

Государственный комитет Российской Федерации  
по высшему образованию  
Челябинский государственный технический  
университет

На правах рукописи

(24)

Сафронова  
Ирина Владимировна

ДИНАМИКА ПРИЦЕПНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ  
(применительно к большегрузным гусеничным поездам)

01.02.06 - Динамика и прочность машин,  
приборов и автоматов

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск - 1994

Работа выполнена на кафедре "Сопротивление материалов, динамика и прочность материалов" Челябинского государственного технического университета

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор И.Я. Березин.

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, профессор Ю.С. Павлюк,  
кандидат технических наук В.В. Кавунов.

**Ведущее учреждение:**

Конструкторское бюро транспортного машиностроения (г.Омск).

Защита состоится *12 июня* 1994 г., в *15 ч.* на заседании специализированного Совета Д053.13.01 при Челябинском государственном техническом университете.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять ученому секретарю Совета по адресу:

454080, г.Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан *10 мая* 1994 г.

Ученый секретарь специализированного  
Совета, доцент, кандидат технических наук



В.М. Кабанов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** При создании новых поколений конкурентно-способных отечественных машин одной из наиболее важных является проблема обеспечения их высокой надежности. Как показывает опыт, успешное решение вопросов надежности во многом зависит от научно-технического уровня конструкторско-технологического обеспечения проектов. В связи с этим являются актуальными работы, направленные на совершенствование методов прогнозирования надежности, в которых отображаются реальные условия эксплуатации и динамические свойства проектируемых изделий. В значительной мере отмеченное характерно для транспортного машиностроения, в частности, при разработке прицепных систем, на долю которых, по имеющимся данным, приходится до 40 % перевозимых грузов. Вопросы динамики прицепного транспорта связаны с задачами, возникающими в дорожно-строительном, сельскохозяйственном, нефтяном, оборонном и других видах машиностроения.

Применение колесных и гусеничных поездов при выполнении транспортных работ обусловлено, с одной стороны, их экономической целесообразностью, а с другой, единственно возможным способом транспортировки различных нестандартных объектов, в частности, большегрузных или длиномерных грузов, навесных рабочих органов и т.п.

Особую задачу в исследовании динамики прицепного транспорта представляет собой изучение процессов при движении большегрузных гусеничных поездов в особо тяжелых дорожных условиях, когда использование колесных машин либо малоэффективно, либо вообще невозможно. Эксплуатация гусеничных поездов в условиях бездорожья порождает ряд практических проблем, связанных с исключением возможности возникновения аварийных ситуаций, обеспечением работоспособности и надежности тягово-сцепных устройств (ТСУ) и ходовых систем машин поезда, выполнением требований по условиям безопасности и работы операторов тягача и др. Как показывает анализ, использование моделей колесных прицепных систем для исследования процессов в гусеничных поездах в условиях их реальной эксплуатации не представляется возможным, так как эти модели не позволяют полностью отразить случайный характер протекающих процессов и могут привести к значительным погрешностям.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ.** Расширение круга задач по исследованию динамики

прицепных транспортных систем применительно к большегрузным гусеничным поездам, предназначенным для эксплуатации в условиях бездорожья; создание инженерных методов и программных средств для прогнозирования эксплуатационной нагруженности и надежности элементов гусеничного поезда в условиях реальной эксплуатации. НАУЧНАЯ НОВИЗНА. 1. Получены результаты экспериментальных исследований динамики гусеничного поезда в широком интервале варьирования реальных режимов и условий эксплуатации; на основе полученных данных сформулированы и обоснованы исходные положения математической модели большегрузного гусеничного поезда при движении в особо тяжелых дорожных условиях.

2. Разработана математическая модель, учитывающая специфические особенности динамической системы "гусеничный тягач - тягово-сцепное устройство - гусеничный прицеп" при случайном внешнем воздействии и описывающая динамические процессы при движении поезда в условиях бездорожья.

3. Исследовано влияние различных конструктивных параметров, режимов и условий эксплуатации гусеничного поезда на эксплуатационную нагруженность шасси машин и ТСУ.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РАБОТЫ. 1. Создано программное обеспечение, позволяющее на ранних этапах проектирования прогнозировать эксплуатационную нагруженность и надежность тяжелонагруженных элементов поезда.

2. Разработана методика и измерительные устройства для проведения натурных испытаний большегрузного гусеничного поезда с целью определения кинематических и силовых характеристик движения.

3. Разработана методика выбора геометрических и упругих характеристик параметров ТСУ и даны практические рекомендации для проектирования перспективных большегрузных гусеничных поездов.

РЕАЛИЗАЦИЯ РАБОТЫ. Работы, на которых базируется данная диссертация, выполнялись в соответствии с программой "Технические университеты России" (тема 80УП53), планом отраслевого министерства при проектировании семейства инженерных машин многоцелевого назначения (тема "Отцепка"), планом научно-исследовательских работ Челябинского государственного технического университета (тема 4393П53).

Результаты работы использованы конструкторским бюро транспортного машиностроения (г. Омск), научно-техническим центром завода тракторных прицепов (г. Орск).

**АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ.** Основные положения диссертации доложены и обсуждены на Всероссийских (г. Екатеринбург, 1992; г. Вологда, 1993; г. Челябинск, 1993), республиканской (г. Кутаиси, 1990), университетской (г. Челябинск, 1988-1992) конференциях.

**ПУБЛИКАЦИИ.** Основное содержание диссертации опубликовано в 8 работах.

**ОБЪЕМ РАБОТЫ.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, списка используемой литературы (131 наименование) и приложений. Диссертация изложена на 172 страницах машинописного текста, содержит 75 рисунков и 6 таблиц.

