

Е. В. Коробко, Л. С. Ещенко*, Н. А. Журавский, Л. В. Радкевич, З. А. Новикова

КОЛЕБАНИЯ ОБОЛОЧКОВОГО ЭЛЕМЕНТА С ЭЛЕКТРОУПРАВЛЯЕМЫМ МАТЕРИАЛОМ

Введение. Проблема контроля и снижения вибраций является актуальной во многих областях промышленности, включая строительную, автомобиле- и судостроение, робототехнику, аэрокосмическую технику и т. д. В частности, при транспортировке жидкости требуется снижение механического воздействия, обусловленного неровностями дороги и дорожной ситуацией. Транспортируемые жидкие грузы обладают различными физическими свойствами, которые оказывают существенное влияние на их перетекание и диссипативный разогрев в резервуарах при различных скоростных режимах движения. Перемещение жидкости со свободной поверхностью в объеме резервуара наиболее опасно вследствие действия инерционных сил, возникающих при торможении, разгоне и поворотах транспортного средства. Подвижность жидкости в резервуаре приводит к изменению сил, действующих на резервуар при колебаниях. В условиях резонанса возникающие значительные гидродинамические силы могут привести помимо разогрева к потере устойчивости объекта, поэтому насущной задачей является снижение механического воздействия жидкости на оболочку резервуара транспортного средства.

Для оболочковых конструкций можно применять устройства поверхностного демпфирования (демпфирующие покрытия, многослойные демпфирующие конструкции). Многослойные демпфирующие конструкции представляют собой слоистые конструкции, содержащие чередующиеся металлические слои с высоким значением модуля накопления и низким значением модуля потерь и вязкоупругие резиноподобные слои с высоким значением модуля потерь, в которых происходит диссипация энергии колебаний. Простейшая конструкция – трехслойная «сэндвич»-пластина, содержащая две металлические пластины снаружи и резиноподобный слой между ними [1]. Модель плоского трехслойного сэндвича с вязкоупругим средним слоем отличается простотой конструкции. Оптимизация ее демпфирующих характеристик приводит к созданию конструкции, подходящей лишь для конкретного режима работы устройства. Вибрационные характеристики являются оптимальными только для выбранного единичного режима колебаний. Для решения задач полуактивного гашения колебаний за счет изменения параметров вязкого трения в тонкостенных конструкциях можно использовать слои материалов, управляемо изменяющие свои вязкоупругие свойства при воздействии электрического поля, а также при изменении состояния конструкции при внешних механических воздействиях.

Электрореологические жидкости (ЭРЖ) обладают способностью обратимо менять свои вязкоупругие свойства под воздействием электрического поля. Эффективность вязкоупругого слоя существенно усилится, если его параметры будут меняться во внешних полях в зависимости от вида и интенсивности механической нагрузки. Кроме того, замена используемой пассивной вязкоупругой системы на управляемую демпфирующую систему с ЭРЖ может дать более сильное демпфирование, так как при воздействии поля меняется и упругость системы, что приводит к изменению собственной частоты колебаний объекта. Как правило, используются трехслойные «сэндвич»-пластины с адаптивным вязкоупругим слоем, расположенным между двумя металлическими слоями [2–6].

Нами изготовлен макет цилиндрического оболочкового элемента с двумя оболочками и электроуправляемым материалом между ними, где на внутреннюю оболочку элемента подается высокое напряжение, а внешняя оболочка заземлена. Целью работы является управле-

*Белорусский государственный технологический университет, г. Минск

ние колебаниями внутренней оболочки макета элемента и оценка амплитудно-частотных характеристик при вынужденных колебаниях объекта.

Материалы и оборудование. Гидратированные фосфаты алюминия, поливалентных металлов (железа, кобальта), магния используются в качестве дисперсных наполнителей в составе ЭРЖ [7]. В качестве наполнителя для ЭРЖ исследовали безводный высокодисперсный ортофосфат алюминия, синтезированный в БГТУ, получаемый дегидратацией $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ с последующей термообработкой, с преобладающим размером частиц 3–7 мкм. Гидратированный ортофосфат алюминия получали гидротермальной кристаллизацией из насыщенного алюмофосфатсодержащего раствора с содержанием Al_2O_3 8,67 мас.% и с концентрацией P_2O_5 в растворе 340–440 г/л. Термообработку дегидратированного алюмофосфата проводили в изотермических условиях при 800–950 °С.

Синтез $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ включал следующие стадии:

1. Приготовление алюмофосфатного раствора растворением $\text{Al}(\text{OH})_3$ в H_3PO_4 при температуре 80–90 °С, интенсивном перемешивании и постоянном объеме.
2. Старение алюмофосфатного раствора в течение 18–35 ч.
3. Гидротермальная кристаллизация $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ из алюмофосфатного раствора при постоянном объеме и температуре 90–95 °С продолжительностью 30–50 ч.
4. «Горячее» фильтрование $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и отмывка водой с температурой 80–85 °С.
5. Сушка при температуре 30–70 °С до постоянной массы.

