

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Полякова Юрия Анатольевича

«Динамический анализ комплексных виброзащитных систем транспортных средств», представленную на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры (технические науки)

**Актуальность темы.** Моделирование сложных механических систем путём представления их системами абсолютно твёрдых и упругих тел, соединённых силовыми элементами и кинематическими парами различных типов, представляет собой один из наиболее эффективных способов исследования виброн нагруженности современных транспортных средств. Развитие и совершенствование методов динамического анализа вибрационного состояния конструкций транспортных средств остается актуальной научной задачей. В частности, значительный научный интерес представляет разработка пространственных нелинейных динамических моделей, достаточно полно отражающих особенности элементов виброзащитных систем в составе рассматриваемой конструкции. Развитие методов формирования таких моделей с использованием уравнений движения как абсолютно твердых, так и деформируемых тел, допускающих произвольное пространственное перемещение с учетом точного описания ориентации тел, способствует расширению возможностей оценки и прогнозирования виброн нагруженности конструкций современных транспортных средств, обеспечивает выбор рациональных параметров элементов виброзащитных систем на этапах проектирования.

**Научная новизна полученных результатов.** В процессе решения задач, поставленных в диссертационной работе, автору получил следующие результаты, имеющие признаки научной новизны:

– разработаны методы формирования комплексных динамических моделей виброзащитных систем транспортных средств, кабин, подсистем «человек – подпрессоренное сиденье»;

– предложен оригинальный метод включения в динамические модели транспортных средств упругих тел на основе разделения их движения на произвольное пространственное перемещение как абсолютно твердого тела и малые относительные упругие вибрации;

– сформированы новые пространственные многозвенные динамические модели виброзащитных систем (подвесок транспортных средств, подвесок кабин, систем виброизоляции кузовов и силовых агрегатов, подсистем «человек – подпрессоренное сиденье»);

– созданы пространственные динамические модели ряда транспортных средств, перемещающихся по дорогам с твёрдым покрытием, с учётом специфики конструкций и особенностей элементов виброзащитных систем;

– осуществлен подробный динамический анализ параметров элементов виброзащитных систем ряда транспортных средств и на основе результатов по оценке виброн нагруженности рассмотренных конструкций выработаны рекомендации по выбору рациональных параметров и совершенствованию конструкций виброзащитных систем.

**Теоретическая значимость исследования.** Рассмотрен ряд задач, полноценное решение которых на этапах проектирования было весьма проблематично и осуществлялось, в основном, по результатам дорожных испытаний.

Выполнен подробный динамический анализ влияния на вибронгруженность транспортного средства параметров элементов виброзащитных систем с учётом их динамических жёсткостей, взаимного динамического воздействия элементов подвесок, несущих конструкций, неподрессоренных и поддрессоренных масс, а также особенностей конструкций направляющих аппаратов подвесок.

Благодаря детализации особенностей направляющих аппаратов подвесок транспортного средства, кабины и сиденья в сочетании с применением дифференциальных уравнений больших перемещений тел удалось подробно проанализировать вибронгруженность транспортных средств при перемещении по участкам с высоким уровнем случайного внешнего воздействия, а также при переезде импульсных неровностей, в условиях значительных линейных и угловых относительных перемещений элементов виброзащитных систем.

Оценено влияние упругих форм колебаний рамы, кабины и кузова на вибронгруженность транспортного средства, проявляющееся на частотах свыше 10 Гц.

Учёт влияния деталей крепления упругих, демпфирующих и направляющих элементов подвесок (в частности, сайлент-блоков, шарниров и т. д.), а также опор-виброизоляторов на изменение характера вибронгруженности конструкции транспортного средства, проявляющихся на частотах свыше 10 Гц, позволил на стадии проектирования предотвратить появление характерных спектральных пиков, в несколько раз превышающих общий уровень спектра, и подобрать рациональные упругодемпфирующие характеристики указанных элементов.

Осуществлён подробный динамический анализ параметров подвески кабины благодаря разработке детальной модели виброзащитной системы с уточнённым представлением её элементов.

На высоком научном уровне рассмотрена проблема оценки и динамического анализа вибронгруженности рабочих мест водителей, проанализировано влияние параметров подвески и подушки сиденья с учётом взаимодействия подсистемы «человек – сиденье» с остальными элементами пространственной динамической модели транспортного средства.

