

На правах рукописи

Герасимов Иван Михайлович

**ПОВЫШЕНИЕ ПЛАВНОСТИ ХОДА АВТОМОБИЛЕЙ
ПУТЁМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОДВЕСКИ
С РЕЛАКСАЦИОННЫМ ГИДРОАМОРТИЗАТОРОМ**

Специальность 05.05.03 – Колёсные и гусеничные машины

**Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук**

**С-Петербург
2002**

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете

Научный руководитель – канд. техн. наук, профессор Волков Ю.П.

Официальные оппоненты:

Доктор техн. наук, профессор Добромиров В.Н.

Кандидат техн. наук, доцент Панов Н.А.

Ведущая организация:

ОАО «Всероссийский научно-исследовательский институт транспортного машиностроения» (ВНИИТМ)

Защита диссертации состоится 21 января 2003 года в 16⁰⁰ на заседании диссертационного Совета Д 212.229.24 в СПбГПУ по адресу: 195251, С-Петербург, ул. Политехническая, 29, I-й учебный корпус, ауд. 41

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГПУ.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2002 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор

Смирнов В.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Высокие требования к плавности хода транспортных средств при движении по любым дорогам, предъявляемые ГОСТ 12.1.012-90 и международным стандартом ISO-2631 стимулируют разработку систем поддресоривания и, в частности, их демпфирующих элементов (амортизаторов), обеспечивающих высокую плавность хода в различных дорожных условиях. На высокочастотном дорожном профиле с малой высотой неровности (булыжная мостовая, асфальт среднего качества и т.п.) для обеспечения наилучшей плавности хода желательно свести к минимуму сопротивление амортизатора на ходе сжатия. При движении в тяжелых дорожных условиях (например, грунтовая дорога, разбитый асфальт) желательно напротив, иметь высокое усилие на ходе сжатия, повысив тем самым общую энергоёмкость подвески и снизив вероятность пробоя. Теоретические исследования и практический опыт показывают, что в полной мере удовлетворить эти требования, используя обычные автомобильные амортизаторы, практически невозможно.

Известные конструкции управляемых амортизаторов, позволяющие менять их характеристики в зависимости от условий движения, усложняют подвеску и повышают её стоимость, и потому их применение в массовых автомобилях в настоящее время не является экономически целесообразным. Кроме того, подобные конструкции, как правило, не обладают автоматической приспособляемостью. Так, регулировка амортизаторов с дистанционным управлением «Rancho» осуществляется водителем. Для регулировки амортизаторов той же фирмы без дистанционного управления, а также различных моделей регулируемых амортизаторов фирмы Konі необходимо покинуть место водителя, а то и снять амортизатор.

Существуют конструкции гидроамортизаторов, демпфирование которых благодаря дополнительным канавкам на поверхности рабочего цилиндра зависит не только от скорости перемещения штока, но и от его хода (амортизаторы «VARIO» фирмы «Sachs», «PRO-GAS» фирмы «Boge», «SENSA-TRAK» фирмы «Монго»). Однако проблему утери контакта колеса с дорогой данное конструктивное решение практически не решает. Кроме того, при изготовлении таких амортизаторов сложно добиться приемлемой стабильности характеристик, зависящей от точности изготовления дополнительных канавок, при умеренной стоимости.

Известны также конструкции релаксационных подвесок, в которых вводится дополнительный упругий элемент, последовательно соединённый с амортизатором. Такая подвеска близка к оптимальной с точки зрения приспособляемости к различным условиям движения. Однако в реальных конструкциях автомобильных подвесок релаксационная подвеска не применяется по причине усложнения конструкции.

Поэтому актуальной является задача разработки и исследования демпфирующего элемента подвески, где релаксационный эффект имел бы место на ходе сжатия за счёт упругости жидкости. Это может быть осуществлено в амортизаторе

с большим объёмом жидкости и высоким усилием хода сжатия, который можно назвать «релаксационным». Усилие такого амортизатора зависит не только от скорости, но и от хода штока, что обеспечивает его приспособляемость к условиям движения. На ходе отбоя такой амортизатор работает как обычный, что препятствует потере контакта колеса с дорогой.

Целью исследования является повышение плавности хода внедорожных автомобилей путём применения я подвески с релаксационным гидроамортизатором, обладающим повышенной приспособляемостью к различным дорожным условиям.

В диссертации решаются следующие **задачи**.

1. Создание математической модели релаксационного гидроамортизатора, учитывающей сжатие жидкости.

2. Проверка адекватности математической модели и работоспособности конструкции путём проведения стендовых испытаний релаксационного амортизатора для перспективного автомобиля КАМАЗ.

3. Разработка математической модели, алгоритма и программы для расчёта параметров плавности хода автотранспортных средств с релаксационным амортизатором, включая создание методики генерации случайного дорожного профиля с заданными статистическими параметрами и обработку полученных параметров плавности хода в соответствии с государственными и отраслевыми стандартами.

4. Выбор оптимальных характеристик релаксационного амортизатора для грузового автомобиля и проведение расчётных исследований его эффективности.

Основные методы исследований. В теоретической части работы применено математическое моделирование численными методами с использованием ЭВМ. Для снятия характеристик релаксационного гидроамортизатора и определения его работоспособности проводились стендовые испытания на стенде, оборудованном современными средствами измерения и обработки результатов, прошедшими метрологическую аттестацию.

Обладают **научной новизной** следующие положения диссертационной работы:

1. Обоснование возможности применения в подвеске автомобиля релаксационного гидроамортизатора, обладающего повышенной приспособляемостью к различным дорожным условиям.