При синтезе $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ варьируемыми факторами являлись: концентрация фосфорной кислоты в алюмофосфатном растворе, продолжительность старения алюмофосфатного раствора и условия кристаллизации дегидратированного ортофосфата алюминия. Для получения дисперсного наполнителя для ЭРЖ синтезированные образцы гидратированного ортофосфата алюминия термообработывали при температуре 800, 900 и 950 °С в течение 30–40 мин.

Для исследований были выбраны 11 образцов высокодисперсных наполнителей на основе ортофосфата алюминия, отличающихся условиями синтеза. В табл. 1 представлены условия получения образцов наполнителей ЭРЖ.

Таблица 1

Условия получения образцов наполнителей для ЭРЖ на основе ортофосфата алюминия

ЭРЖ	Условия получения наполнителей			Группа ЭРЖ
	Номер образца	Концентрация P_2O_5 в алюмофосфатном растворе, г/л	Температура и продолжительность термообработки, °С/мин	
ЭРЖ-1	1	380	800/40	I
ЭРЖ-2	2		900/40	II
ЭРЖ-3	3	400	900/40	II
ЭРЖ-4	4		800/30	I
ЭРЖ-5	5	420	800/30	I
ЭРЖ-6	6		800/40	I
ЭРЖ-7	7	340	900/40	II
ЭРЖ-8	8	440	900/30	II
ЭРЖ-9	9	400	950/30	II
ЭРЖ-10	10	400	800/40	I
ЭРЖ-11	11	400	800/40	I

С использованием полученных высокодисперсных ортофосфатов алюминия были приготовлены образцы электрореологических жидкостей в трансформаторном масле с массовой концентрацией образцов наполнителей 20%.

Для исследований влияния внешнего электрического поля на процесс затухания вынужденных колебаний оболочкового элемента изготовлен макет. Схема и фотография макета оболочкового элемента показаны на рис. 1. Макет состоит из внешней и внутренней цилиндрических алюминиевых оболочек, зазор между которыми заполнен электроуправляемым слоем жидкости; диаметр внутренней оболочки 30 мм, высота элемента 70 мм, ширина зазора между оболочками 4 мм. Оболочки соединены между собой тремя стальными пружинами с нижней стороны внутренней оболочки. Внешняя оболочка крепится шестью пружинами к вибратору ВЭД-10А.



Рис. 1. Схема и фотография макета оболочкового элемента

На рис. 2 показаны фотографии вибростенда для определения демпфирующих характеристик макета оболочкового элемента, а на рис. 3 – схема лабораторной установки.



Рис. 2. Вибростенд для исследования колебаний макета различных объектов

Блок генератора синусоидальных колебаний (1) задает колебания подвижной системы вибратора (2) и, соответственно, закрепленного на пластине вибратора оболочкового элемента (3) с заданными амплитудой и частотой, которые определяются параметрами испытаний. Для усиления электрического сигнала синусоидальной формы генератора установлен блок усилителя (9). Через блок подмагничивания (10) и блок фильтров высоких частот (11) сигнал поступает на подвижную катушку вибратора (2). Диапазон задаваемых частот вибростенда составляет 4–30 Гц. Ускорение закрепленной пластины вибратора определяется с помощью пьезодатчика ИС-318 (4) и блока измерения вибрации (5). Вертикальное смещение внешней цилиндрической оболочки макета определяется с помощью индуктивного датчика IG6087

(6), расположенного над оболочковым элементом (3). Для определения смещения внутренней оболочки снимается верхняя крышка и датчик приближается на требуемое расстояние. Изменяя частоту вынужденных колебаний и определяя соответствующую ей амплитуду колебаний оболочкового элемента, получаем необходимые характеристики.