## 1. Состояние проблемы динамики прицепных транспортных систем

Выполнен анализ работ, охватывающих проблемы прицепного автомобильного и тракторного транспорта, исследованию динамики которого в технической литературе уделено достаточно много внимания. Значительный вклад в решение этих вопросов внесли работы О.Н. Агапова, В.А. Аннловича, В.И. Барахтанова, М.Г. Беккера, Н.А. Взятышева, М.С. Высоцкого, А.И. Гальперина, В.В. Гуськова, Я.Х. Закина, В.В. Жесткова, С.Д. Келлера, Б.И. Морозова, Т.В. Нарбута, Ю.С. Павлука, В.Ф. Платонова, Н.Р. Рашидова, Ю.А. Самойленко, А.А. Хачатурова, Я.Е. Фаробина, М.М. Шукина и других. В результате проведенных аналитических и экспериментальных исследований выявлены закономерности движения прицепных систем, предложены математические модели, позволяющие выполнять оценки нагруженности и надежности различных элементов поезда. Большинство из перечисленных авторов исследовали процессы в системах, в состав которых входят колесные машины, эксплуатирующиеся, как правило, на обустроенных дорогах с твердым покрытием. Однако, вполне оправданные допущения, принятые при разработке моделей движения колесных прицепных систем не позволяют в полной мере исследовать специфические закономерности взаимодействия между звеньями большегрузных гусеничных поездов и отображать условия, типичные для их эксплуатации (большие массы прицепов, бездорожье, неустановившееся движение и др.).

## 2. Моделирование движения большегрузного гусеничного поезда

Для решения поставленных задач в данной работе предложена модель движения большегрузного гусеничного поезда, при разра-

ботке которой, наряду с общепринятыми исходными положениями, учитывается следующее:

- рассматривается прямолинейное движение гусеничного поезда в режиме буксировки;
- учитываются нелинейные характеристики подвесок и гусеничного двигателя;
- ТСУ моделируется в виде параллельно соединенных упругого и демпфирующего элементов с нелинейными характеристиками;
- силовая установка представлена в виде одномассовой системы с эквивалентным моментом инерции; систему автоматического регулирования считаем безынерционной; тяговая характеристика прямолинейного движения машины рассматривается во всем диапазоне эксплуатационных скоростей; в связи с необходимостью изучения переходных процессов моделируется переключение смежных передач;
- внешнее воздействие задается в виде случайной функции профилей типовых дорог и одиночных препятствий.

В качестве обобщенных координат приняты перемещения центров тяжести корпусов тягача и прицепа по направлению движения  $x_1$  и  $x_2$ , вертикальные перемещения центров тяжести корпусов тягача и прицепа  $z_1$  и  $z_2$ , угловые перемещения корпусов тягача в плоскости движения  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , угол вращения ведущего колеса тягача  $\varphi_k$ . Схема динамической модели представлена на рис. 1.

С учетом вышеизложенных положений получена система дифференциальных уравнений следующего вида:

$$\ddot{x}_1 = (F_T \cos \varphi_1 - \sum_{t=1}^{2n} P_{tx} - (P_{aTcy} + P_{cTcy}) l_x / l + 2(T_p - T_c)) / m_1;$$

$$\ddot{z}_1 = (F_T \sin \varphi_1 + \sum_{t=1}^{2n} (P_{\partial t} + P_{\Delta t}) - (P_{aTcy} + P_{cTcy}) l_z / l - 2(T_p \sin \varphi_0 + T_c \sin \varphi_1)) / m_1;$$

$$\ddot{\varphi}_1 = (M_T + \sin \varphi_1 \sum_{t=1}^{2n} P_{tx} l_t + \cos \varphi_1 \sum_{t=1}^{2n} (P_{\partial t} + P_{\Delta t}) l_t - (P_{aTcy} + P_{cTcy}) (l_x (-a_1 \sin \varphi_1 +$$

$$h_a \cos \varphi_1) + l_z (-a_1 \cos \varphi_1 + h_a \sin \varphi_1)) / l + 2(T_p l_p \sin \varphi_0 - T_c l_c \sin \varphi_1) / J_1;$$

$$\ddot{x}_2 = (-\sum_{t=1}^{2n} P_{tx} + (P_{aTcy} + P_{cTcy}) l_x / l) / m_2;$$

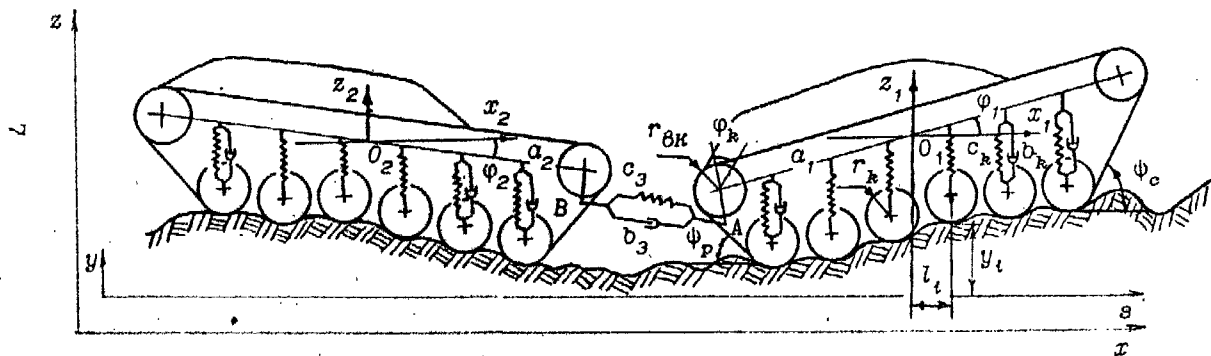


Рис. 1. Схема динамической модели гусеничного поезда

$$z_2 = \left( \sum_{t=1}^{2n} (P_{ot} + P_{at}) + (P_{aTCy} + P_{bTCy}) l_z / l \right) / m_2;$$

$$\varphi_2 = (\sin \varphi_2 \sum_{t=1}^{2n} P_{tx} l_t + \cos \varphi_2 \sum_{t=1}^{2n} (P_{ot} + P_{at}) - (P_{aTCy} + P_{bTCy}) (l_x (a_2 \sin \varphi_2 - h_b \cos \varphi_2) - l_z (a_2 \cos \varphi_2 + h_b \sin \varphi_2) / l)) / J_2;$$

