

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГРУЗОВОГО АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА НА ДОРОЖНУЮ КОНСТРУКЦИЮ В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

EXPERIMENTAL STUDIES ON THE EFFECT OF TRUCKS ON THE ROAD DESIGN IN REAL CONDITIONS

I. Isaev

Summary. the results of experimental studies of the impact of heavy road transport on the road structure in real conditions are presented. Developed and tested test method using a specially designed mobile system for registration and analysis of dynamic processes.

The obtained experimental data were used to compare the results of simulation and full-scale experiment.

Keywords: heavy road transport, road construction, dynamic process, digital signal processing, analog — to — digital converter.

Исаев Иван Александрович

Аспирант, Тюменский индустриальный
университет
NaviVeasi@gmail.com

Аннотация. приведены результаты экспериментальных исследований воздействия большегрузного автомобильного транспорта на дорожную конструкцию в реальных условиях. Разработана и апробирована методика испытаний с использованием специально созданной мобильной системы регистрации и анализа динамических процессов.

Полученные экспериментальные данные использовались для сопоставления результатов имитационного моделирования и натурного эксперимента.

Ключевые слова: большегрузный автомобильный транспорт, дорожная конструкция, динамический процесс, цифровая обработка сигналов, аналого-цифровой преобразователь.

Целью экспериментальных исследований воздействия большегрузного автомобильного транспорта на дорожное покрытие в реальных условиях эксплуатации является:

- ◆ измерение осевых нагрузок транспортных средств (ТС) в движении на дорожное покрытие автомобильных дорог общего пользования;
- ◆ оценка динамического воздействия ТС на дорожную конструкцию;
- ◆ сопоставление результатов натурного эксперимента с результатами имитационного моделирования.

Экспериментальные исследования воздействия большегрузного автомобильного транспорта на дорожную конструкцию базируются на разработанной методике и программе испытаний с использованием специально созданной мобильной системы регистрации и анализа динамических процессов.

Методика

проведения экспериментальных исследований

В рамках настоящей работы для осуществления экспериментальных проездов ТС были выбраны:

- ◆ трехосный грузовой автомобиль КАМАЗ — 53215;
- ◆ двухосный седельный тягач КАМАЗ — 5460-73 с трехосным полуприцепом.

Длина участков наблюдения принималась равной 450 м. Микропрофиль участков предварительно оцифровывался методом пошагового нивелирования с периодом измерения высот (ординат) через 0,1 м.

Скорость ТС являлась постоянной. Проезды ТС осуществлялись на скорости: 20, 40, 60, 80, и 100 км/ч.

Загрузка ТС осуществлялась по трем вариантам:

- ◆ снаряженная масса без груза;
- ◆ снаряженная масса с максимально допустимым грузом;
- ◆ снаряженная масса с перегрузом 10% и 30%.

Для измерения и регистрации динамического воздействия грузового ТС на дорожное покрытие на вторую ось ТС были установлены магниторезистивные датчики перемещения DP — 01 (GNOM DP) [9].

Датчик перемещения предназначен для определения нагрузки на ось и массы груза на автомашинах с рессорной подвеской.

Таблица 1. Технические характеристики датчика перемещения GNOM DP — 01

Наименование показателя	Единица измерения	Значение
Диапазон изменения напряжения выходного сигнала	В	1,54...3,46
Относительная погрешность выходного сигнала	%	± 2,5
Диапазон измерения угла поворота рычага	град	- 40...+40
Диапазон напряжения питания	В	8-32
Степень защиты корпуса		IP55
Температурный диапазон	°С	- 40 ... +80