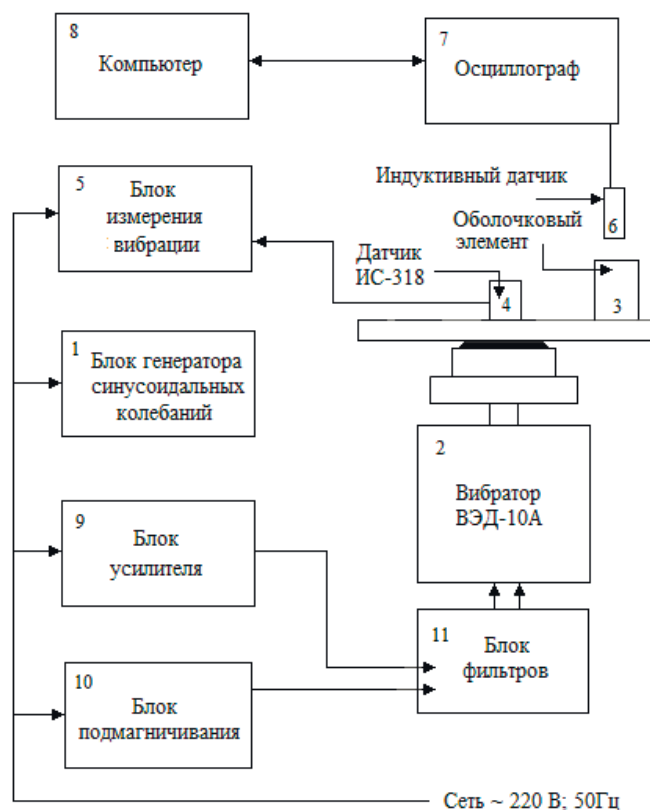


Рис. 3. Схема вибростенда для управления макетом оболочкового элемента

Сигнал с датчика поступает на осциллограф Handyscope HS3 (7) и далее на компьютер (8). С помощью программного обеспечения осциллографа характеристики колебаний записываются в файлы на компьютере. Напряженность электрического поля между оболочками элемента задается источником высокого напряжения, соединенным с внутренней оболочкой, внешняя оболочка заземлена. Напряженность электрического поля изменяется в диапазоне 0–1,5 кВ/мм. Воздействие электрического поля приводит к структурированию частиц дисперсной фазы в электроуправляемом слое между оболочками и изменению его вязкоупругости.

Реологические свойства ЭРЖ. Исследовано реологическое поведение ЭРЖ с наполнителями на основе ортофосфата алюминия (см. табл. 1). Определены зависимости напряжения сдвига τ и плотности тока j полученных ЭРЖ от напряженности электрического поля в диапазоне 0–3,5 кВ/мм на вискозиметре Rheotest 2.1 с соосно-цилиндрической измерительной ячейкой (зазор между цилиндрами – 1 мм) при скорости сдвига $17,2 \text{ с}^{-1}$ (рис. 4, 5).

Согласно результатам экспериментов образцы ЭРЖ (см. табл. 1) по реологическим характеристикам можно разделить на две группы:

I группа – ЭРЖ с наполнителями №№ 1, 4, 5, 6, 10, 11 (все наполнители термообработаны при 800 °С). Для этой группы наполнителей зависимости напряжения сдвига и плотности тока от напряженности электрического поля показаны на рис. 4. Электрореологический отклик при напряженности поля 3,5 кВ/мм для этой группы составляет 230–360 Па и ток утечки 1,3–3 мкА/см². ЭРЖ-4 показывает низкие значения напряжения сдвига и более высокие значения плотности тока. Условия получения образца наполнителя № 4 отличаются параметрами синтеза: меньшими температурой и временем старения алюмофосфатного раство-

ра – 25 °С и 18 ч соответственно, и меньшим временем термообработки – 30 с, что, возможно, не позволяет до конца сформировать кристаллическую решетку образца, а также может приводить к образованию избыточного количества дефектов в кристалле и тем самым увеличивать проводимость образца.

II группа – ЭРЖ с наполнителями №№ 2, 3, 7, 8, 9 (наполнители термообработаны при 900 и 950 °С). Для этой группы зависимости напряжения сдвига и плотности тока от напряженности электрического поля показаны на рис. 5. Для ЭРЖ II группы, объединяющей наполнители, термообработанные при 900 °С, электрореологический отклик соответствует 360–440 Па и плотности тока 4,5–5,6 мкА/см² при напряженности поля 3,5 кВ/мм. Для образца ЭРЖ-9 с наполнителем № 9, термообработанным при температуре 950 °С, значения напряжения сдвига при 3,5 кВ/мм незначительно ниже (на ~20%) значений других ЭРЖ этой группы, тогда как величина плотности тока ниже в >3,5 раза и более характерна для образцов I группы. Видимо, увеличение температуры термообработки образца № 9 позволяет получать более плотные структуры, что, в свою очередь, приводит к снижению объемных токов утечки. При этом некоторая поверхностная поляризация частицы сохраняется, тем самым обеспечивается способность к взаимодействию частиц в электрическом поле.