$$\varphi_k = (M_0 + 2(T_C - T_P) r_{Bk}) / J_{\partial \theta},$$

где  $m_1$  и  $m_2$  - массы корпусов тягача и прицепа;  $J_1$  и  $J_2$  - моменты инерции корпусов тягача и прицепа относительно горизонтальной оси, перпендикулярной плоскости движения;  $J_{\partial \theta}$  - момент инерции вращающихся масс моторно - трансмиссионной установки;  $P_{ot}$ ,  $P_{at}$  - упругая и демпфирующая составляющие сил, действующих на корпус со стороны  $t$ -го опорного катка;  $P_{tx}$  - сила сопротивления движению под  $t$ -м катком;  $T_C, T_P$  - усилие, действующее в свободной и рабочей ветвях гусеничного обвода;  $l_c, l_p$  - длины участков свободной и рабочей ветвей гусеничного обвода;  $\varphi_1, \varphi_2$  - углы наклона гусеничных ветвей к горизонтальной плоскости;  $F_T$  и  $M_T$  - сила тяги и момент двигателя;  $r_{Bk}$  - радиус ведущего колеса тягача;  $P_{aTCy}$ ,  $P_{bTCy}$  - упругая и демпфирующая составляющие силы в ТСУ;  $l$ ,  $l_x$ ,  $l_z$  - длина ТСУ и ее проекции на оси  $Ox$ ,  $Oz$ ;  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $h_a$ ,  $h_b$  - координаты крепления ТСУ к корпусам машин..

Решение системы дифференциальных уравнений производится методом Рунге-Кутты-Фельдберга с автоматическим выбором шага. Разработан алгоритм определения необходимых для решения системы параметров, составлена и отлажена вычислительная программа, позволяющая при различных конструктивных особенностях машин и ТСУ и всевозможных эксплуатационных режимах движения поезда исследовать кинематическое и силовое взаимодействие звеньев поезда. Вычислительная программа написана на алгоритмическом языке Паскаль и реализована в среде MS DOS. С помощью разработанной модели выполнены расчеты амплитудно-частотных характеристик и выявлены преобладающие формы колебаний рассматриваемой системы.

### 3. Экспериментальные исследования движения большегрузного гусеничного поезда

Экспериментальные исследования выполнены с целью выявления закономерностей движения гусеничного поезда в реальных условиях



эксплуатации, проверки адекватности математической модели и идентификации ее параметров.

Экспериментальные исследования процессов кинематического и силового взаимодействия гусеничного поезда, состоящего из двух однотипных гусеничных машин класса 40 т и соединенных штатным ТСУ, были проведены в учебном центре Челябинского высшего командного танкового училища им. 50-летия Великого Октября ( дорожные условия соответствовали Уральскому региону в летний период времени, Бишкиль).

При проведении натурных испытаний регистрировались продольные и вертикальные ускорения на месте оператора буксирующей машины, перемещение штока ТСУ относительно штанги и продольные усилия, возникающие в штоке ТСУ.

Для регистрации перечисленных параметров был использован комплекс измерительной аппаратуры, содержащий датчики ускорений, перемещений, усилий, тензосметрический усилитель 8АНЧ-26, виброизмерительную аппаратуру ВИБ-ТН, светолучевой осциллограф НО71, блок питания. Блок измерительной и регистрирующей аппаратуры располагался в специальном амортизированном контейнере, размещенном на корпусе тягача.

При исследованиях воспроизводились следующие виды испытаний:

1) Движение по трем характерным для условий эксплуатации гусеничных поездов типам трасс с фиксированными скоростями и в режиме естественного вождения: трасса 1 - дорога с регулярными по длине и высоте неровностями, выбитыми при многократных проездах однотипных машин (по классификации ВНИИТрансмаш трасса соответствует 3 категории сложности); трасса 2 - разбитая грунтовая дорога с естественными и наезженными неровностями (4 категория сложности); трасса 3 - наезженная тяжелыми колесными и гусеничными машинами лесная дорога с крупными ухабами и впадинами (5 категория сложности).

2) Переезд единичных неровностей типа "выпуклость" длиной 12,0 м и высотой 0,95 м и "впадина" длиной 11,0 м и глубиной 1,1 м. Методом оптической нивелировки были определены случайные функции профилей упомянутых трасс, которые в последствии использовались для проверки адекватности математической модели.

3) Движение по ровному горизонтальному участку проселочной дороги с воспроизведением переходных режимов, обусловленных переключением передач с первой до четвертой и обратно.

4) Повороты поезда на площадках двух типов (грунтовой и луг) на

различных передачах.

5) Режимы разгона и торможения поезда.

6) Специальные испытания для идентификации упруго-вязких параметров ТСУ.

Анализ процессов изменения усилия в ТСУ показал, что они являются нестационарными случайными функциями, формирующимися в результате наложения двух случайных процессов: низкочастотного узкополосного, обусловленного продольными и угловыми колебаниями корпусов машин при движении их по неровностям, и импульсного, обусловленного соударениями масс динамической системы. Выявленный характер процессов ограничивает возможность использования для анализа хорошо разработанные методы спектральной теории стационарных случайных процессов, поэтому для анализа и сопоставления результатов применен параметр, характеризующий вероятность возникновения импульсов, превышающих заданный уровень нагрузки. Результаты анализа осциллограмм усилий в ТСУ при движении по выбранным трассам подтверждают закономерности, согласно которым с повышением сложности дорожных условий и скоростей движения транспортных средств возрастает вероятность выбросов случайных процессов за заданный уровень; сопоставление расчетных и экспериментальных данных указывает на удовлетворительную их согласованность, что подтверждает адекватность математической модели (рис.2).