2. Математические модели релаксационного гидроамортизатора, учитывающие сжатие жидкости.

3. Методики расчёта реализации случайных дорожных профилей по заданным статистическим характеристикам.

4. Нелинейная математическая модель расчёта параметров плавности хода многоопорного транспортного средства, оснащённого релаксационными амортизаторами, с возможностью задания произвольного дорожного профиля и учётом поддрессирования кабины и сиденья водителя.

Практическая ценность диссертационной работы заключается в том, что обоснована целесообразность применения и подтверждена возможность практической реализации подвески с релаксационным амортизатором, что позволило, согласно расчётным исследованиям, повысить скорость движения автомобиля КАМАЗ с 24-27 км/ч до 46-50 км/ч при движении по изношенной булыжной дороге и с 15-20 км/ч до 30-35 км/ч при движении по разбитой грунтовой трассе.

Разработанные методики и созданное на их основе программное обеспечение позволяют на стадии проектирования определять конструктивные параметры подвески автомобиля, обеспечивающие наилучшую плавность хода.

Результаты работы внедрены в расчётно-конструкторскую практику ОАО «ВНИИТрансМаш», что подтверждено документом о внедрении.

Апробация работы. Основные положения диссертации доложены на научно-технической конференции «Инновационные наукоёмкие технологии для России», V Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования в технических университетах» и научном семинаре кафедры «Колёсные и гусеничные машины» СПбГПУ.

Кроме того, автор является победителем конкурса персональных грантов (стипендий) 1999 г. для студентов, аспирантов, молодых учёных и специалистов Санкт-Петербурга по теме «Повышение плавности хода автомобилей КАМАЗ за счёт использования релаксационного гидроамортизатора», что подтверждено справкой (приложением к диплому).

Публикации. По теме диссертации автором опубликованы три статьи. Основные результаты работы изложены в двух отчётах по научно-исследовательской тематике.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и списка литературы. Диссертация изложена на 131 странице машинописного текста, содержит 53 рисунка, 17 таблиц, 123 наименования литературных источников. Общий объём работы составляет 142 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведён обзор работ в области исследования и совершенствования подвесок транспортных средств, гидравлических систем, а также работ, посвящённых вопросам теоретических и экспериментальных исследований и обработке результатов; проанализированы современное состояние и тенденции развития автомобильных систем поддрессоривания; сделан вывод о целесообразности детального рассмотрения релаксационного гидроамортизатора в качестве одного из путей повышения плавности хода автомобилей в различных дорожных условиях.

Общие проблемы колебаний транспортных средств рассмотрены в работах Дербаремдикера А.Д., Дмитриева А.А., Забавникова Н.А., Пархиловского И.Г., Певзнера Я.М., Прутчикова О.К., Ротенберга Р.В., Силаева А.А., Тельминова А.В., Хачатурова А.А., Чобитка В.А., Яценко Н.Н. и других.

Вопросам теории, расчёта гидравлических устройств и, в частности, гидроамортизаторов, посвящены работы Альтшуль А.Д., Башты Т.Н., Брагина Ю.И., Волкова Ю.П., Гамынина Н.С., Дербаремдикера А.Д., Марецкого П.К., Самойлова А.Д., Селивановских В.А. и других.

Существующие конструкции современных автомобильных гидроамортизаторов, их характеристики наиболее подробно описаны в книге Й. Раймпеля «Амортизаторы, шины и колёса автомобилей».

Вопросы, связанные с дорожным воздействием на транспортное средство, наиболее подробно рассмотрены в ряде работ Н.Н. Яценко, в частности, в монографии «Форсированные полигонные испытания грузовых автомобилей».

Публикации показывают, что в настоящее время в развитии автомобильных гидроамортизаторов имеют место следующие тенденции:

- повышение сопротивление демпфирования гидроамортизаторов на ходе сжатия;
- широкое применение однотрубных газовых амортизаторов;
- использование гидравлических амортизаторов, сопротивление которых зависит не только от скорости перемещения, но и от хода штока;
- применение амортизаторов, приспособляющихся к различным режимам движения (нагрузке автомобиля, дорожным условиям и т.д.) за счёт варьирования параметрами демпфирования, которые меняются автоматически, либо водителем.

Однако гидроамортизаторы, меняющие свои характеристики при изменении дорожных условий без вмешательства человека (адаптивные амортизаторы) широкого применения в автомобилестроении не нашли, что объясняется, главным образом, сложностью конструкции.

Поэтому представляет интерес амортизатор, представленный на рис. 1. При ходе сжатия открывается перепускной клапан 2. Как и в большинстве автомобильных гидроамортизаторов, площадь пропускного сечения этого клапана настолько велика, что сопротивлением поршня при первом приближении можно пренебречь и принять, что давления в полостях I и II равны. Жидкость, вытесняемая штоком, через дроссельное отверстие 6 перетекает в компенсационную камеру III. Избыточное давление в компен-