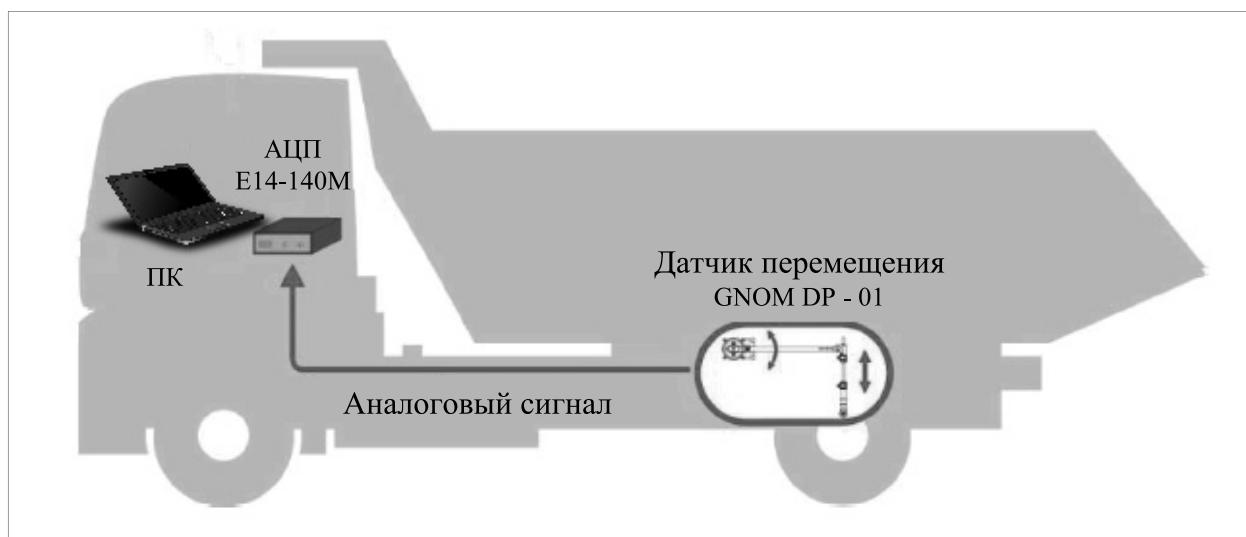


Рис. 1. Схема мобильной системы сбора и регистрации динамических осевых нагрузок ТС

Датчик устанавливается на раму ТС и с помощью системы рычагов соединяется с подрессоренной осью. Датчик измеряет меняющееся во время движения расстояние от рамы до оси и формирует выходной сигнал аналогового напряжения для передачи в мобильную систему сбора и регистрации динамических процессов.

К достоинствам датчика относятся:

- ♦ магниторезистивный принцип действия;
- ♦ высокая степень защиты датчика от внешних воздействий;
- ♦ соответствие европейским и российским автомобильным стандартам по электромагнитной совместимости и устойчивости;

- ♦ встроенный стабилизатор питания — выходной сигнал не зависит от напряжения бортовой сети; защита от короткого замыкания;
- ♦ высокая износостойкость за счет отсутствия трущихся элементов.

Технические характеристики датчика приведены в таблице 1.

Для установления соответствия напряжения выходного сигнала датчика нагрузке на ось ТС проводилась процедура тарировки. Тарировка осуществлялась с использованием сертифицированных стационарных автомобильных весов и мерных грузов.

Таблица 2. Технические характеристики модуля E14–140M (L–\$5ARD)

Наименование показателя	Значение
Количество каналов	16 дифференциальных 32 с «общей землей»
Разрядность АЦП	14 бит
Пределы допускаемой погрешности измерений напряжения постоянного тока	±0,05%
Коэффициент подавления синфазных помех	Не менее 70 дБ
Максимальная частота преобразования	200 кГц
Пределы допускаемой погрешности частоты преобразований АЦП	±0,005%
Микроконтроллер	AT91SAM7S256
Тактовая частота	48 МГц
Внутреннее ОЗУ данных	64 Кбайт
Количество выходов	16 параллельных, асинхронных
Диапазон напряжений на цифровых выходах	0...+0,4 В («логический ноль») Не менее 2,4 В («логическая единица»)
Потребляемый ток	До 240 мА
Габариты и масса	140 x 96 x 30 мм; 0,2 кг

Рабочие точки для составления тарифовочной зависимости выбирались в диапазоне от минимальной нагрузки на ось (отсутствие груза) до максимально допустимой производителем (максимально допустимая масса груза) и до перегруза в 30%. Полученная зависимость носит нелинейный характер.