Анализ экспериментальных осциллограмм изменения усилий в ТСУ при переезде одиночных препятствий и при переключении передач показал, что эти режимы движения представляют собой опасность с точки зрения возникновения значительных (до 10 раз превышающих номинальных значений) нагрузок в штангах тяг. В качестве иллюстрации на рис.3 приведены осциллограммы изменения усилия в ТСУ, вертикальных и продольных ускорений на месте оператора при переключении передач.

Анализируя осциллограммы нагрузок, возникающих в штангах ТСУ в процессе поворота поезда с фиксированным радиусом на различных передачах, отмечено, что максимальные значения в ТСУ возникают в момент входа поезда в поворот и в значительной мере зависят от передачи, на которой осуществляется поворот: чем больше номер передачи, тем меньше экстремальные значения усилий в ТСУ; получено, что для осуществления поворота гусеничный поезд описывает окружность, радиус которой на 10.15% больше, чем одиночная.

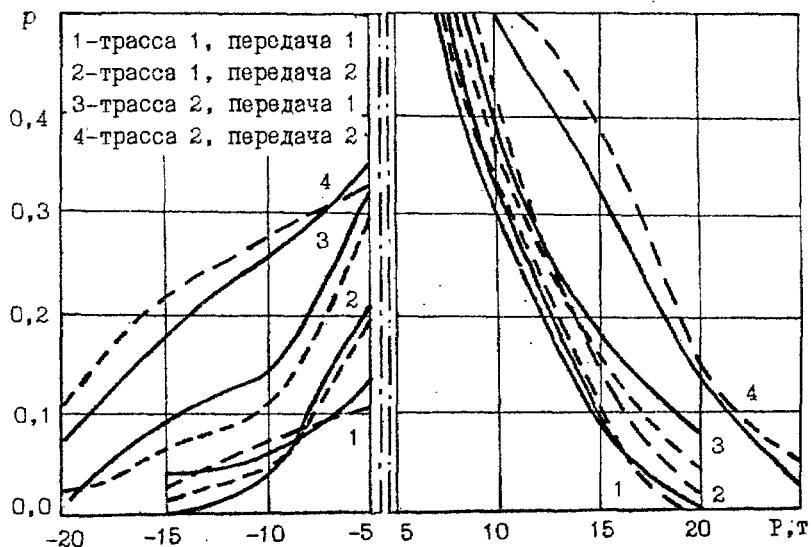


Рис.2. Изменение вероятности превышения нагрузки в ТСУ заданного уровня ( — — эксперимент, - - - расчет )

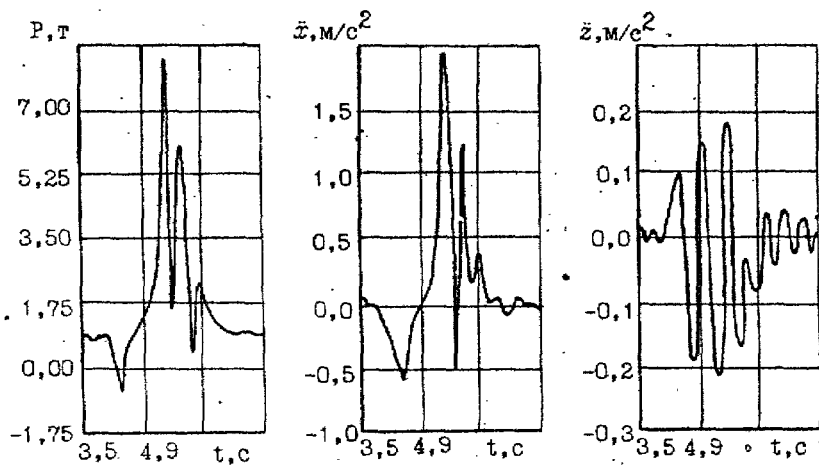


Рис.3. Изменение усилия в штанге ТСУ, горизонтальных и вертикальных ускорений на месте оператора инженерной машины при переключении с 1 на 2 передачу

Экспериментальные исследования выявили влияние условий и режимов эксплуатации на относительное время работы ТСУ на "упоре", когда упругий элемент замыкается на корпус; установлено, что в реальных условиях эксплуатации этот параметр достигает весьма больших значений, так, при движении по разбитой лесной дороге с крупными ухабами и впадинами более 60% времени ТСУ работает как абсолютно жесткий элемент (рис.4).

Сопоставление экспериментальных и расчетных данных указывают на удовлетворительное для инженерной практики качественное и количественное соответствие результатов.

#### 4. Расчетные исследования эксплуатационной нагруженности элементов большегрузного гусеничного поезда

Применение разработанной модели позволило выполнить расчетные исследования в широком интервале варьирования условий эксплуатации и параметров поезда, выявить характерные закономерности динамических процессов.

Проведенный статистический анализ процессов изменения усилий в подвесках тягача и прицепа позволяет считать, что они относятся к классу узкополосных стационарных Гауссовых процессов, обладающих эргодическим свойством.

Расчетные исследования нагруженности ходовой части тягача проведенные при имитации буксировки прицепов различной массы по трассам различной степени сложности, позволили отметить ряд закономерностей движения гусеничного поезда в различных дорожных и эксплуатационных условиях, так, например, при движении по разбитым грунтовым или лесным дорогам на скоростях свыше 5 км/час наблюдается существенное перераспределение нагруженности в ходовой части: среднеквадратическое отклонение нагрузок в задних подвесках уменьшается, а в передних подвесках увеличивается.

Выполнена оценка влияния массы прицепа и скорости буксировки на долговечность ходовой системы тягача. На рис.5 в качестве иллюстрации показано изменение долговечности деталей кормовых подвесок в зависимости от коэффициента использования линейной машины в качестве тягача.

Изучены импульсные процессы изменения усилий в штангах ТСУ при режимах движения поезда, связанных с резким приложением тяговых или тормозных сил (трогание и разгон поезда, резкое торможение, переключение передач, преодоление одиночных препятствий).