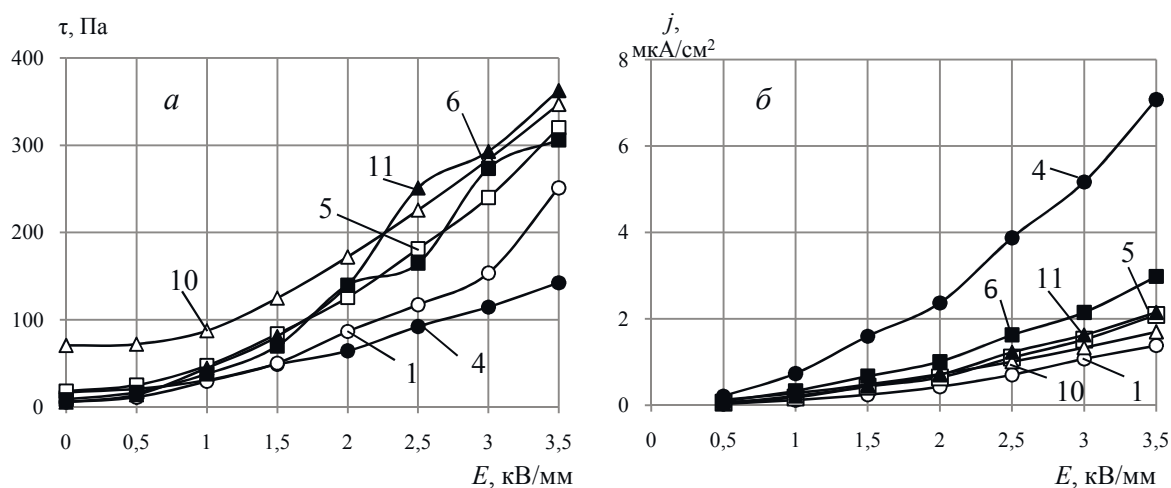


Рис. 4. Зависимости напряжения сдвига (а) и плотности тока (б) ЭРЖ I группы от напряженности электрического поля при скорости сдвига 17,2 с⁻¹: 1 – ЭРЖ-1; 4 – ЭРЖ-4; 5 – ЭРЖ-5; 6 – ЭРЖ-6; 10 – ЭРЖ-10; 11 – ЭРЖ-11

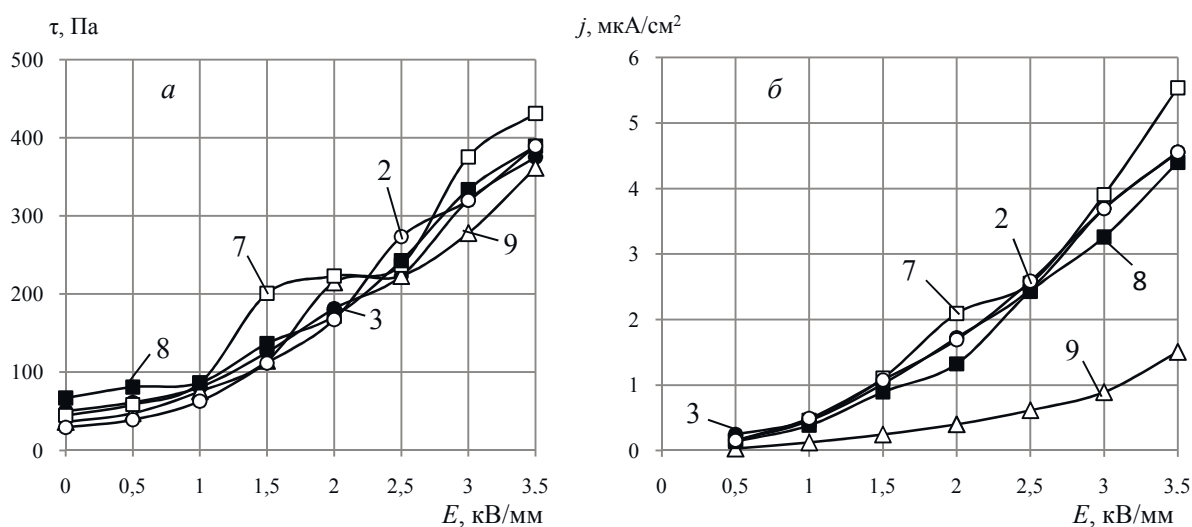


Рис. 5. Зависимости напряжения сдвига (а) и плотности тока (б) ЭРЖ II группы от напряженности электрического поля при скорости сдвига 17,2 с⁻¹: 2 – ЭРЖ-2; 3 – ЭРЖ-3; 7 – ЭРЖ-7; 8 – ЭРЖ-8; 9 – ЭРЖ-9

Измерения показали, что ЭРЖ I и II групп проявляют существенный электрореологический эффект (230–440 Па) и могут быть использованы в слоистых и оболочковых элементах. Наибольшие значения увеличения напряжения сопротивления сдвигу (440 Па) в электрическом поле напряженностью 3,5 кВ/мм показал образец ЭРЖ-7 с наполнителем № 7, однако проводимость этого образца также самая высокая. Для проведения испытаний в макете оболочкового элемента в качестве электроуправляемого слоя были выбраны образцы ЭРЖ-10 и ЭРЖ-11, имеющие оптимальные характеристики в электрическом поле напряженностью 3,5 кВ/мм при скорости сдвига $17,2 \text{ с}^{-1}$: высокие значения напряжения сдвига – 368 Па и 360 Па и низкие плотности тока – $2,1 \text{ мкА/см}^2$ и $1,7 \text{ мкА/см}^2$ соответственно.

Диэлектрические свойства ЭРЖ. С целью выяснения особенностей поляризации электрочувствительных материалов в электрическом поле и установления степени корреляции поляризационных и реологических характеристик исследованы электрофизические параметры рассматриваемых электроуправляемых текучих материалов. Основным электрофизическим параметром материалов, характеризующим степень поляризации среды в электрических полях, является комплексная диэлектрическая проницаемость $\epsilon^* = \epsilon' + i\epsilon''$ (i – мнимая единица). Для измерения электрофизических свойств жидкостей, чувствительных к внешним полям, использована трехэлектродная ячейка.