Во время движения ТС с установленными датчиками осуществляется непрерывное измерение осевых нагрузок, которые в виде аналогового сигнала передаются в мобильную систему сбора и регистрации динамических процессов. Данная система преобразует аналоговые сигналы в цифровую форму и записывает их в виде файлов данных на носитель персонального компьютера (ПК) (см. рисунок 1).

В итоге, результатами измерений являются осевые динамические нагрузки колес ТС на дорожное покрытие в виде дискретных временных рядов.

Таким образом, методика проведения экспериментальных исследований включает следующие этапы:

- ◆ организационное планирование эксперимента;
- ◆ определение основных параметров эксперимента: загруженность ТС, скорость проезда, неровность микропрофиля дороги;
- ◆ выбор исследуемого участка автомобильной дороги. Оцифровка микропрофиля участка методом пошагового нивелирования;
- ◆ оценка технического состояния ТС (состояние элементов рессорной подвески, давление шин, напряжение бортовой сети, качество «массы» электропитания);
- ◆ измерение полной массы ТС и статических осевых нагрузок; тарировка датчиков;

- ◆ проверка мобильной системы с подключенными датчиками;
- ◆ установка по каналам параметров измерения и регистрации сигналов;
- ◆ проезд ТС по заданному участку и регистрация процессов;
- ◆ документирование параметров, данных и служебной информации натурального эксперимента;
- ◆ обработка и анализ результатов эксперимента.

В соответствии с данной методикой были разработаны программы натуральных испытаний для выбранных ТС. Общий объем натуральных испытаний для двух типов ТС составил 40 проездов по автомобильному участку с ровным асфальтовым покрытием протяженностью 450 м. Въезд до участка измерения и регистрации динамических процессов для необходимого набора и стабилизации скорости составлял от 200 м до 1500 м.

Мобильная система регистрации и анализа динамических процессов

Многоканальная мобильная система регистрации и анализа динамических процессов включает в себя:

- ◆ магниторезистивные датчики перемещения DP — 01 (GNOM DP) [9];
- ◆ блок коммутации;
- ◆ фильтр низких частот (ФНЧ);
- ◆ внешний модуль АЦП E14–140M [8];
- ◆ кабель — фильтр LTR — CMF1A [8];
- ◆ энергонезависимый персональный компьютер типа «ноутбук» (ПК);
- ◆ системное программное обеспечение;

- ◆ специализированное прикладное программное обеспечение;
- ◆ периферийные устройства ввода/вывода информации.

Для построения относительно недорогой многоканальной мобильной системы сбора и регистрации динамических процессов использовался персональный компьютер типа «ноутбук» (с аккумуляторной батареей повышенной емкости) и внешний модуль АЦП E14–140M (L–\$5ARD) [8].

E14–140 — M является малогабаритным многофункциональным модулем, подключаемым к компьютеру через USB — интерфейс. Используемый интерфейс USB2.0/3.0 не требует дополнительного источника питания. Программно осуществляется выбор диапазонов измерения, частоты дискретизации и конфигурация входов АЦП. Синхронизация АЦП возможна по внешнему синхросигналу или по уровню входного сигнала.

Установленный на модуле 32 — разрядный ARM процессор, работающий на тактовой частоте 48 МГц, доступен для программирования. Технические характеристики модуля E14–140M (L–\$5ARD) представлены в таблице 2.

Данный модуль внесен в Госреестр средств измерений РФ.

Сигнальные провода датчиков измерения осевых нагрузок ТС подключаются к входному разъему аналоговых сигналов данного модуля при помощи кабеля — фильтра LTR — CMF1A и платы клеммников.

Фильтр LTR — CMF1A применяется для подавления синфазных импульсных помех и повышения помехозащищенности и электросовместимости используемых устройств.