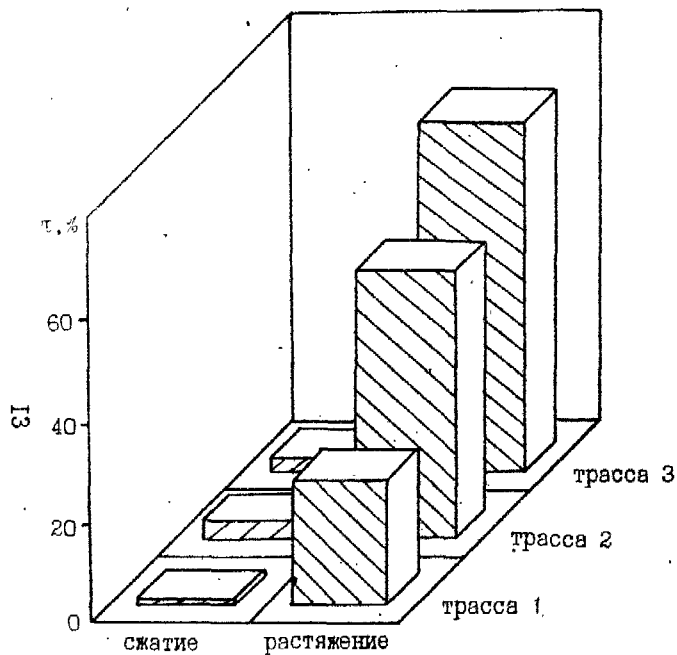


Рис. 4. Относительное время работы ТСУ в состоянии "пробоя" при движении поезда по различным трассам

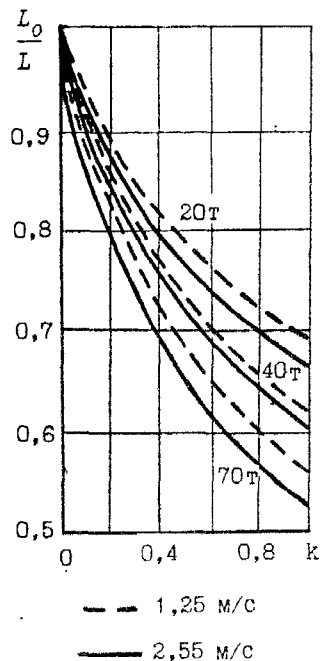


Рис. 5. Изменение относительной долговечности ( $L_0/L$ ) задних подвесок гусеничной машины в зависимости от относительного времени ее работы в качестве тягача ( $k$ )

движение в условиях бездорожья и другие). На рис.6 в качестве иллюстрации показаны процессы изменения усилия в ТСУ при разном времени разгона поезда, а на рис.7 - зависимость экстремальных значений усилий в ТСУ от времени переключения с 1 на 2 передачу.

Изучено влияние конструктивных параметров ТСУ (длина штанги, жесткость и рабочий ход упругого элемента, величина зазоров, расположение кривых крепления) на нагруженность сцепного устройства; проведена серия расчетных исследований движения гусеничного поезда при различных дорожных и эксплуатационных условиях, в которых поочередно изменялся один из конструктивных параметров. Из анализа расчетных исследований следует, что при уменьшении длины штанги сцепного устройства (до 1,5 м) в нем существенно возрастают нагрузки и ускорения, что, очевидно, объясняется увеличением связанности движения машин относительно друг друга и, следовательно, повышением влияния колебаний корпуса одной машины на другую. Увеличение жесткости упругого элемента ТСУ приводит к росту его нагруженности при переезде одиночных неровностей и при движении по типичным трассам и мало влияет в процессе трогания и торможения. Наличие зазоров в ТСУ значительно повышает его нагруженность, так с увеличением зазоров возрастает вероятность появления нагрузок большой величины и значительных (до  $3g$ ) горизонтальных ускорений. Это явление, очевидно, объясняется тем, что с увеличением зазоров увеличивается время разрыва силовой связи между тягачом и прицепом, и чем больше это время, тем больше ударные нагрузки в сцепном устройстве в момент восстановления этой связи. Увеличение рабочего хода упругого элемента значительно уменьшает нагруженность сцепного устройства, существенно снижая вероятность работы сцепного устройства в состоянии "пробоя". Значительно снижает нагруженность ТСУ расположение кривых на продольной оси симметрии машин, что объясняется снижением связанности колебаний при движении гусеничного поезда в различных дорожных условиях. В качестве примеров на рис.8 приведены зависимости максимальных значений усилий в ТСУ, продольных и вертикальных ускорений на месте оператора, возникающих при переезде неровности типа "впадина", от длины штанги, на рис.9 - функции вероятности превышения нагрузки в ТСУ заданного уровня при движении поезда по двум типам трасс с ТСУ различной длины.

Как показали расчеты, нагруженность ТСУ определяется не

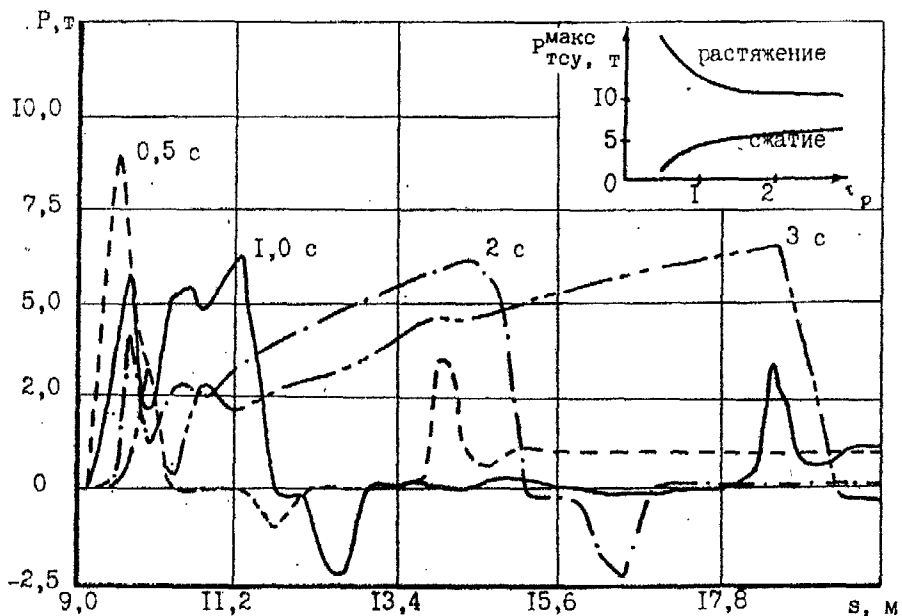


Рис. 6. Усилия в штанге тягово-сцепного устройства при различном времени разгона поезда

