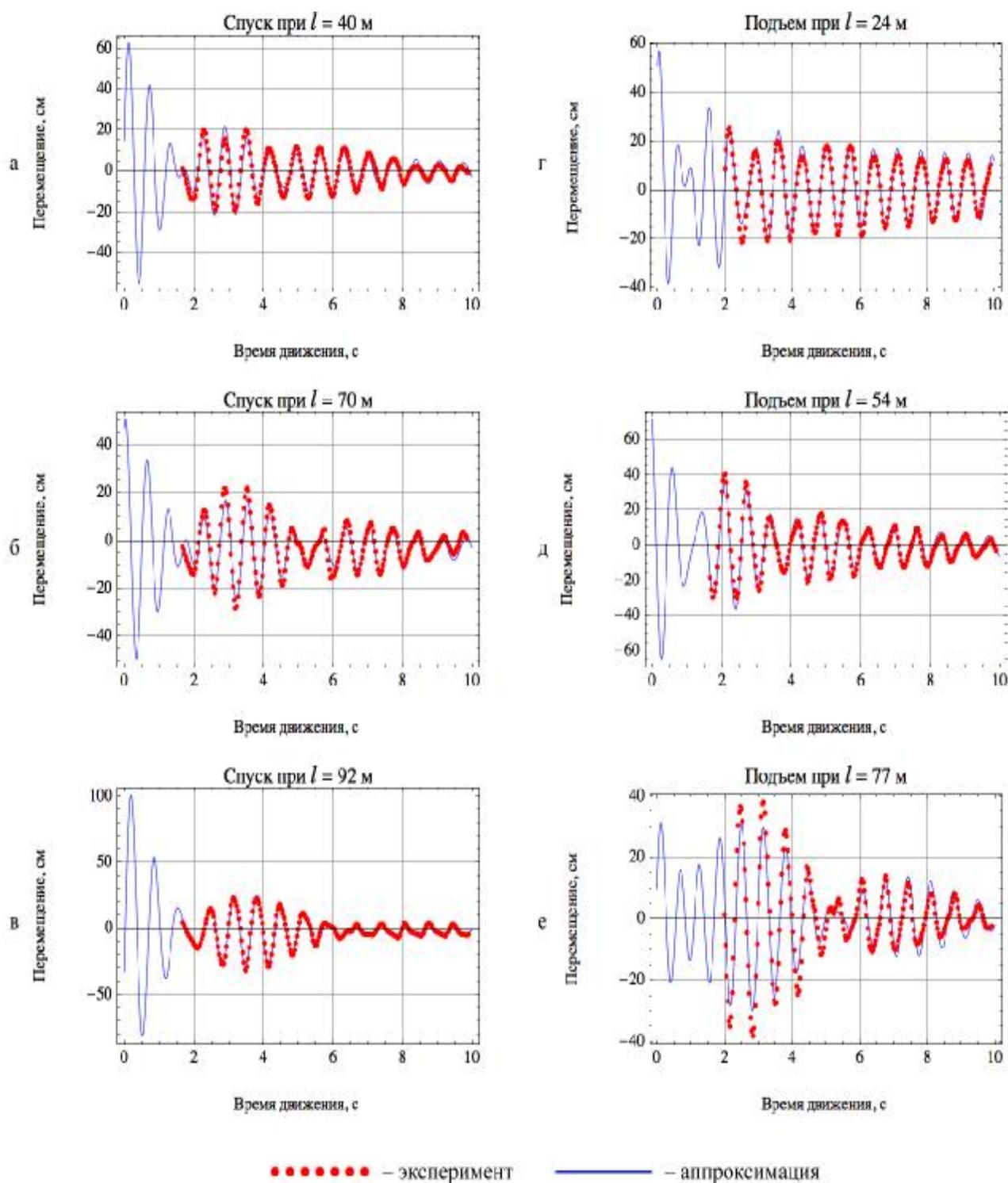


Рис. 4. Графики результатов аппроксимации поперечных колебаний струны каната аналитическими зависимостями: а - в – для спуска груза; г - е – для подъема груза

Полученные параметры колебательных процессов в струне и отвесе каната представлены в виде таблицы, где w_{1X} и w_{1Y} – частоты «поперечных» составляющих в колебаниях груза и струны каната; w_{2X} и w_{2Y} – частоты «продольных» составляющих в колебаниях груза и струны каната; a_{1X}/a_{2X} и a_{1Y}/a_{2Y} – соотношения «поперечной» и «продольной» составляющей амплитуд в колебаниях струны каната и груза соответственно.