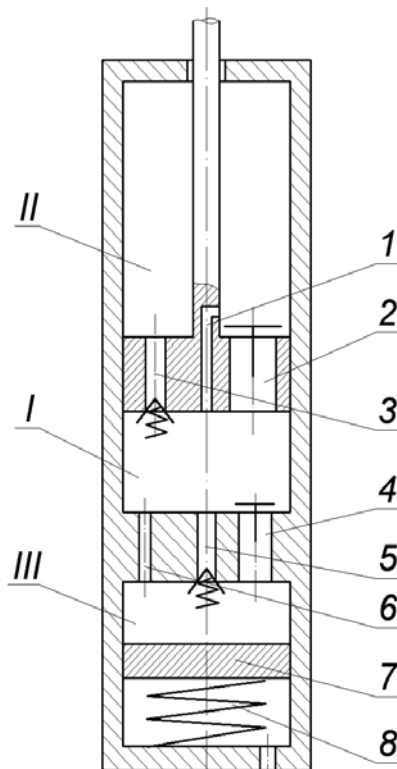


Рис.1. Расчетная схема релаксационного гидроамортизатора

- 1 - дроссельное отверстие хода отбоя; 2 - перепускное окно хода сжатия; 3 - предохранительный клапан хода отбоя; 4 - всасывающий обратный клапан; 5 - предохранительный клапан хода сжатия; 6 - дроссельное отверстие хода сжатия; 7 - поршень-разделитель; 8 - пружина поршня-разделителя

сационной камере невелико, так как жёсткость пружины 8 обеспечивает лишь отсутствие разрыва потока на ходе отбоя. Так как объём жидкости в полостях I и II велик, то становится заметным эффект сжатия жидкости, или релаксационный эффект. При объёме жидкости ок. 2000 см³ и объёмном модуле упругости 1670 МПа этот эффект заметен при давлении жидкости от 10 МПа, тогда как давление жидкости в данном амортизаторе на ходе сжатия может достигать 35 МПа. Благодаря податливости жидкости её объём, прошедший через дроссельное отверстие б за время хода сжатия меньше, чем объём вдвинутой части штока. Из-за этого максимум рабочей диаграммы амортизатора на ходе сжатия смещается к концу хода. В наибольшей степени релаксационный эффект проявляется при малых ходах и высокой частоте колебаний подвески. Как правило, именно в таких условиях сопротивление амортизатора желательно свести к минимуму.

В той или иной степени релаксационный эффект присущ всем подобным конструкциям. Он может быть количественно оценён ходом штока до открытия клапана хода сжатия при заглушенных дроссельных отверстиях согласно формуле,

выведенной из объёмного закона Гука: $X = \frac{R_{кл}^{сж} V_{га}}{E_{жс} S_{шт}^2}$. Здесь $R_{кл}^{сж}$ – усилие срабатывания клапана сжатия;

$V_{га}$ – рабочий объём гидроамортизатора; $E_{жс}$ – модуль объёмной упругости жидкости; $S_{шт}$ – площадь штока. Для предлагаемого амортизатора ход штока X составляет около 70 мм, в то время как в обычных амортизаторах она не превышает 25 мм.

Исходя из необходимости всестороннего исследования рабочего процесса в таком гидроамортизаторе, его работоспособности, влияния подвески с релаксационным амортизатором на плавность хода автомобиля в различных дорожных условиях вытекают соответствующие задачи исследования.

Вторая глава посвящена разработке математической модели релаксационного амортизатора. Гидродинамическая математическая модель, предназначена для исследования рабочих диаграмм амортизатора и представляет собой совокупность дифференциальных уравнений изменения давления жидкости в полостях. Приняты следующие допущения: известен закон перемещения подвижного звена; сжатие рабочей жидкости происходит без теплообмена с окружающей средой; клапана работают как безынерционные звенья, сухое трение не учитывается.

Дифференциальные уравнения изменения давлений в полостях амортизатора имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{dP_1}{dt} &= \frac{E_{жс}}{V_1} (S_n \cdot \dot{X} - Q_{12} - Q_{13}) \\ \frac{dP_2}{dt} &= \frac{E_{жс}}{V_2} (-(S_n - S_{шт}) \cdot \dot{X} + Q_{12}) \\ \frac{dP_3}{dt} &= \frac{C_{np}}{S_{kk}^2} Q_{13}, \end{aligned}$$

где P_1, P_2, P_3 – давления в соответствующих полостях; V_1, V_2 – объёмы полостей; \dot{X} – скорость штока; Q_{12}, Q_{13} – расходы из полости I в полости II и III; C_{np} – жёсткость пружины поршня-разделителя 8; S_n – площадь рабочего поршня; $S_{кк}$ – площадь поршня-разделителя 7.

Рабочие диаграммы релаксационного амортизатора, полученные расчётным путём, приведены на рис. 2, 3, 4.

На рис. 2 показаны изменение давления в полостях I и II, а также усилия на штоке как для амортизатора с жидкостью, имеющей модуль объёмной упругости 1670 МПа, так и, для сравнения, для амортизатора с «несжимаемой» жидкостью, в котором не используется релаксационный эффект. Для наглядности усилия приведены к площади штока, то есть имеют размерность давления.