Благодаря уточнению представления упруго-диссипативных связей в модели тела человека, расположенного на сиденье, получен экспериментально подтверждённый второй максимум графика модуля передаточной функции поддрессоренного сиденья, соответствующий собственным колебаниям внутренних органов человека в диапазоне частот 6...8 Гц; расчетная ордината второго резонансного максимума приблизилась к экспериментальным данным, и получен соответствующий межрезонансный пик графика спектральной плотности вертикальных ускорений на подушке сиденья и его остова.

**Практическая значимость полученных результатов.** Представлены рекомендации по рациональному проектированию и дальнейшему совершенствованию элементов виброзащитных систем транспортных средств, кабин, подсистем «человек – поддрессоренное сиденье».

Предложенные методы формирования динамических моделей, а также результаты динамического анализа параметров виброзащитных систем использованы в процессе создания конструкций многоуровневых систем виброзащиты транспортных средств для современных машиностроительных производств, среди которых ООО «Волгоградская машиностроительная компания «ВГТЗ»

(Волгоград), ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (Москва), ООО «ОКБ «АНТ» (Набережные Челны), ОАО «Военно-инженерный центр» группы «ГАЗ» (Нижний Новгород), компания «Shinjeong Development Corporation» (Ульсан, Южная Корея), АМО «ЗиЛ» (Москва).

**Основное содержание диссертации.** В начале диссертации обоснована актуальность выбора темы, определена степень её разработанности, указаны цель и задачи, предмет и объекты исследования. Далее выявлена научная новизна, после чего выделены основные положения, выносимые на защиту. Приведены теоретическая и практическая значимость результатов исследования. Имеются необходимые сведения об апробации работы, публикациях и о личном вкладе соискателя.

Первая глава содержит обзор имеющихся публикаций в сфере моделирования виброн нагруженности транспортных средств. Рассмотрены различные расчётные схемы, определены допущения при их построении и сферы применения, указаны конкретные достоинства и недостатки. На основе литературного анализа удалось выявить место рассматриваемой работы среди многочисленных работ по указанному направлению исследования и определить основные задачи необходимых исследований.

Во второй главе сформированы дифференциальные уравнения больших перемещений тел пространственной системы, соединённых кинематическими связями, то есть с учётом точной угловой ориентации тел, без допущения о малости углов поворота. Предложено отказаться от предположения о малых перемещениях тел, часто применявшемся при проведении расчётов виброн нагруженности транспортных средств, и осуществлять их на базе уравнений, допускающих произвольное пространственное движение тел. Указанный подход открыл в программе ФРУНД возможности более точного учёта пространственного характера колебаний, многозвенности структуры расчётной системы, динамических жёсткостей и динамических коэффициентов демпфирования элементов виброзащитных систем, геометрических нелинейностей, связанных с кинематическими особенностями элементов конструкции, а также соответствующих нелинейностей характеристик упругодемпфирующих элементов, импульсных и случайных дорожных возмущений.

Предложен метод расчёта, в котором упругие колебания конечно-элементной модели рассматриваются совместно с большими перемещениями подвижного жёсткого каркаса упругого тела в составе пространственной динамической модели транспортного средства. Такое сочетание даёт возможность принимать во внимание наличие инерционной связи между большими перемещениями тела и соответствующими упругими деформациями. В результате учтено влияние на виброн нагруженность транспортного средства упругих форм колебаний рамы, кабины и кузова, комплексный характер их взаимодействия с элементами виброзащитных систем и подсистемами динамической модели транспортной машины.

В третьей главе представлен метод формирования комплексных динамических моделей виброзащитных систем транспортных средств. В состав динамической модели включаются элементы виброзащитных систем с учётом особенностей их геометрических параметров и установки в составе транспортного средства при тщательной проработке элементов направляющего аппарата и креплений к объектам виброзащиты и элементам несущих систем (раме, кабине или каркасу цельнометаллического фургона). Созданы оригинальные много-

звенные модели рессорных, пружинных, пневматических и пневмогидравлических подвесок транспортных средств.

Разработка уточненных и детализированных моделей даёт возможность принимать во внимание динамическое взаимодействие элементов виброзащитных систем с подрессоренными и непрессоренными массами в составе модели транспортного средства. В частности, удаётся уточнить кинематику упругого и демпфирующего элементов подвесок, что позволяет учесть нелинейное изменение жёсткостей и коэффициентов демпфирования. Помимо этого, учитываются нелинейности гистерезисных динамических характеристик упругих элементов подвесок и шин, что обеспечивает учёт динамической жёсткости упругого элемента подвески и шины в зависимости от ширины гистерезисной петли и амплитуды цикловых колебаний при внешнем дорожном возмущении.