В комплект входит программа PowerGraph [8], предназначенная для:

- ◆ сбора данных с различных измерительных устройств и приборов;
- ◆ регистрации, визуализации и обработки сигналов в режиме реального времени;
- ◆ редактирования, математической обработки и анализа данных;
- ◆ хранения, импорта и экспорта данных различного формата.

В рамках данной работы была разработана динамически подключаемая библиотека (DLL) в виде внешних плагинов для цифрового анализа сигналов во временной и частотной областях, в которую входят подпрограммы:

- ◆ калибровки датчиков в полевых условиях;
- ◆ цифровой фильтрации (полосовой фильтр, ФНЧ);
- ◆ амплитудно–статистического анализа;
- ◆ весового (оконного) взвешивания;
- ◆ спектрального анализа (с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ));
- ◆ идентификации источников колебаний и собственных частот.

Результаты экспериментальных исследований

В соответствии с программой натурных испытаний для трехосного автомобиля КАМАЗ — 53215 были получены новые экспериментальные данные в виде дискретных временных рядов полных вертикальных нагрузок на вторую ось ТС. Также по отдельным каналам регистрировалась скорость движения автомобиля и отметка времени. Частота дискретизации задавалась $F_0 = 500$ Гц.

Дискретные временные ряды анализировались во временной и частотной областях, а результаты анализа использовались для оценки точности разработанной математической модели взаимодействия грузового ТС или седельного тягача с полуприцепом с дорожным полотном.

На рисунке 2 показана зависимость максимальной относительной осевой нагрузки $N_{ki}^{\delta \max}$ второй оси автомобиля КАМАЗ — 53215 от скорости движения по результатам имитационного моделирования и натурных испытаний при различной полной массе ТС.

$$N_{ki}^{\delta \max} = \frac{N_{ki}^{\max}}{G_{ki}}, \quad (1)$$

где i — номер оси грузового автомобиля;
 G_{ki} — статическая колесная нагрузка i -ой оси на дорогу;
 $N_{ki}^{\delta \max}$ — максимальная колесная нагрузка i -ой оси на дорогу.

Для анализа вертикальной нагрузки используется ее отношение к статической нагрузке. Относительный динамический показатель показывает во сколько раз динамическая нагрузка от движущегося ТС больше или меньше статической нагрузки от неподвижного ТС.

Точность расчета максимальной относительной осевой нагрузки при имитационном моделировании по сравнению с полученными экспериментальными данными составляет:

$$\delta(N_{k2}^{\delta \max}) = \delta\left(\frac{N_{k2}^{\max}}{G_{k2}}\right) \leq 5,0\%,$$