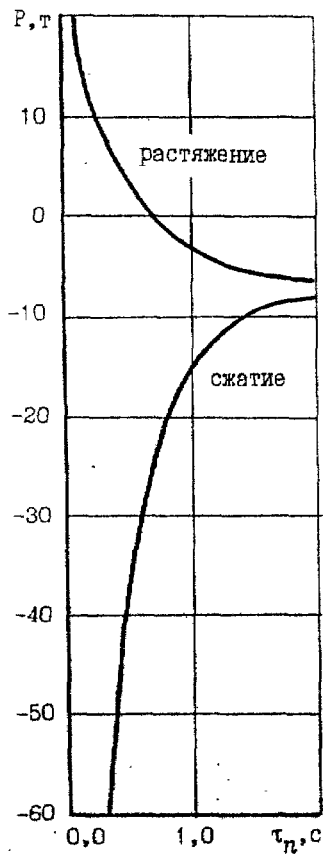


Рис.7. Изменение максимальных усилий в штанге ТСУ при переключении с 1 на 2 передачу в зависимости от продолжительности переключения

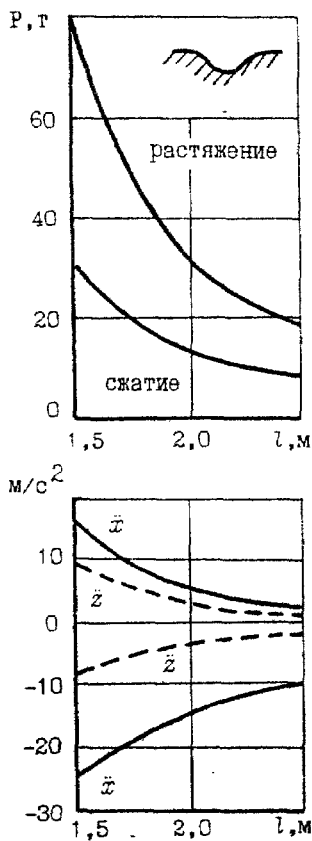


Рис.8. Изменение максимальных усилий в штанге ТСУ, вертикальных ( $\ddot{z}$ ) и горизонтальных ускорений ( $\ddot{x}$ ) на месте оператора инженерной машины при взрывозвании длиной штанги ТСУ



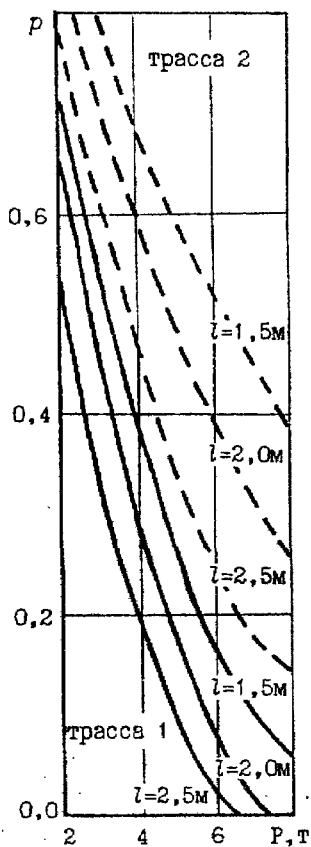
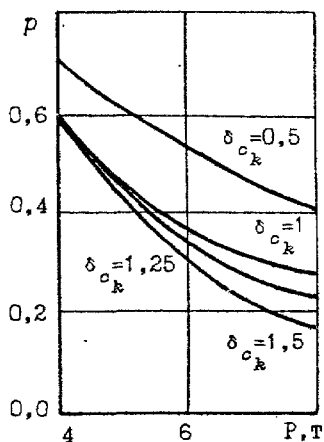
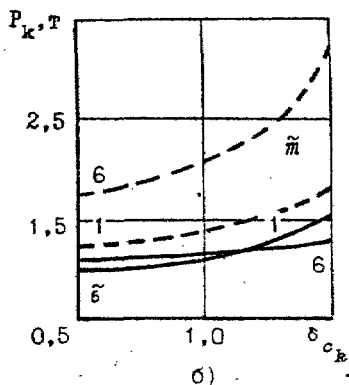


Рис.9. Изменение вероятности превышения нагрузки в штанге ТСУ заданного уровня при варьировании длиной штанги



а)



б)

Рис.10. Изменение вероятности превышения нагрузки в штанге ТСУ заданного уровня (а) и нагруженности подвесок тягача (б) при варьировании жесткости 4,5 и 6 подвесок ( $\delta_{c_k}$ )

только его конструктивными параметрами, но и параметрами под-  
рессоривания тягача. Анализ показывает, что тягач с "мягкими"  
подвесками порождает в сцепном устройстве большие нагрузки; при  
более "жестких" подвесках нагруженность ТСУ снижается, но зна-  
чительно возрастают нагрузки в ходовой части тягача. На рис.10  
представлена зависимость характеристик нагруженности ТСУ и ве-  
личины математического ожидания ( $\bar{m}$ ) и среднеквадратического от-  
клонения ( $\bar{\sigma}$ ) нагрузок в крайних (передней (1) и задней (6))  
подвесках тягача при варьировании жесткости трех задних подве-  
сок тягача.

