

На правах рукописи



КУЗЬМИН Андрей Олегович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ  
НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ МОТОТЕХНИКИ НА  
УСТАЛОСТНУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ  
НА СТЕНДЕ С БЕГОВЫМИ БАРАБАНАМИ**

Специальность 2.5.11. Наземные транспортно-технологические  
средства и комплексы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в Государственном научном центре Российской Федерации – Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ» (ФГУП «НАМИ»).

Научный руководитель кандидат физико-математических наук  
**Мещеряков Денис Евгеньевич**  
(ФГУП «НАМИ»)

Официальные оппоненты: **Макаров Владимир Сергеевич**  
доктор технических наук, доцент, профессор  
кафедры «Строительные и дорожные машины»  
ФГБОУ ВО "Нижегородский государственный  
технический университет им. Р.Е. Алексеева"

**Левенков Ярослав Юрьевич**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры СМ-10 «Колесные Машины»  
ФГАОУ ВО «Московский государственный  
технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)»

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Кубанский государственный  
аграрный университет имени И.Т. Трубилина»**

Защита состоится «02» июля 2026 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 31.1.008.01 при ФГУП «НАМИ» по адресу: 125438, г. Москва, ул. Автомоторная, д. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «НАМИ» и на сайте [www.nami.ru](http://www.nami.ru) по ссылке: <https://nami.ru/directions/scientificactivity/dissertation-council>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенные печатью организации, просим направлять по вышеуказанному адресу, ученому секретарю диссертационного совета, а копии присылать на e-mail: [rinat.kurmaev@nami.ru](mailto:rinat.kurmaev@nami.ru)

Автореферат разослан «30» апреля 2026 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент



Курмаев  
Ринат Ханяфиевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Несмотря на развитие и широкое распространение в настоящее время в технике расчетных методов оценки конструкции, физические или натурные испытания не потеряли своей актуальности. Особенно это важно для сложных узлов и комплектных транспортных средств.

На рынке испытательного оборудования, для проведения испытаний на усталостную долговечность несущих систем транспортного средства, преобладают сервогидравлические стенды, преимущество которых – воспроизведение записанного во время движения профиля дороги вдоль осей нагружения посредством итерационного процесса разработки. Из минусов можно отметить их высокую стоимость и невозможность обеспечивать вращения колес при испытаниях, а также сложность реализации поперечного и продольного воздействия в пятне контакта колеса с опорной поверхностью. Отдельно стоит отметить нераспространённость сервогидравлических стендов для испытаний мототехники.

Стенды для усталостных испытаний с нагружением транспортных средств посредством установленных на вращающихся барабанах неровностях известны, их стоимость существенно ниже, а конструкция проще, но они имеют недостаток, который заключается в невозможности воспроизведения записанных сигналов нагружения с дороги, а самое главное - отсутствие методически обоснованного способа перехода от реальной дорожной нагруженности к стендовой. Подобные стенды для испытания двухколесных транспортных средств имеют распространение, но их применение ограничено в силу сложности прогнозирования заданного ресурса при испытаниях. Как правило, подобные стенды применяются при сравнении различных объектов между собой или на базе ранее накопленных экспериментальных данных.

При проектировании мотоциклов категории L3 и L4 в ФГУП «НАМИ» возникла необходимость проведения испытаний элементов несущей конструкции мотоцикла на усталостную долговечность. В качестве стендового оборудования выбор был сделан в пользу стенда с беговыми барабанами с одновременной разработкой обоснованного способа задания режима испытания, который будет коррелировать по определенным параметрам с записанными нагрузками при реальной эксплуатации.

Разработанная в данной работе методика испытаний элементов несущей конструкции мототехники на усталостную долговечность на стенде с беговыми барабанами позволит обеспечить применение относительно простых стендов на качественно новом уровне с методически обоснованной возможностью прогнозирования и оценки заданной усталостной долговечности. Именно в этом заключается актуальность исследования.

**Степень разработанности темы.** Отдельные теоретические, методологические и практические основы организации и проведения стендовых и дорожных испытаний несущей конструкции транспортных средств получили

отражение в научных трудах Н.Н. Яценко, А.И. Щепкина, С.Н. Семашко, С.И. Корзинкина, В.С. Лукинского, Ю.Г. Котикова, Е.И. Зайцева и др.

Вопросы проведения испытаний мотоциклов и их несущей конструкции рассмотрены в работах отечественных и зарубежных ученых: А.А. Заплаткина, А.И. Полякова, В.В. Зеленова, В.И. Ланина., В.Д. Самсонова, Ю.В. Самсонова, Н.М. Увакова, М.В. Кутузова, D. Chindamo, M. Gadola, D. Armellin, F. Marchesin.

Однако трудов и материалов, описывающих методики испытания несущей конструкции мотоциклов категорий L3 и L4 на стендах с беговыми барабанами, существует относительно ограниченное количество. В свою очередь, такие стенды активно используют при создании мототехники. В отечественной науке на тему исследования было найдено небольшое количество статей, патентов и методик испытаний.

**Цель диссертационного исследования** заключается в разработке методики испытаний несущей конструкции мототехники на стенде с беговыми барабанами с обеспечением нагружения, эквивалентного дорожному.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели в диссертационной работе необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ существующих методик и стендов для проведения испытаний несущей конструкции мототехники и её элементов на усталостную долговечность.