Зависимости компонент комплексной диэлектрической проницаемости ЭРЖ всех образцов от частоты электрического поля показаны на рис. 6 и 7. Как видно из представленных данных, величины действительной (ϵ') и мнимой (ϵ'') компонент диэлектрической проницаемости ЭРЖ с ортофосфатами алюминия снижаются в исследованном частотном диапазоне, не показывая максимума на частотной зависимости. Для образцов I группы ЭРЖ $\Delta\epsilon' = 1,2\text{--}2,7$; $\epsilon'' = 0,9\text{--}1,7$. Здесь $\Delta\epsilon'$ – разница значений действительных компонент (ϵ') на частотах 100 Гц и 100 кГц, ϵ'' – максимальное значение мнимой компоненты на частоте 100 Гц. Для образцов II группы ЭРЖ $\Delta\epsilon' = 3,2\text{--}3,7$; $\epsilon'' = 2,0\text{--}2,7$. Максимумы на зависимости $\epsilon''(f)$, вероятно, имеют место в диапазоне частот менее 100 Гц. Предполагается отсутствие Максвелл-Вагнеровской поляризации в исследуемом диапазоне частот $10^2\text{--}10^5$ Гц.

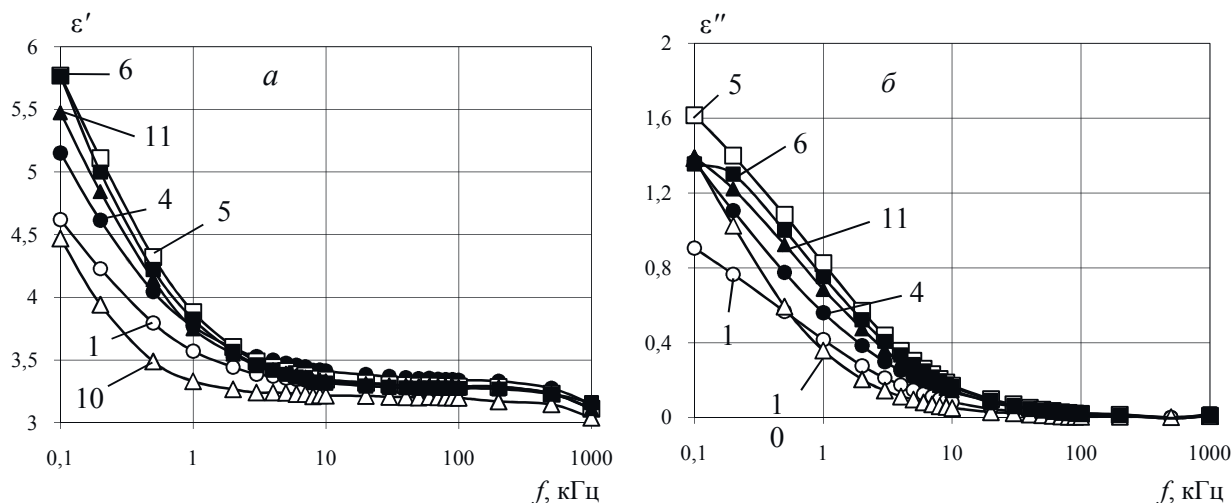


Рис. 6. Зависимость действительной (а) и мнимой (б) компонент диэлектрической проницаемости ЭРЖ I группы от частоты электрического поля: 1 – ЭРЖ-1; 4 – ЭРЖ-4; 5 – ЭРЖ-5; 6 – ЭРЖ-6; 10 – ЭРЖ-10; 11 – ЭРЖ-11

По полученным результатам 11 образцов из табл. 1 можно разделить на две группы (табл. 2). Значения напряжения сопротивления сдвигу и плотность тока приведены при напряженности электрического поля 3,5 кВ/мм и скорости сдвига $17,2 \text{ с}^{-1}$.

Напряжение сдвига, плотность тока, компоненты диэлектрической проницаемости в пределах каждой из групп близки между собой, в то время как для разных групп наблюдается существенное отличие в этих величинах. Исключение составляет ЭРЖ-4, которая по сво-

им диэлектрическим характеристикам относится к I группе, но показывает низкие электро-реологические характеристики.