Проведено исследование взаимного влияния основных парамет-  
ров ТСУ на его нагруженность с помощью простых эмпирических  
уравнений. Среди факторов, оказывающих существенное влияние на  
изменение нагруженности сцепного устройства, выделены его ос-  
новные конструктивные параметры: длина штанги ( $l$ ), величина за-  
зора ( $\Delta$ ), жесткость ( $c$ ) и рабочий ход упругого элемента ( $z$ ) тя-  
гово-сцепного устройства. Анализ характера влияния каждого из  
этих параметров на нагруженность сцепного устройства в отдель-  
ности показал, что он носит нелинейный характер, и поэтому для  
описания вероятности превышения нагрузок заданного уровня целе-  
сообразно использовать модель второго порядка с учетом парных  
взаимодействий параметров. В качестве примера приведено эмпири-  
ческое уравнение, описывающее вероятность работы ТСУ в состоя-  
нии пробоя ( $P > 8,0 \text{ т}$ ) при движении поезда по разбитой грун-  
товой дороге с естественными и наезженными машинами неровностя-  
ми (трасса 2):

$$\begin{aligned} \bar{P}(P_t > 8,0) = & 0,1450 - 0,0362\delta_l^2 + 0,0387\delta_c^2 + 0,0695\delta_\Delta^2 - 0,0050\delta_z^2 - \\ & 0,0261\delta_l\delta_c - 0,1000\delta_l\delta_\Delta - 0,0278\delta_l\delta_z + 0,0212\delta_c\delta_\Delta - \\ & 0,0032\delta_c\delta_z - 0,0004\delta_\Delta\delta_z - 0,0067\delta_l\delta_c\delta_\Delta\delta_z. \end{aligned}$$

где

$\delta_l, \delta_c, \delta_\Delta, \delta_z$  - коэффициенты, отображающие долю каждого  
параметра по отношению к штатному варианту конструкции ТСУ.

Анализ полученных уравнений позволил определить оптималь-  
ные параметры ТСУ. Выполнено сопоставление эксплуатационной на-  
груженности сцепных устройств с различными конструктивными осо-  
бенностями: первый вариант - штатная конструкция ( $\delta_l = \delta_c =$   
 $\delta_\Delta = \delta_z = 1$ ), второй вариант - конструкция с "мягкой" упругой ха-  
рактеристикой, увеличенным рабочим ходом упругого элемента и

уменьшенным зазором ( $\delta_1=1$ ,  $\delta_c=0,5$ ,  $\delta_\Delta=0,8$ ,  $\delta_s=4,5$ ), третий вариант - конструкция с комбинированной упругой характеристикой, увеличенным рабочим ходом упругого элемента и уменьшенным зазором ( $\delta_1=1$ ,  $\delta_c=0,7$ ,  $\delta_{c2}=0,2$ ,  $\delta_\Delta=0,8$ ,  $\delta_s=5,5$ ). Наряду с изменением конструктивных особенностей сцепного устройства была выполнена оценка изменения нагруженности ТСУ при увеличении массы буксируемого прицепа с 40 до 70 т (рис.11). Получено, что введение конструктивных изменений в штатном варианте сцепного устройства приводит к значительному изменению его нагруженности, в частности, к снижению вероятности работы ТСУ в состоянии "пробоя" (рис.12).

Основные результаты диссертационной работы сводятся к следующему:

1. Экспериментально выявлены особенности динамических и кинематических процессов в элементах большегрузного гусеничного поезда в условиях реальной эксплуатации, в частности, установлено, что процессы, протекающие в несущей системе поезда относятся к классу узкополосных стационарных Гауссовых процессов, а процессы в тягово-сцепном устройстве носят характер случайных импульсных потоков.

Экспериментально установлено, что в тяжелых дорожных условиях в тягово-сцепном устройстве возникают значительные импульсные нагрузки, в 5...10 раз превышающие номинальное значение тягового усилия, относительное время пребывания сцепного устройства в состоянии жесткого упора составляет 40...60 %, а ускорения на месте оператора достигают значений до 3g.

2. На основании натурных исследований обоснованы исходные положения и допущения, на базе которых разработана математическая модель движения большегрузного гусеничного поезда в тяжелых дорожных условиях и выполнена идентификация ее параметров; математическая модель, наряду с основными динамическими свойствами системы, учитывает нелинейные упруго-вязкие характеристики подвесок и сцепного устройства, наличие односторонних связей в гусеничном движителе, нелинейную тяговую характеристику тягача, описывает случайный характер внешнего воздействия и наличие переходных процессов в системе "тягач - тягово-сцепное устройство - прицеп";

на основе сопоставления результатов натурных и расчетных исследований доказана адекватность разработанной математической модели.

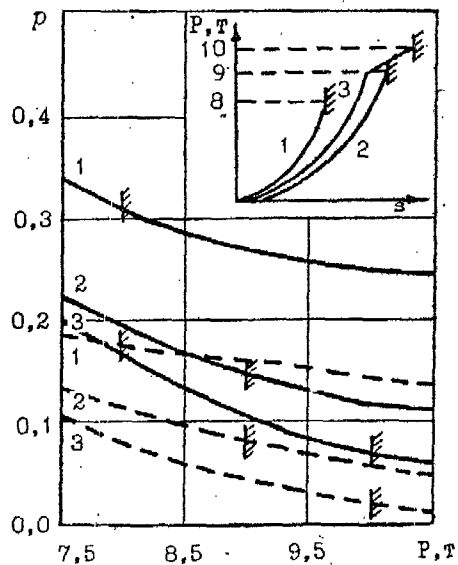


Рис. 11. Изменение вероятности превышения нагрузки в штанге ТСУ заданного уровня при буксировке прицепа массой 40 т (---) и 70 т (—)