В трёх последующих главах выполнен подробный анализ параметров элементов подвесок на характеристики вибронагруженности транспортных средств с рессорными, рычажно-пружинными, пневмогидравлическими подвесками. На базе полученных результатов выработаны рекомендации по рационализации параметров элементов подвесок транспортных средств в период проведения проектных работ. Отмечена практическая реализация таких предложений в процессе проектирования виброзащитных систем конкретных транспортных средств.

В седьмой главе рассматривается моделирование элементов подвесок кабины транспортного средства. Обычно особенности крепления кабины в составе пространственной модели машины или не учитывали вообще, или моделировали с помощью линейных пружин с параллельным включением линейных демпферов или без них. Предложенный автором метод формирования динамических моделей кабин при их включении в пространственные динамические модели транспортных средств предполагает учёт геометрических особенностей направляющего аппарата, расположения амортизаторов и упругих элементов, наличия стабилизатора в составе подвески кабины с учётом упругодемпфирующих свойств деталей крепления элементов подвески кабины.

В восьмой главе рассмотрено влияние параметров подвески и подушки сиденья с учётом сложного характера взаимодействия подсистемы «человек – сиденье» с остальными элементами пространственной динамической модели транспортного средства. В разработанных моделях «человек – сиденье», включенных в модель транспортного средства, осуществляется взаимодействие подрессоренных масс человека, сиденья и элементов направляющего аппарата подвески сиденья с учётом динамического изменения жёсткостей подвески, подушки и спинки сиденья в зависимости от величины сухого трения и амплитуды дорожного воздействия. Учитывается также нелинейность характеристик демпфирования подвески, подушки и спинки сиденья. Учитываются также нелинейность характеристик демпфирования подвески, подушки и спинки сиденья, а также ограничительные буферы подушки и подвески сиденья.

Уточнение представления упругодемпфирующих связей в модели тела человека, расположенного на сиденье, позволило приблизить результаты расчетов к экспериментальным данным.

***Соответствие Паспорту научной специальности.*** Рецензируемая диссертация по своему содержанию соответствует Паспорту научной специаль-

сти 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры (технические науки) по следующим пунктам:

п. 9 – Математическое моделирование поведения технических объектов и их несущих элементов при статических, динамических, тепловых, коррозионных и других воздействиях;

п. 10 – Методы нахождения оптимальных и/или рациональных конструктивных решений, включая выбор материалов, силовых схем, размеров и т. п.

**Публикации по тематике диссертации.** Опубликованные статьи и тезисы отражают научные результаты диссертации, соответствуют теме представленной научной работы и прошли необходимое рецензирование. Достаточно полное раскрытие содержания выполненных исследований обеспечено публикациями в 62 печатных работах. В их числе 27 статей в журналах, включённых в Перечень ВАК, 1 монография, а также 3 статьи, проиндексированные в международных базах Web of Science и Scopus.

Таким образом, можно констатировать выполнение диссертантом п. 11, 13 Положения о присуждении учёных степеней, содержащих требования к публикации основных результатов диссертации.

**Апробация диссертационного исследования.** Результаты и выводы, сформулированные диссертантом, прошли всестороннюю апробацию. Обсуждение диссертационной работы осуществлялось на семинарах лаборатории вибромеханики Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН и заседаниях коллективов кафедр известных машиностроительных вузов: «Динамика, прочность машин и сопротивление материалов», «Наземные транспортные средства» ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет»; «Сопротивление материалов», «Техническая механика», «Автомобили и двигатели» ФГБОУ ВО «Московский государственный индустриальный университет»; «Автомобили» ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет». Основные положения и выводы докладывались и обсуждались в 2003 – 2019 годах в ходе специализированных международных и всероссийских конференций. В процессе подготовки публикаций по теме диссертации результаты исследований прошли рецензирование специалистами в области моделирования и исследования виброзащитных систем транспортных средств.

**Обоснованность и достоверность выводов, рекомендаций, представленных в диссертационной работе,** обеспечивается в процессе построения динамических моделей виброзащитных систем транспортных средств применением экспериментальных характеристик ряда элементов систем виброзащиты, полученных в ходе стендовых испытаний, а также сопоставлением расчётных характеристик виброн нагруженности транспортных средств с экспериментальными данными при заездах на участках дорог автополигонов НИЦИАМТ и ГАЗ. Экспериментальные характеристики получены при непосредственном участии диссертанта.