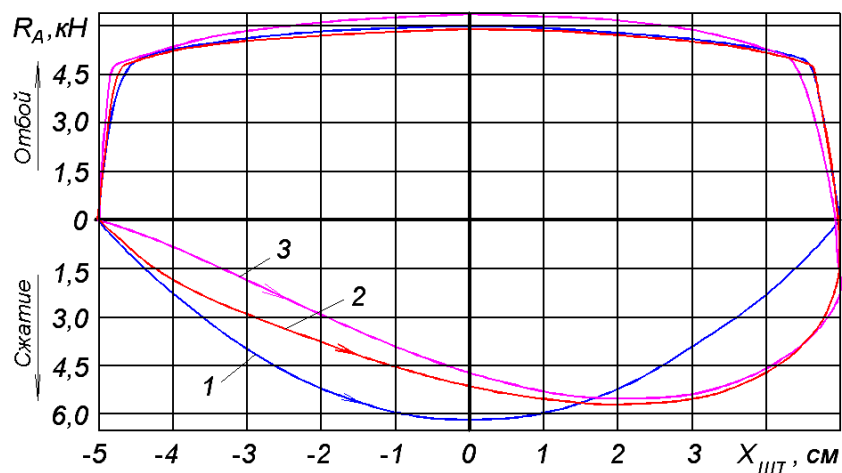


Рис. 2. Рабочая диаграмма амортизатора

- 1 – усилие на штоке без учёта сжатия жидкости;
- 2 – то же для жидкости с объёмным модулем упругости 1670 МПа
- 3 – рабочая диаграмма, полученная аналитически (см. далее)

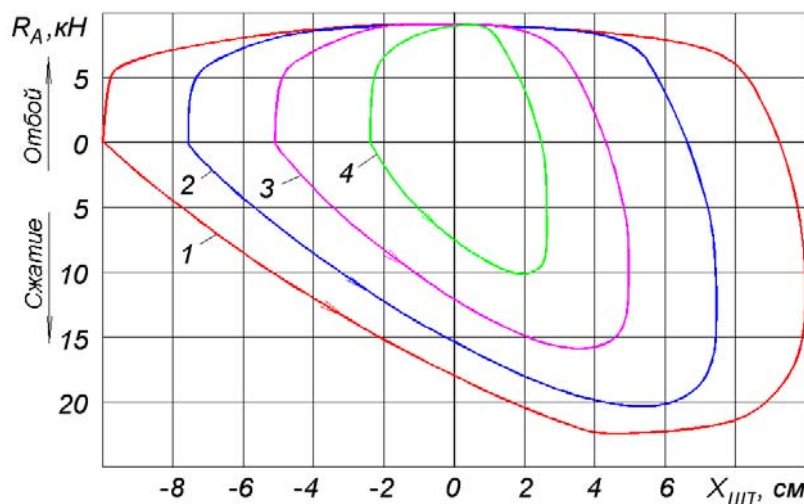


Рис. 3. Рабочие диаграммы амортизатора при разных ходах и одинаковой максимальной скорости штока (1,7 м/с)

- 1 – $X_{max}=200$ мм; $f=2,71$ Гц
- 2 – $X_{max}=150$ мм; $f=3,16$ Гц
- 3 – $X_{max}=100$ мм; $f= 5,42$ Гц
- 4 – $X_{max}= 50$ мм; $f=10,84$ Гц

На рис. 3 приведены рабочие диаграммы амортизатора при различных амплитудах, но одинаковой максимальной скорости штока, равной 1,7 м/с. Видно, что если на ходе отбоя максимальное усилие на штоке остаётся постоянным, то на ходе сжатия оно заметно увеличивается с ростом хода. При амплитуде перемещений штока около 25 мм, что характерно для движения по высокочастотному профилю, усилие на ходе сжатия достигает только 10 кН в конце хода. Для движения по разбитым дорогам с большой высотой неровности характерны большие амплитуды перемещения колёс. В этих условиях сопротивление на штоке будет достигать максимума уже близко к середине хода, то есть в статическом положении, где требуется максимальное гашение колебаний корпуса автомобиля. Следовательно, релаксационный амортизатор лучше приспособляется к различным дорожным условиям, чем обычный.

Анализ рабочих диаграмм показал, что расчёт усилий на штоке релаксационного амортизатора по статической характеристике, как это обычно принято при расчёте плавности хода, не годится. Поэтому была разработана упрощённая математическая модель для определения усилия на штоке релаксационного амортизатора в программе плавности хода. В ней дополнительно были приняты следующие допущения: на ходе сжатия давления жидкости в полостях I и II (см. рис. 1) приняты одинаковыми; расходы в дросселях и клапанах приняты линейными; давление в компенсационной камере пренебрегаем; утечки в клапанах отсутствуют.

Полученное в результате проведённых преобразований выражение для усилия при ходе сжатия примет вид $R_{ai}^{сж} = R_{i-1}^{сж} + \left[R_i^{сж}(\dot{X}) - R_{i-1}^{сж} \right] \cdot \frac{\tau}{T_{сж}}$, где

$R_{ai}^{сж}$ – усилие амортизатора на текущем временном шаге; $R_i^{сж}(\dot{X})$ – усилие амортизатора, определенное по статической характеристике (без учёта сжатия жидкости); $R_{i-1}^{сж}$ – усилие амортизатора на предыдущем временном шаге; τ – временной шаг; $T_{сж}$ – постоянная времени релаксационного амортизатора на ходе сжатия:

при $R_{i-1}^{сж} \leq R_{кл}^{сж}$ $T_{сж} = T_{др}$; при $R_{i-1}^{сж} > R_{кл}^{сж}$ $T_a = T_{кл}$; если $\frac{\tau}{T} > 1$, то $\frac{\tau}{T} = 1$.