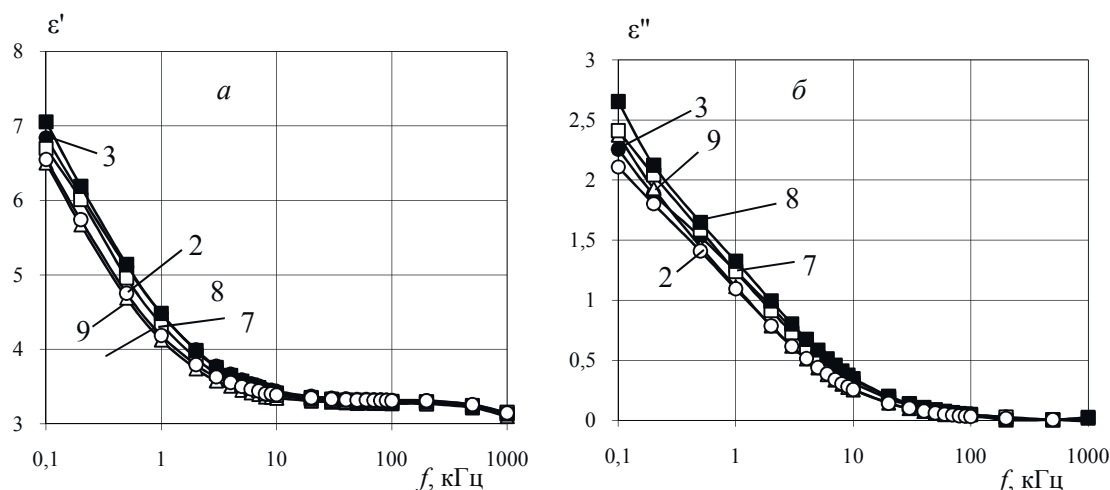


Рис. 7. Зависимость действительной (а) и мнимой (б) компонент диэлектрической проницаемости ЭРЖ II группы от частоты электрического поля: 2 – ЭРЖ-2; 3 – ЭРЖ-3; 7 – ЭРЖ-7; 8 – ЭРЖ-8; 9 – ЭРЖ-9

Таблица 2

Характерные диэлектрические параметры ЭРЖ

Группа	ЭРЖ	$\Delta\epsilon'$	ϵ''	τ , Па	j , мкА/см ²
I	ЭРЖ-1, ЭРЖ-4, ЭРЖ-5, ЭРЖ-6, ЭРЖ-10, ЭРЖ-11	1,2–2,7	0,9–1,7	230–360	1,3–3
II	ЭРЖ-2, ЭРЖ-3, ЭРЖ-7, ЭРЖ-8, ЭРЖ-9	3,2–3,8	2,1–2,7	365–440	4,4–5,6

Особенности вынужденных колебаний макета оболочкового элемента с электроуправляемым материалом. Колебательные характеристики макета оболочкового элемента определяли на вибростенде. Зазор между внутренней и внешней оболочками элемента заполняли электроуправляемым слоем. Вес заполненного элемента составляет 300 г. В качестве электроуправляемого слоя были использованы ЭРЖ на основе ортофосфата алюминия в трансформаторном масле: ЭРЖ-10, содержащая 15 мас.% наполнителя № 10, и ЭРЖ-11, содержащая 40 мас.% наполнителя № 11.

Амплитудно-частотные характеристики колебаний внутренней оболочки элемента с ЭРЖ-10 и ЭРЖ-11 показаны на рис. 8 и 9. Как видно из данных, представленных на рис. 8, демпфирующее действие электроуправляемого слоя с ЭРЖ-11, находящегося в зазоре между внешней и внутренней оболочкой макета, незначительно. Снижение амплитуды вынужденных колебаний на резонансной частоте 15 Гц при амплитуде вынуждающей силы 2,5 Н в электрическом поле напряженностью 1,5 кВ/мм по сравнению с амплитудой колебаний в отсутствие поля составило всего 1,12 раза. Видимо, при высоком содержании наполнителя в ЭРЖ-11 (40 мас.%) в электрическом поле формируются слишком жесткие структуры, прочно связывающие между собой обе оболочки элемента и препятствующие эффективному гашению колебаний внутренней оболочки элемента.

Увеличение демпфирования может быть достигнуто при использовании более низкоконцентрированной и, соответственно, менее вязкой ЭРЖ-10. На рис. 9 показаны амплитудно-частотные характеристики внутренней оболочки макета с зазором, заполненным ЭРЖ-10 с концентрацией наполнителя 15 мас.%. В этой части исследований во внутреннюю оболочку элемента для увеличения её веса был помещен стальной груз весом 81 г. В этом случае получено снижение амплитуды вынужденных колебаний внутренней оболочки элемента в

1,5 раза на резонансной частоте 16 Гц в электрическом поле напряженностью 1,5 кВ/мм и колебаний в отсутствие поля. Под воздействием электрического поля происходит структурирование частиц ортофосфата алюминия, использованного в качестве наполнителя ЭРЖ, что обеспечивает повышение вязкости в зазоре между оболочками элемента и уменьшение интенсивности движения внутреннего цилиндра элемента относительно внешнего цилиндра.