Параметры, полученные в результате аппроксимации экспериментальных данных аналитической зависимостью для различных длин отвеса каната

Режим	Спуск			Подъем		
$l_0, \text{ м}$	40	70	92	24	54	77
$w_{1X}, 1/\text{с}$	1,41	1,40	1,41	1,42	1,41	1,41
$w_{1Y}, 1/\text{с}$	1,45	1,43	1,41	1,42	1,44	1,41
$w_{2X}, 1/\text{с}$	1,84	1,70	1,64	2,03	1,78	1,67
$w_{2Y}, 1/\text{с}$	1,79	1,71	1,62	1,96	1,83	1,63
a_{1X} / a_{2X}	0,11	0,30	1,70	0,17	0,23	0,60
a_{1Y} / a_{2Y}	0,51	0,50	1,20	0,67	1,20	0,46

При минимальном отличии частот собственных колебаний сосуда и струны каната (длина отвеса 92 м) наблюдается доминирование амплитуды «поперечной» составляющей над «продольной», что приводит к явной модуляции колебаний в отвесе каната, вызванных колебаниями струны и соответственно к увеличению коэффициента динамичности.

Также были получены численные значения коэффициентов диссипации для «поперечных» и «продольных» составляющих колебаний в отвесе ($m_1 = 0,218$, $m_2 = 0,339$) и струне ($m_1 = 0,169$, $m_2 = 0,453$) каната как взвешенное среднее коэффициентов диссипации для каждого набора данных.

Найденные экспериментально значения коэффициентов диссипации следует использовать в общей динамической модели подъемной установки при исследовании качественной и количественной картины колебаний системы при торможении [2].

Для проверки полученных значений частот была проведена верификация методом сравнения экспериментально определенных частот вертикальных колебаний сосуда с частотами, полученными по формуле Релея как с учетом общей жесткости системы «струна–отвес–сосуд», так и без ее учета для 6-ти различных длин отвеса каната. Отклонения экспериментальных данных от данных, полученных с учетом общей жесткости системы, составили менее 5%, что, в свою очередь, подтверждает корректность проведенных теоретических исследований [3,4].

С учетом значений частот колебаний, полученных экспериментально, были рассчитаны значения общей жесткости и приведенной жесткости каната, учитывающие влияние провеса струны каната, а также проведено сравнение этих жесткостей с теоретическими результатами, что характеризуют графики на рис 5. и 6.

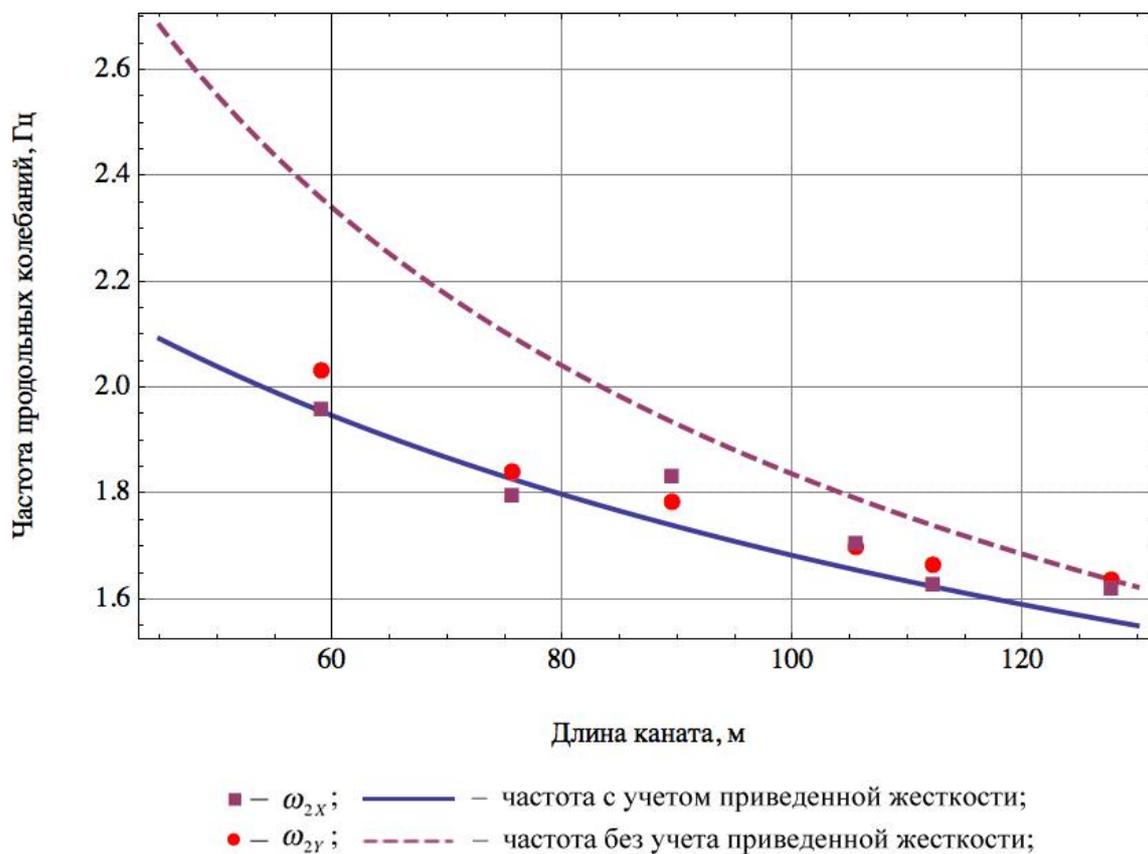


Рис. 5. Зависимости частоты продольных колебаний отвеса каната от его полной длины, полученные экспериментально и теоретически