Усилие на ходе отбоя: $R_i^o = R_{ai}^o(\dot{X}_i) - R_{ai}^{сж}$, где R_i^o — усилие хода отбоя на текущем временном шаге; $R_{ai}^o(\dot{X}_i)$ — усилие хода отбоя амортизатора, определяемое по статической характеристике; $R_{ai}^{сж}$ — усилие хода сжатия на текущем временном шаге, определяемое из следующего выражения:

$$R_{ai}^{сж} = R_{i-1}^{сж} + \left[R_i^{сж}(|\dot{X}_i|) \cdot \text{sign}\dot{X}_i - R_{i-1}^{сж} \right] \cdot \frac{\tau}{T_a}$$

при $R_{i-1}^{сж} \leq R_{кл}^{сж}$ $T_a = T_{др}$; при $R_{i-1}^{сж} > R_{кл}^{сж}$ $T_a = T_{кл}$;

если $\frac{\tau}{T_a} > 1$, то принимается: $\frac{\tau}{T_a} = 1$ если $R_i^{сж} < 0$, то $R_i^{сж} = 0$

Для проверки упрощённой математической модели релаксационного амортизатора была разработана программа. Результаты расчета по этой программе в сравнении с результатами расчета, проведенного по гидродинамической модели (рис. 2) показывают, что использование упрощенной математической модели даёт более высокую точность по сравнению со статической характеристикой, обычно используемой для определения усилия гидроамортизатора в расчетах на плавность хода.

В **третьей главе** представлены результаты стендовых испытаний релаксационного гидроамортизатора в составе амортизационной стойки (АС).

Целью испытаний была проверка адекватности разработанной математической модели данного амортизатора. Кроме того, в стендовых условиях оценивалась тепловая напряженность, циклическая стойкость и влияние температуры рабочей жидкости на стабильность характеристик АС. Основные технические характеристики стенда: ход ползуна стенда 0...360 мм; максимальная величина нагрузки 20 т; цикличность стенда регулируется ступенчато от 26 до 231 цикл/мин.

Циклические испытания проводились на рабочей жидкости АЖ-16РК при ходе штока 100 мм, частоте его перемещения 1,92 Гц, температуре рабочей жидкости 100-130°С. Объём циклических испытаний составлял 1100000 циклов.

Исследование функциональных характеристик осуществлялось при ходе штока 100 мм и температуре наружной стенки цилиндра АС 15...200°С.

Расчётная погрешность измерений не превышала 5,3%.

В результате испытаний были получены рабочие диаграммы (рис. 4), близкие к расчётным, что подтверждает адекватность разработанной математической модели.

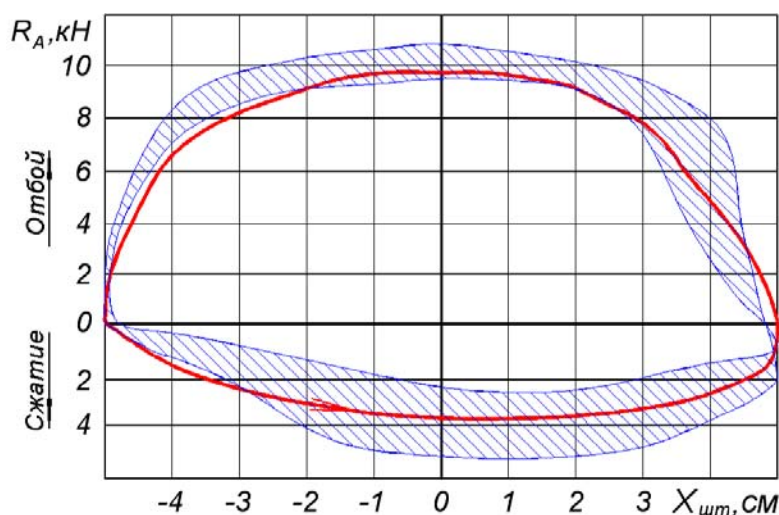


Рис. 4. Рабочие диаграммы релаксационного гидроамортизатора, полученные расчётным и экспериментальным путём
— расчётная рабочая диаграмма;
— диапазон рабочих диаграмм, полученных в ходе циклических испытаний (до 1,1 млн. циклов)

Испытания показали существенно меньшее изменение эксплуатационных характеристик исследуемой стойки по сравнению с амортизаторами ГА5335, выдержавшими лишь 500000 циклов (Табл. 1).

Таблица 1

Результаты испытаний циклических АС и ГА

Узел, рабочая жидкость	Объём испытаний, тыс. циклов	Утечка рабочей жидкости, см ³	Средний процент снижения энергоёмкости, %
АС КАМАЗ, АЖ-16РК	1100	117	15
ГА 5335, АЖ-12Т	500	390	76
ГА 5335, 169-36	500	21	24

В четвёртой главе рассматриваются вопросы, связанные с расчётными исследованиями плавности хода автотранспортных средств. Обосновывается выбор дорожных условий, описываются методики генерации случайного дорожного профиля по заданным характеристикам. Приводится методика расчёта параметров плавности хода транспортного средства с подрессоренными кабиной и сиденьем водителя. Полученные параметры плавности хода обрабатываются в соответствии с государственными и отраслевыми стандартами.