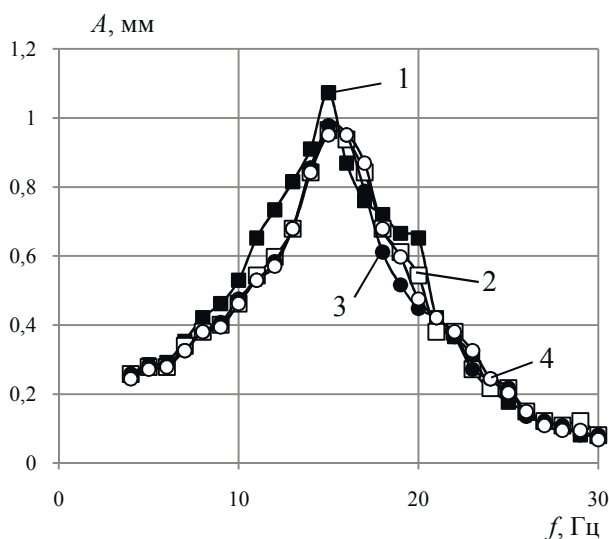


Рис. 8. Амплитудно-частотные характеристики колебаний внутренней оболочки макета с ЭРЖ-11 (наполнитель № 11, 40 мас.%) при амплитуде вынуждающей силы 2,5 Н в электрическом поле: 1 – $E = 0$, 2 – 0,5 кВ/мм, 3 – 1 кВ/мм, 4 – 1,5 кВ/мм

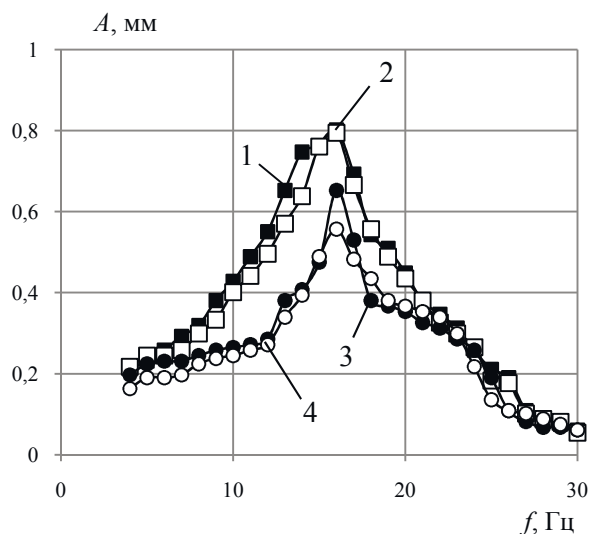


Рис. 9. Амплитудно-частотные характеристики колебаний внутренней оболочки макета с ЭРЖ-10 (наполнитель № 10, 15 мас.%) при амплитуде вынуждающей силы 2,5 Н в электрическом поле (во внутренней оболочке стальной груз): 1 – $E = 0$, 2 – 0,5 кВ/мм, 3 – 1 кВ/мм, 4 – 1,5 кВ/мм

При заполнении внутренней оболочки элемента жидкостью (трансформаторное масло, масса 12 г) характер колебаний несколько изменяется. На рис. 10 показаны амплитудно-частотные характеристики колебаний внутренней оболочки макета, заполненной маслом, с зазором между внутренней и внешней оболочками, заполненным ЭРЖ-10.

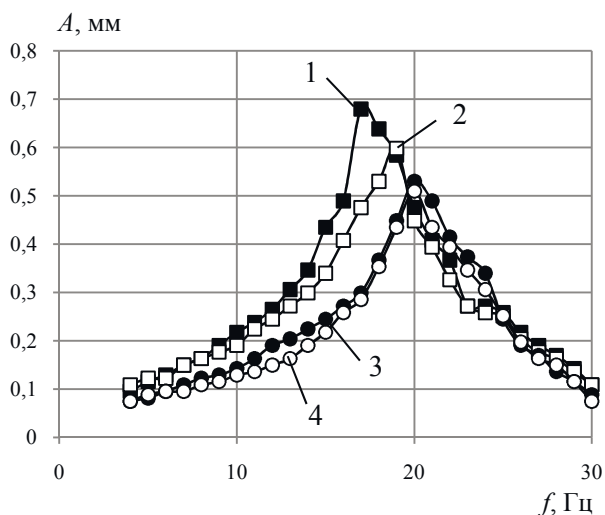


Рис. 10. Амплитудно-частотные характеристики колебаний внутренней оболочки макета с ЭРЖ-10 (наполнитель № 10, 15 мас.%) при амплитуде вынуждающей силы 2,5 Н в электрическом поле (внутренняя оболочка заполнена маслом): 1 – $E = 0$, 2 – 0,5 кВ/мм, 3 – 1 кВ/мм, 4 – 1,5 кВ/мм

Как видно из данных, представленных на рис. 10, резонансная частота колебаний внутренней оболочки макета в отсутствие поля составляет 17 Гц. В электрическом поле напряженностью 1,5 кВ/мм при амплитуде вынуждающей силы 2,5 Н на этой же частоте амплитуда колебаний внутренней оболочки макета уменьшается более чем в 2,5 раза. На резонансную

частоту колебаний внутренней оболочки макета влияет ее масса, жесткость пружин и величина вязкого трения в зазоре, которая зависит от напряженности электрического поля. При уменьшении общей массы внутренней оболочки со 103 г при использовании стального груза до 35 г при заполнении ее маслом изменение вязкого трения в зазоре в электрическом поле напряженностью 1,5 кВ/мм приводит к увеличению резонансной частоты до 20 Гц, при этом амплитуда колебаний на резонансе уменьшается в 1,4 раза.