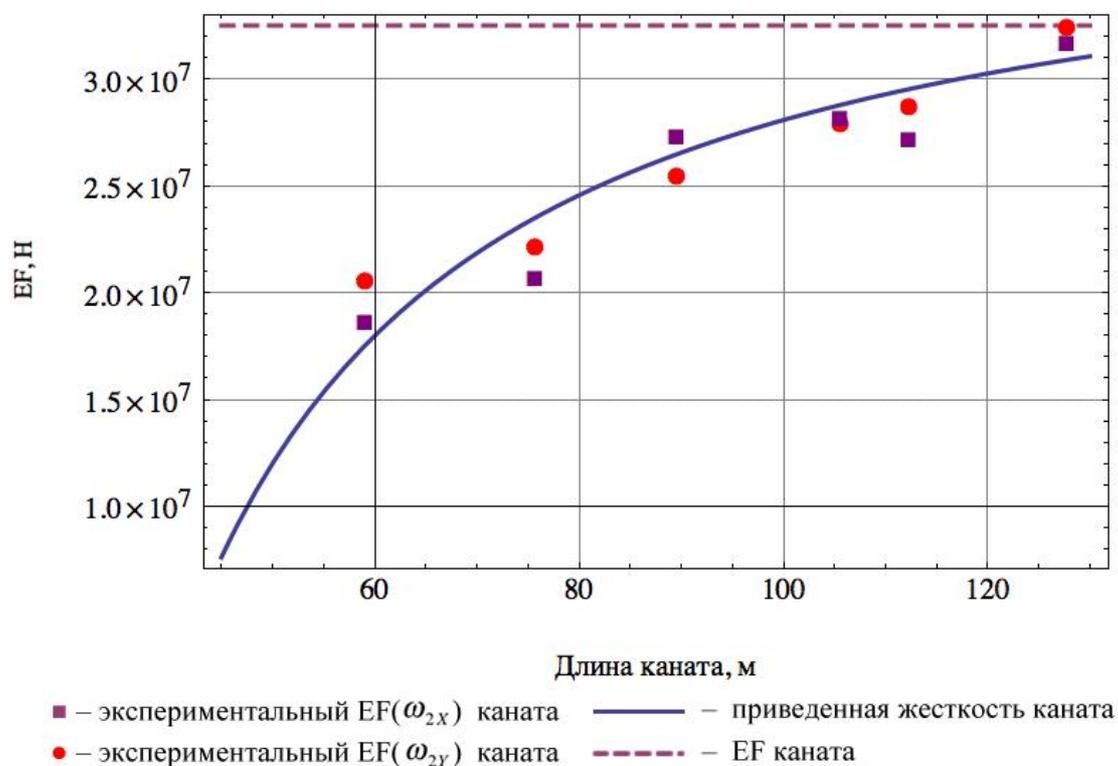


Рис. 6. Зависимости приведенной жесткости каната от его длины, полученные экспериментально и теоретически

Анализ графиков на рис. 5 и 6 свидетельствует о необходимости учета уменьшения полной жесткости системы «струна–отвес–сосуд» за счет провисания струны каната при определении частот и амплитуд вертикальных колебаний подъемного сосуда.

Таким образом, разработанный метод математического анализа данных, полученных при экспериментальных исследованиях динамики мобильной подъемной установки, заключающийся в аппроксимации их аналитической зависимостью в виде комбинации затухающих синусоид и определении их параметров подтвердил свою адекватность.

Результаты, полученные при помощи разработанного программного модуля, свидетельствуют о тесной взаимосвязи двух различных динамических процессов, таких как поперечные колебания струны и продольные колебания сосуда мобильной подъемной установки.

Судя по соотношениям амплитуд, «поперечная» составляющая колебаний для некоторых длин отвеса каната является доминирующей, что еще раз подтверждает необходимость учета влияния колебаний струны каната при моделировании динамических процессов, протекающих в канате мобильной подъемной установки в режимах торможения.

Список литературы

1. Ильин С.Р. Экспериментальные исследования динамики мобильной аварийно-спасательной подъемной установки в режиме предохранительного торможения / С.Р. Ильин, С.В. Самуся // Стальные канаты. – 2009. – Вып. 7. – С. 60–65.
2. Ильин С.Р. Математическая модель нелинейных колебаний струны и отвеса каната мобильной подъемной установки / С.Р. Ильин С.В. Самуся // Наукові праці ДонНТУ. Сер. гірничо-електромеханічна. – 2008. – Вип. 16(142). – С. 122–131.
3. Ильин С.Р. Исследование жесткостных характеристик системы «струна - отвес каната - сосуд» аварийно-спасательной мобильной подъемной установки /С.Р. Ильин, С.В. Самуся // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. –2009.–Вип. 82. – С. 142-148.
4. Степанов А.Г. Динамика машин. – Екатеринбург: УрО РАН, 1999. – 392 с.