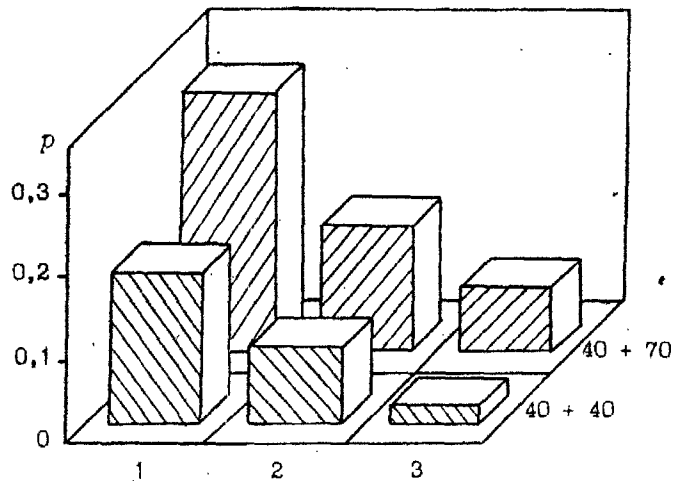


Рис. 12. Изменение вероятности состояния "пробоя" ТСУ при использовании сцепных устройств с различными конструктивными особенностями

3. В результате исследований с помощью разработанной математической модели получены зависимости, описывающие влияние жесткости системы поддресоривания тягача, массы прицепа, скорости буксировки и дорожных условий на нагруженность ходовой системы поезда; показано, что с усложнением эксплуатационных условий наблюдается перераспределение нагруженности подвесок тягача, в частности происходит уменьшение среднеквадратического отклонения нагрузок в задних и увеличение в передних подвесках;

получены зависимости изменения долговечности тяжело нагруженных элементов ходовой системы тягача при различных режимах и условиях его эксплуатации, в частности, показано, что при коэффициенте использования машины в качестве тягача, равном 0,3, долговечность его кормовых подвесок снижается в 1,5 раза;

изучен вопрос о целесообразности использования в конструкциях тягачей, предназначенных для буксировки прицепов повышенной массы, подвесок с регулируемыми жесткостями; показано, что увеличение жесткости кормовых подвесок приводит, с одной стороны, к снижению нагруженности тягово-сцепного устройства, а с другой, к существенному увеличению нагруженности кормовых подвесок тягача, так, например, увеличение жесткости кормовых подвесок в 1,25 раза снижает вероятность возникновения пробоа сцепного устройства в 1,4 раза, при этом среднеквадратическое отклонение нагрузок кормовых рессор возрастает в 1,3 раза.

4. Изучены закономерности изменения нагруженности тягово-сцепного устройства при изменении его конструктивных параметров (длина штанги, жесткость и рабочий ход упругого элемента, зазор, расположение крюков крепления); выработаны рекомендации по совершенствованию конструкции, в частности, предложены варианты изменений характеристик сцепного устройства, позволяющие существенно снизить его нагруженность, так вариант конструкции с "мягкой" упругой характеристикой, увеличенным рабочим ходом упругого элемента и уменьшенным зазором позволяет в 2 раза снизить вероятность появления "пробоя", а вариант конструкции с комбинированной упругой характеристикой, увеличенным рабочим ходом упругого элемента и уменьшенным зазором позволяет снизить вероятность "пробоя" в 4 раза по отношению к штатному варианту.

На основе разработанной модели предложена методика, позволяющая на стадии проектирования новых прицепных систем оперативно оценивать нагруженность сцепного устройства и выбирать варианты конструкций с рациональным сочетанием параметров.

5. Разработанные методики и программное обеспечение были использованы при разработке новых перспективных машин, в частности, при проектировании модернизированного большегрузного сельскохозяйственного прицепа на заводе тракторных прицепов (г. Орск) и при создании семейства инженерных машин многоцелевого назначения в конструкторском бюро транспортного машиностроения (г. Омск).

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Сафронова И.В., Сергеев В.Г. Расчетные исследования динамической нагруженности тягово-сцепного устройства гусеничных машин // Динамика и прочность мобильных машин: Республиканская научно-техническая конференция: Тезисы докладов: Кутаиси: 1990.- С.76.
2. Сафронова И.В., Сергеев В.Г. Модель движения гусеничного поезда // Прочность машин и аппаратов при переменных нагрузках: Сборник научных трудов.- Челябинск: ЧГТУ, 1991.- С.115-119.
3. Сафронова И.В. Влияние условий эксплуатации на долговечность ходовой части тягача // Прочность машин и аппаратов при переменных нагрузках: Сборник научных трудов.- Челябинск: ЧГТУ, 1991.- С. 140-143.
4. Сафронова И.В., Сергеев В.Г. Моделирование движения гусеничного поезда // Расчет и управление больших механических систем: Сборник научных трудов.- Екатеринбург: Наука, 198.- С.148.
5. Сафронова И.В. Динамика и надежность системы "тягач-прицеп" при случайном внешнем воздействии // Прочность машин и живучесть конструкций: Тезисы Всероссийской конференции.- Вологда, 1993.- С.113.
6. Сафронова И.В., Усольцев П.В. Экспериментальные исследования динамических процессов при буксировке машин // Прочность машин и аппаратов при переменных нагрузках: Сборник научных трудов.- Челябинск: ЧГТУ, 1993.- С.120-124.
7. Сафронова И.В. Исследования влияния конструктивных и эксплуатационных факторов на динамику гусеничного поезда // Прочность машин и аппаратов при переменных нагрузках: Сборник научных трудов.- Челябинск: ЧГТУ, 1993.- С.124-128.
8. Сафронова И.В. Динамика прицепных систем // Тезисы Всероссийской конференции.- Челябинск, 1993.- С.60.

Издательство Челябинского  
государственного технического университета

---

ЛР№020364. 20.01.92. Подписано в печать 12.05.94. Формат бумаги  
60X84 1/16. Печать офсетная. Печ.л. 1,25. Уч.-изд.л. 1.  
Тираж 100 экз. Заказ 99/200.

---

УОП издательства. 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76.