Таблица 2

Основные характеристики дорожных участков для испытаний транспортных средств на плавность хода

Номер участка	Вид дороги	Длина участка, м	Диапазон длин волн, м	σ , м
Трассы НИЦИАМТ, регламентированные ОСТ 37.001.275-84				
1	Цементобетонная динамометрическая дорога	1000	0,4 — 40	$0,6 \cdot 10^{-2}$
2	Булыжная мощёная дорога без выбоин	1000	0,25 — 25	$1,1 \cdot 10^{-2}$
3	Булыжник с выбоинами (специальный участок)	500	0,12 — 12	$2,9 \cdot 10^{-2}$
Дополнительные трассы				
4	Разбитая грунтовая трасса автополигона НИЦИАМТ	1000	0,3 — 18	$6,9 \cdot 10^{-2}$
5	Трасса ВНИИТМ	360	2,5 — 50	$1,24 \cdot 10^{-1}$

Здесь σ — среднеквадратические высоты неровностей

Участки дорог автополигона НИЦИАМТ, выбранные в качестве эталонных для испытаний грузовых автомобилей на плавность хода, регламентируются ОСТ 37.001.275-84. Однако условия, в которых эксплуатируются полноприводные автотранспортные средства, могут быть ещё более жесткими с точки зрения дорожного воздействия, чем участок №3 автополигона. Поэтому для оценки плавности

хода был использован также микропрофиль разбитой грунтовой дороги автополигона НИЦИАМТ, на которой испытываются полноприводные грузовые автомобили. Условно эту дорогу можно назвать «дорога №4»

Учитывая специфику работы спортивных и армейских автомобилей для сравнительной оценки работы подвесок в ещё более тяжёлых условиях, была выбрана также трасса испытательного полигона ВНИИТМ, по которой у автора имелись необходимые данные. Эту дорогу можно назвать «дорога №5».

Для расчёта плавности хода по используемой автором математической модели дорога должна быть задана ординатами микропрофиля с фиксированным шагом. В таком виде у автора имелись данные лишь по дороге №5. Поэтому возникла необходимость в разработке методики и соответствующего программного обеспечения для генерации случайного дорожного микропрофиля по имеющимся данным. Корреляционные функции наиболее часто встречающихся дорог приведены в работах Н.Н. Яценко, Я.М. Певзнера, А.А. Тихонова, О.К. Прутчикова. Исходя из этих данных и описания дорог полигона НИЦИАМТ в книге Н.Н. Яценко «Форсированные полигонные испытания грузовых автомобилей» были приняты следующие выражения, аппроксимирующие корреляционные функции соответственно для дорог №№ 1, 3 и 4:

$$R_{x1}(\Delta l) = e^{-0,15|\Delta l|};$$

$$R_{x4}(\Delta l) = 0,624e^{-0,11|\Delta l|} + 0,38e^{-0,15|\Delta l|} \cos(0,356 \Delta l);$$

$$R_{x3}(\Delta l) = 0,89e^{-0,79|\Delta l|} + 0,37e^{-0,05|\Delta l|} \cos(0,766\Delta l) - 0,26e^{-0,38|\Delta l|} \cos(0,924\Delta l)$$

В литературных источниках указано, что случайный дорожный профиль на определённом участке является стационарным эргодическим процессом. Это позволяет предложить следующее каноническое разложение стационарной случайной функции $X(l)$:

$$X(l) = m_x + \sum_{v=0}^{\infty} (x_v \cos \omega_v l + y_v \sin \omega_v l),$$

где m_x – матожидание функции $X(l)$; $v = 0, 1, 2, \dots$; x_v, y_v – нормально распределённые взаимно некоррелированные случайные величины, математические ожидания которых равны 0. Величины с одинаковым номером имеют одинаковую дисперсию D_v . Формулы для вычисления коэффициентов D_v вследствие чётности корреляционной функции могут быть написаны в виде:

$$D_0 = \frac{1}{2L} \int_0^{2L} R_x(\Delta l) d\Delta l;$$

$$D_v = \frac{1}{L} \int_0^{2L} R_x(\Delta l) \cos\left(\frac{\pi v}{2L} \Delta l\right) d\Delta l, \text{ где}$$

L – длина сгенерированной трассы.

В результате проведённых расчётов были сгенерированы дороги, корреляционные функции которых соответствуют дорогам №1 и №3 автополигона НИЦИАМТ и грунтовая трасса (дорога №4) протяжённостью 1000 метров.

Корреляционные функции, удовлетворительно описывающие дорогу №2 в литературе отсутствуют. Поэтому для генерации этой дороги использовалась математическая модель, описывающая трассу как случайную последовательность неровностей, вид и закономерность расположения которых описаны в литературе. Кроме того, в силу малой длины неровностей, при генерации этой трассы учитывался обкат колесом заданного диаметра. Были разработаны соответствующие методика, алгоритм и программное обеспечение.

При движении по дорогам №№ 1, 2, 3 плавность хода автомобиля нормируется согласно ОСТ 37.001.291-84. При движении по трассам №4 и №5 значения виброускорений нормировались согласно ГОСТ 12.1.012-90

Специфика внедорожного автомобиля, особенно спортивного, заключается в том, что ему приходится передвигаться с максимально возможной скоростью по дорожному профилю различного качества, а в ряде случаев и по бездорожью. В этих условиях возможно применение более мягких норм плавности хода, ограничивающих виброускорения величинами, затрудняющими управление автомобилем и вызывающими травмы водителя, поломку агрегатов и узлов.

Оценка плавности хода для подобных «спортивных» условий движения транспортных машин регламентируется материалом РТМ В3-1611-83. Хотя нормы РТМ разработаны для гусеничных машин, как показали работы, проведенные ВНИИТМ, они могут быть применены для исследования колесных машин, эксплуатирующихся в условиях разбитых грунтовых дорог и бездорожья.

При обработке значений виброускорений согласно этой методике определяется математическое ожидание положительных амплитудных пиковых значений вертикальных ускорений на месте водителя. При этом амплитудные значения пиковых ускорений меньше $3,5 \text{ м/с}^2$ в расчет не принимались (отбрасывались). При движении машины с предельной скоростью среднее значение пиковых ускорений не должно превышать 10 м/с^2 , а максимальное значение – 30 м/с^2 . Для обычных автомобильных дорог такие высокие уровни ускорений недопустимы.