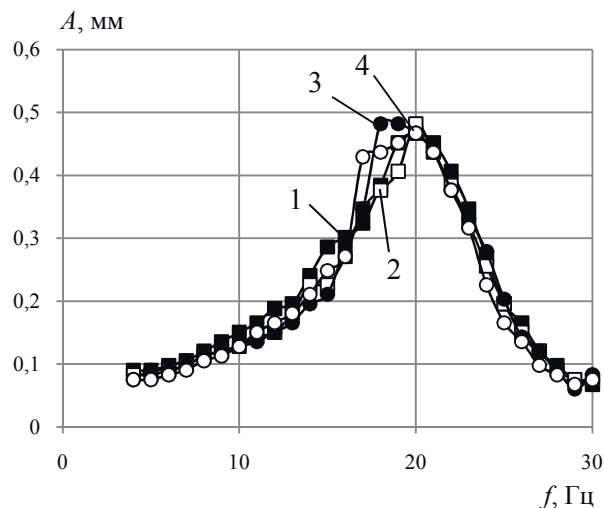


Рис. 11. Амплитудно-частотные характеристики колебаний внешней оболочки макета с ЭРЖ-10 (наполнитель № 10, 15 мас.%) при амплитуде вынуждающей силы 2,5 Н в электрическом поле (внутренняя оболочка заполнена маслом): 1 — $E = 0$, 2 — 0,5 кВ/мм, 3 — 1 кВ/мм, 4 — 1,5 кВ/мм

Следует отметить, что колебания внешней оболочки практически не зависят от напряженности электрического поля (рис. 11). Таким образом, воздействие электрического поля приводит к затуханию колебаний внутренней оболочки элемента, не оказывая влияния на интенсивность движения внешней оболочки.

Заключение. В ходе исследований продемонстрирована принципиальная возможность создания резервуара транспортного средства слоистой конструкции в виде макета оболочкового элемента, способного к демпфированию вынужденных колебаний внутренней оболочки, где функцию промежуточного вязкоупругого слоя между оболочками выполняет электроуправляемая жидкость. Применение в качестве наполнителя ЭРЖ безводного высокодисперсного ортофосфата алюминия, термообработанного в изотермических условиях, позволяет увеличить почти на два порядка напряжение сдвига при непрерывном куэттовском течении в электрическом поле.

При определении амплитудно-частотных характеристик колебаний цилиндрического оболочкового элемента с электроуправляемым слоем жидкости, содержащимся в зазоре между внутренней и внешней оболочками, в диапазонах частот 4–30 Гц и напряженностей электрического поля 0–1,5 кВ/мм установлено снижение амплитуды вынужденных колебаний внутренней оболочки элемента от 1,5 до 2,5 раз на резонансной частоте.

Полученные результаты показывают возможность целенаправленного управления вынужденными колебаниями в слоистых объектах и могут найти применение при создании оболочковых конструктивных элементов для гашения механических колебаний в резервуарах при перевозке жидкотекучих материалов.

Литература

1. Нашиф, А. Демпфирование колебаний / А. Нашиф, Д. Джоунс, Дж. К. Хендерсон. — М. : Мир, 1988. — 448 с.
2. Choi, Y. Vibration characteristics of a composite beam containing an electrorheological fluid / Y. Choi, A. F. Sprecher, H. Conrad // J. of Intelligent Material Systems and Structures. — 1990. — Vol. 1, No. 1. — P. 91–104.

3. Berg, C. D. Composite structure analysis of a hollow cantilever beam filled with electro-rheological fluid / C. D. Berg, L. F. Evans, P. R. Kermode // *J. of Intelligent Material Systems and Structures*. – 1996. – Vol. 7, No. 5. – P. 494–502.
4. Qiu, J. Damping effect of multi-layer beams with embedded electro-rheological fluid / J. Qiu, J. Tani, T. Hajika // *J. of Intelligent Material Systems and Structures*. – 1999. – Vol. 10, No. 7. – P. 521–529.
5. Tabassian, R. Stability of smart sandwich beams with cross-ply faces and electrorheological core subjected to axial loads / R. Tabassian, J. Rezaeepazhand // *J. of Reinforced Plastics and Composites*. – 2012. – Vol. 31, No. 1. – P. 55–64.
6. Mohammadi, F. Vibration analysis and design optimization of sandwich cylindrical panels fully and partially treated with electrorheological fluid materials / F. Mohammadi, R. Sedaghati // *J. of Intelligent Material Systems and Structures*. – 2012. – Vol. 23, No. 15. – P. 1679–1697.
7. Eshchenko, L. Characteristic features of rheological behavior of dielectric layered-structure suspensions of hydrated metal oxides in an electric field / L. Eshchenko, E. Korobko, Z. Novikova // *J. of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1045. – P. 012009.