Автором проанализированы результаты, полученные другими исследователями в сфере моделирования элементов виброзащитных систем и исследования виброн нагруженности транспортных средств.

В основе разработанных методов формирования комплексных динамических моделей виброзащитных систем, кабин, подсистем «человек – подпрессоренное сиденье» при их включении в пространственные динамические модели транспортных средств, а также выполненных расчётов, лежат кор-

ректные современные методы динамического анализа пространственных механических систем, численные методы решения систем дифференциальных уравнений, методы математической статистики, метод конечных элементов, методы теории транспортных машин, экспериментальные методы исследования вибронагруженности транспортных средств и элементов виброзащитных систем.

Общие выводы по работе соответствуют поставленным задачам исследования и в достаточной мере отражают суть диссертации. Содержание автореферата полностью соответствует тексту диссертации.

Таким образом, научные положения, выводы и рекомендации обоснованы теоретической проработкой научной проблемы, применением современного математического аппарата, экспериментальным подтверждением теоретических выводов.

В качестве *замечаний по выполненной работе* следует обратить внимание на следующее.

1. Подробный анализ публикаций по теме диссертации, выполненный автором, в значительной мере ограничивается работами, выполненными в СССР и РФ. Представляется необходимым учесть результаты зарубежных исследователей.

2. На странице 110 диссертации автор утверждает, что «рассмотрение малых упругих колебаний конечно-элементной модели совместно с большими перемещениями подвижного жёсткого каркаса упругого тела» является новым. Однако разделение движения упругого тела на произвольное пространственное движение как абсолютно твердого тела и малые относительные упругие перемещения предложено Крейгом и Бэмптоном в 60-х годах прошлого века. Этот подход используется практически всеми профессиональными программами моделирования динамики систем тел. В диссертации отсутствует сравнительный анализ существующих методов моделирования динамики упругих тел с предложенным в диссертации подходом.

3. На странице 106 указано, что дифференциально-алгебраические уравнения движения (2.2.1) имеют индекс два, в то время как это уравнения индекса один. На странице 127 ошибочно утверждается, что матрица этих уравнений является неотрицательной. Там же приводится некорректное обоснование ухода решения с уравнений связей в процессе численного интегрирования.

4. При описании уравнений движения в главе 2 автор допускает ряд неточностей и опечаток, например:

- в выражении для матрицы направляющих косинусов на странице 108,
- в выражении для момента силы в формуле (2.3.1),
- в выражении для относительной скорости на странице 112.

5. В разделе 3.7 приведены только очень простые модели виброизоляторов. В современной научной литературе можно найти гораздо более сложные модели, включающие параллельное соединение элементов различного типа, в том числе нелинейных пружин, фрикционных элементов, линейных и нелинейных демпферов и элементов, являющихся последовательным соединением упругого и диссипативного звеньев (модель Максвелла).


**Заключение по представленной работе.** Указанные замечания не затрагивают высокой научной и практической ценности представленной работы, которая содержит решение актуальной научно-технической проблемы, имеющей большое значение для транспортного машиностроения. Ценность работа связана с расширением возможностей прогнозирования вибронагруженности кон-

струкций транспортных средств, а также выбором рациональных параметров виброзащитных систем на этапах проектирования по результатам динамического анализа. Анализ основан на рассмотрении комплексного пространственного взаимодействия элементов виброзащитных систем, объектов виброзащиты и несущих конструкций транспортных средств с учётом детализации элементов виброзащитных систем и совершаемых ими больших перемещений в составе нелинейных динамических моделей транспортных средств при случайных и импульсных дорожных воздействиях.

Представленная диссертационная работа Полякова Юрия Анатольевича соответствует п. 9, 10 Паспорта научной специальности 01.02.06., отвечает требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, представленным в п. 9 Положения о присуждении учёных степеней, а сам диссертант достоин присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры (технические науки).

Официальный оппонент:

Профессор, руководитель лаборатории вычислительной механики кафедры «Механика и динамика и прочность машин» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», доктор физико-математических наук (01.02.01 – Теоретическая механика), профессор

  
Погорелов Дмитрий Юрьевич  
«31» августа 2020 г.

241035, г. Брянск, бульвар 50-летия Октября, д. 7;  
тел.: (4832) 56-86-37;  
e-mail: pogorelov@umlab.ru