С целью получения расчётным путём показателей колебательного процесса автомобиля была создана нелинейная математическая модель, учитывающая подвеску кабины и сиденья водителя. При разработке модели были приняты следующие основные допущения движения автомобиля: колёса обоих бортов движутся по одинаковой колее, и потому рассматривается плоскостная расчетная схема колебаний, не учитывающая деформацию рамы при ее изгибе и кручении; центр тяжести машины движется в продольном направлении с постоянной скоростью. Указанные допущения являются общепринятыми при исследовании колебаний автомобиля, и их введение достаточно обосновано в технической литературе.

Для имитации движения многоопорного транспортного средства по трассе с детерминированным профилем разработана математическая модель и программа расчёта.

Программа позволяет определять линейные и угловые перемещения, а также все их производные в любой точке корпуса машины, в подрессоренной кабине либо на подрессоренном сиденье водителя при движении по неровностям любого профиля, оценивать режимы работы и нагруженность отдельных узлов ходовой части. Для статистической обработки вертикальных ускорений в соответствии с ГОСТ 12.1.012-90, ОСТ 37.001.291-84 и РТМ ВЗ-1611-83 также было разработано необходимое программное обеспечение.

Для принятой расчетной схемы (рис. 5) колебания подрессоренных масс (кузова, мостов, кабины, сиденья водителя) рассматриваются в обобщенных координатах \mathbf{Z} и φ , связанных с центром масс соответствующего элемента колебательной системы. Колебания подрессоренных масс описываются дифференциальными уравнениями II порядка.

Уравнение вертикального перемещения корпуса

$$(M_T - M_B)\ddot{Z}_T = 2 \cdot \sum_{i=1}^{n_T} P_{Mi} - M_T g - (P_{B1} + P_{B2}),$$

где \ddot{Z}_T – вертикальное ускорение корпуса; M_T – подрессоренная масса; M_B – масса кабины; P_{Mi} – усилие от подвески i -го моста тягача; n_T – число мостов; P_{B1} , P_{B2} – усилия от передней и задней опор подрессоренной кабины;

Уравнение продольно-угловых колебаний корпуса:

$$J_T \ddot{\varphi}_T = 2 \cdot \sum_{i=1}^{n_T} P_{Mi} \cdot L_{Mi} - (P_{B1} L_{SB1} + P_{B2} L_{SB2}), \text{ где}$$

$\ddot{\varphi}_T$ – продольное угловое ускорение корпуса; J_T – момент инерции корпуса (без учёта подрессоренной массы кабины) относительно поперечной оси, проходящей через центр масс; L_{Mi} – координаты мостов относительно центра масс; L_{SB1} , L_{SB2} – координаты опор подрессоренной кабины относительно узла сцепки.

Уравнения вертикальных колебаний мостов:

$$M_{Mi} \ddot{Z}_{Mi} = 2 \cdot (P_{SWi} + P_{AWi}) - 2 \cdot (P_{SMi} + P_{AMi}) - M_{Mi} g,$$

где M_{Mi} – масса i -го моста; \ddot{Z}_{Mi} – вертикальное ускорение i -го моста; P_{SWi} , P_{AWi} – упругое и демпфирующее усилия от шины i -го моста; P_{SMi} , P_{AMi} –

№2 — «спортивный» автомобиль по схеме серийного с дополнительным демпфированием за счет установки на каждом колесе первого моста по два длинноходовых гидроамортизатора, и установки по одному гидроамортизатору на каждое колесо второго и третьего мостов;

№3 — автомобиль с независимой пружинной подвеской колес всех трёх осей и телескопическими релаксационными гидроамортизаторами на каждой подвеске машины (стойки Макферсон).

При этом движение автомобиля условно подразделялось на два режима:

— режим общего пользования (РОП), который подразумевает движение по дорогам, на которых осуществляется эксплуатация автомобилей общетехнического назначения. В этом случае используются нормы ГОСТ 12.1.012-90 и ОСТ 37.001.291-84.

— спортивный режим (СР), который предполагает эксплуатацию машины в сложных дорожных условиях, более характерных для спортивных модификаций. Уровень виброускорений здесь регламентируется нормами РТМ ВЗ-1611-83. Одновременно, подвеска спортивной модификации должна соответствовать и нормам РОП.

Выбор оптимальных характеристик релаксационного амортизатора перспективного автомобиля КАМАЗ производился по 4-м параметрам: диаметры дроссельных отверстий сжатия и отбоя, а также усилия срабатывания соответствующих клапанов. В качестве критерия оптимизации был избран уровень виброускорений в спортивном режиме, либо режиме общего пользования.

Несмотря на повышенную приспособляемость релаксационного гидроамортизатора к различным условиям движения, было признано целесообразным иметь две характеристики хода сжатия: для тяжёлых условий движения в «спортивном режиме» (1, рис. 6) и для движения в «режиме общего пользования» (2, рис. 6).