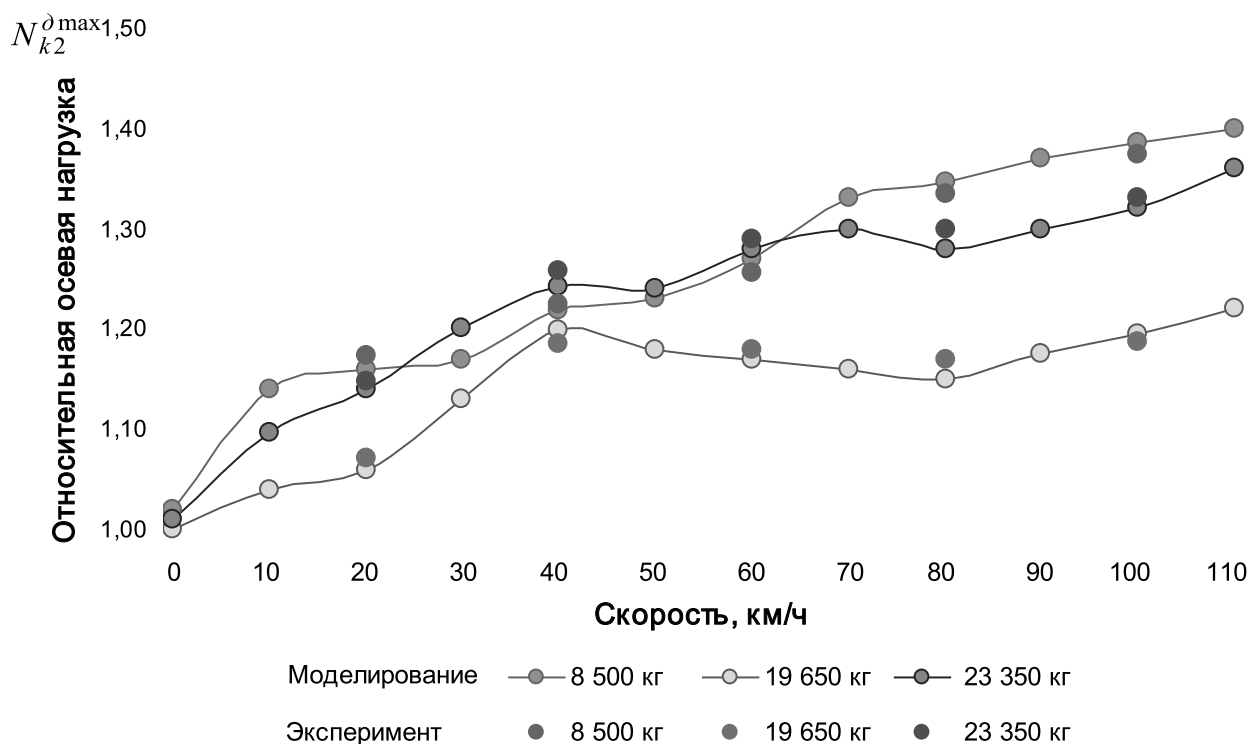


Рис. 2. Зависимость максимальной относительной осевой нагрузки второй оси автомобиля КАМАЗ — 53215 от скорости движения

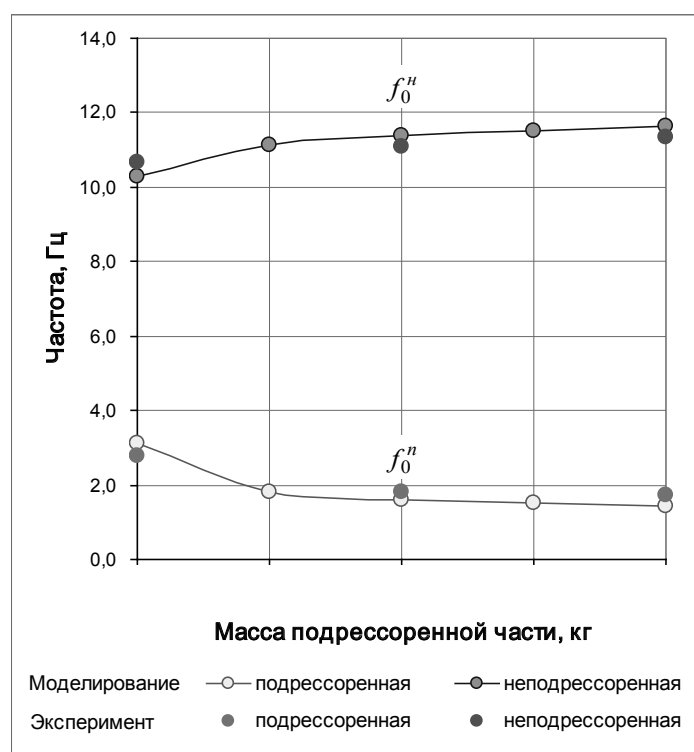


Рис. 3. Влияние массы поддрессоренной части на собственные частоты колебаний поддрессоренной и недрессоренной масс

что свидетельствует о возможности использования для анализа динамического воздействия грузовых ТС на дорожное покрытие как разработанной расчетной и математической модели, так и методики экспериментальных исследований.

Для установившихся колебаний на ровной дороге с асфальтовым покрытием исследовалось влияние загрузки ТС на собственные частоты поддрессоренной и неподдрессоренных масс. При различной степени загрузки автомобиля масса поддрессоренных частей, в частности, приходящаяся на наиболее нагруженную вторую ось, может изменяться в широких пределах.

Для автомобиля КАМАЗ — 53215 проводилась обработка экспериментальных данных в частотной области в диапазоне полной массы m_n : 8500 кг (без груза) — 19650 кг (с допустимым грузом 11150 кг).

На рисунке 3 представлены зависимости влияния массы поддрессоренной части (или статической нагрузки на ось G_{k2}) на собственные частоты колебаний поддрессоренной и неподдрессоренной масс.

В отличие от поддрессоренной, собственная частота неподдрессоренной массы f_0^H при увеличении величины поддрессоренной массы возрастает.

Точность расчета составляет:

$$\delta(f_0^n) \leq 6,5\%; \delta(f_0^H) \leq 5,0\%$$

Полученные результаты подтвердили приведенные выше выводы по адекватности разработанной модели.

Заключение

Проведенный комплекс работ по экспериментальным исследованиям динамического воздействия грузо-

вых ТС на дорожное покрытие позволяет сделать следующие выводы:

1. Разработана и апробирована методика экспериментальных исследований на эксплуатируемых автомобильных дорогах по оценке динамического воздействия ТС на дорожную конструкцию;
2. В отличие от большинства исследований динамического воздействия грузового ТС на дорожное покрытие по среднеквадратичным отклонениям вертикальных виброускорений с использованием виброакселерометров для измерений использовались магниторезистивные датчики перемещений, позволяющие непосредственно регистрировать осевые нагрузки.
3. Разработана схема, подобрано оборудование и собрана мобильная система регистрации и анализа динамических процессов;
4. Разработано прикладное программное обеспечение — динамически подключаемая библиотека для цифрового анализа сигналов во временной и частотной областях;
5. Выполнен большой объем натурных испытаний и получены новые экспериментальные данные о динамических осевых нагрузках грузовых ТС на дорожное покрытие автомобильных дорог общего пользования. Выполнен подробный анализ во временной и частотной областях результатов эксперимента.
6. Полученные экспериментальные данные использовались для сопоставления результатов имитационного моделирования и натурального эксперимента.
7. Использование современной цифровой системы регистрации и анализа динамических процессов позволяет повысить точность измерений и расширяет функциональные возможности обработки исследуемых сигналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Айфичер, Э. Цифровая обработка сигналов: практический подход / Э. Айфичер, Б. Джервис. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2004. — 992 с.
2. Бендат, Д. Изменение и анализ случайных процессов / Д. Бендат, А. Пирсол. — М.: Мир, 1974. — 464 с.
3. Гельман, М. М. Аналого — цифровые преобразователи для информационно — измерительных систем / М. М. Гельман. — М.: Издательство стандартов, 2009. — 317с.
4. Лайонс, Р. Цифровая обработка сигналов / Р. Лайонс. — М.: ООО «Бином — Пресс», 2015. — 656 с.
5. Марпл — мл., С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / С. Л. Марпл — мл.; Пер. с англ. — М.: Мир, 1990.
6. Оппенгейм, А. Цифровая обработка сигналов / А. Оппенгейм, Р. Шафер; Пер. с англ. С. А. Кулешов; Пер. с англ. С. Ф. Боев. — М.: Техносфера, 2012. — 1048 с.
7. Солонина, А. И. Алгоритмы и процессоры цифровой обработки сигналов / А. И. Солонина, Д. А. Улахович, Л. А. Яковлев. СПб.: БХВ — Петербург, 2001. 464 с.
8. Внешние модули АЦП / ЦАП — E14: [Электронный ресурс] // L — CARD. М., 2018. URL: <http://www.lcard.ru/node/121/>. (Дата обращения 02.02.2019).
9. Датчик нагрузки на оси GNOM DP: [Электронный ресурс] // СП Технотон. Минск, 2018. URL: <https://www.jv — technoton.com/ru/produkty/gnom — dp/>. (Дата обращения 02.02.2019).