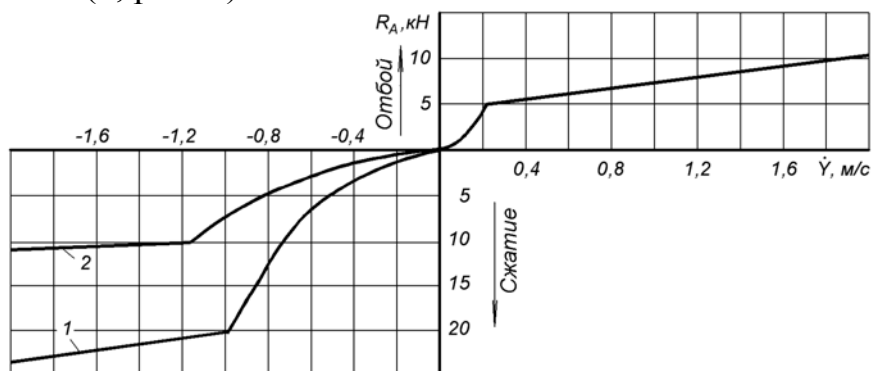


Рис. 6. Рациональные характеристики релаксационного гидроамортизатора:

1 — для движения в «спортивном режиме»
2 — для движения в «режиме общего пользования»

Результаты расчётных исследований плавности хода исследуемых автомобилей приведены в табл. 3. Максимальная скорость ограничивалась соответствующими нормами виброускорений. Их анализ наглядно показывает, что выбранные характеристики обеспечивают более высокую эксплуатационную скорость автомобиля с релаксационным амортизатором по сравнению с серийным и спортивным автомобилями, причем это справедливо как для режима общего

пользования, так и для спортивного режима. При этом на автомобиль общего назначения целесообразно ставить амортизаторы с характеристикой хода сжатия 2, а на спортивный — с характеристикой 1.

Таблица 3

Максимальная по условиям плавности хода скорость движения автомобилей КАМАЗ на различных участках дорог

Дорога	Скорость движения, км/ч							
	Автомобиль №1		Автомобиль №2		Автомобиль №3			
					Хар-ка 1		Хар-ка 2	
	РОП	СР	РОП	СР	РОП	СР	РОП	СР
Цементно-бетонная дорога (№1)	70	70	70	70	70	70	70	70
Булыжная дорога без выбоин (№2)	60	60	60	60	60	60	60	60
Изношенный булыжник (№ 3)	27	53	24	60	46	60	50	60
Грунтовая разбитая дорога (№4)	15	20	20	40	30	60	35	60
Трасса ВНИИТМ (№5)	17	21	22	26	25	29	23	26

ВЫВОДЫ

1) Разработанные методики расчёта на основе численного решения системы нелинейных дифференциальных уравнений и созданное на их основе программное обеспечение позволяют оценить параметры плавности хода транспортных средств с учётом подрессоривания кабины и сиденья водителя.

2) Разработаны математические модели релаксационного гидроамортизатора: гидродинамическая, на основе решения системы дифференциальных уравнений изменения давления в полостях и аналитическая, в виде простых зависимостей, для оценки усилий амортизатора в расчётах на плавность хода. Сравнение результатов расчёта с экспериментом показало, что данные модели с принятыми допущениями позволяют оценивать характеристики амортизатора по конструктивным параметрам. Проведённые расчёты показали, что усилия сжатия в амортизаторе с большим рабочим объёмом могут существенно отличаться от усилий, полученных по статической характеристике, особенно при высокочастотных колебаниях с малой амплитудой.

3) Созданные и реализованные в программном обеспечении методики позволяют генерировать случайные трассы по заданным корреляционным функциям и по описанию вида неровностей, их высот и расстояний между ними. Учитывается обкат микропрофиля дороги колесом заданного диаметра.

4) Образец релаксационного амортизатора в ходе испытаний показал соответствие расчётным характеристикам и высокую надёжность. По сравнению с длинноходовым амортизатором, предназначенного для спортивного автомобиля, релаксационный амортизатор показал меньшее снижение энергоёмкости (в 5 раз при использовании в длинноходовом амортизаторе жидкости АЖ-12Т и на 37% – жидкости 169-36) при большем числе циклов нагружения (1100 тыс. циклов против 500 тыс. циклов).

5) Согласно проведённым расчётам достигнуто повышение максимальной скорости движения автомобиля, оснащённого подвеской с релаксационным гидроамортизатором, по сравнению с серийным и спортивным образцами, оснащёнными обычным и длинноходовым амортизаторами с 24-27 км/ч до 46-50 км/ч при движении по изношенной булыжной дороге и с 15-20 км/ч до 30-35 км/ч при движении по разбитой грунтовой трассе.

Содержание диссертации отражено в следующих печатных работах:

1. Волков Ю.П., Герасимов И.М. Релаксационный гидроамортизатор //Материалы Российской научно-технической конференции «Инновационные наукоёмкие технологии для России» – СПб, 1995 – с. 47.

2. Волков Ю.П., Герасимов И.М., Самойлов А.Д., Селивановских В.А. Повышение плавности хода автомобиля КАМАЗ за счёт использования релаксационного гидроамортизатора. //Труды СПбГТУ №465 «Энергетические машины и установки» – СПб, 1997. – С. 91-93.

3. Герасимов И.М. Генерирование случайного дорожного микропрофиля. //Труды СПбГТУ №481 «Энергетические машины и установки» – СПб, 1999. – С. 154-157.

4. Герасимов И.М. Повышение плавности хода автомобилей КАМАЗ за счёт использования релаксационного гидроамортизатора // Материалы V Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования в технических университетах» СПб, 2001 – с. 186-187.

5. Волков Ю.П., Герасимов И.М., Марецкий П.К. Повышение приспособляемости автомобильного гидроамортизатора к дорожным условиям за счёт сжатия жидкости. // Электронный журнал «Исследовано в России», 178/021130, стр. 1968-1973, 2002.

<http://www.zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2002/178.pdf>.