2. Провести исследование нагруженности несущей конструкции мотоцикла при полигонных испытаниях с целью определения эквивалентных условий стендовых испытаний.

3. Разработать конструкцию стенда с беговыми барабанами для проведения испытаний несущей конструкции мототехники, в том числе с боковым прицепом, и её элементов на усталостную долговечность.

4. Разработать способ и провести оценку влияния варьируемых параметров на уровень нагружения несущей конструкции объекта испытаний в условиях стендовых испытаний.

5. Разработать методику испытаний несущей конструкции мототехники на стенде с беговыми барабанами. Разработать согласно методике режим нагружения для испытаний комплектного мотоцикла на стенде, основанном на результатах режимометрирования при движении по дорогам полигона.

6. Провести расчетную оценку эквивалентности нагруженности мотоцикла на стенде по сравнению с условиями полигона и разработать способ перехода от стендовых испытаний к дорожным.

7. Провести испытания мотоциклов категории L3 и L4 на стенде согласно разработанной методике. Сопоставить усталостную долговечность по отдельным узлам и дать оценку сходимости разрушений при различных видах испытаний, в том числе с расчетными методами. Дать рекомендации по доработке элементов несущей конструкции мотоциклов.

**Объект исследования** – стенд с беговыми барабанами для испытаний несущей конструкции мототехники на усталостную долговечность.

**Предмет исследования** – методика испытаний несущей конструкции мототехники на усталостную долговечность на стенде с беговыми барабанами.

### **Научная новизна** диссертационной работы:

1. Разработан способ определения динамических откликов объекта испытаний для последующей разработки режима на барабанном стенде.

2. Разработана конструкция стенда с беговыми барабанами для проведения испытаний несущей конструкции мототехники, в том числе с боковым прицепом, и её элементов на усталостную долговечность.

3. Разработана методика проведения испытаний на стенде с беговыми барабанами для проведения стендовых испытаний на усталостную долговечность, эквивалентных по уровню нагружения эксплуатационным нагрузкам.

4. Разработан способ эквивалентного перехода от нагруженности при дорожных испытаниях к режиму испытаний на стенде на основе методов схематизации случайных процессов и расчета накопленной псевдоповреждаемости.

5. Разработан новый режим проведения стендовых испытаний, оказывающий нагружение в диапазоне частот, соответствующему реальной эксплуатации, и оказывающий нагружение, коррелируемое с дорожными испытаниями.

**Методология и методы исследования.** Методологическую основу диссертационного исследования составили фундаментальные положения теории прочности и надежности, теории проектирования транспортного средства, усталостного разрушения материалов, труды отечественных и зарубежных авторов, а также опыт в проведении испытаний отечественных и зарубежных исследователей.

В процессе проведения исследования в диссертационной работе были использованы методы имитационного моделирования, методы оценки нагруженности транспортных средств в различных условиях эксплуатации, методы статистического анализа, схематизации случайного процесса и анализ амплитудно-частотных характеристик, а также сопоставление виртуальной оценки усталостной долговечности с натурными испытаниями.

**Область исследования.** Диссертационная работа соответствует паспорту научных специальностей ВАК РФ при Минобрнауки России 2.5.11. Наземные транспортно-технологические средства и комплексы.

**Теоретическая и практическая значимость** исследования состоит в разработке методики испытаний элементов несущей конструкции мототехники на стенде с беговыми барабанами режимом, который оказывает нагружение, эквивалентное дорожной эксплуатации.

Применяя разработанную методику возможно определить набор неровностей (их высоту, тип и количество), скорости вращения беговых барабанов и провести испытания несущей конструкции мототехники на усталостную долговечность.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в возможности использования результатов исследования для обоснованного перехода от случайного дорожного воздействия к блочному для проведения испытаний мототехники на усталостную долговечность на стенде с беговыми барабанами.

Разработанные в диссертационной работе научные и методические положения позволят методически обосновано формировать проведение испытаний на усталостную долговечность на стенде с беговыми барабанами.

Результаты исследования применены для проведения испытаний мотоциклов, а также доработки элементов несущей конструкции и элементов экстерьера.

#### **Положения диссертации, выносимые на защиту:**

Методика испытаний мотоциклов категорий L3 и L4 на усталостную долговечность на стенде с беговыми барабанами.

Способ определения динамического отклика объекта испытания или «процесс идентификации объекта испытания» при наезде на различные единичные неровности, на основании которого формируется режим проведения испытаний.

Режим стендовых испытаний для проведения сравнительных испытаний мотоциклов категории L3 и L4.

Обоснованный способ перехода от реальной дорожной нагруженности к выбору режима испытаний, основанный на оценке динамического отклика объектов испытаний при воздействии различных единичных неровностей на несущую конструкцию мотоциклов категорий L3 и L4.

**Реализация работы.** Основные положения работы применяются в ФГУП «НАМИ» в опытно-конструкторских работах по испытаниям мототехники и в ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет» при выполнении научно-исследовательских работ, а также в учебном процессе, что подтверждается соответствующими актами о внедрении.

**Степень достоверности, апробации и внедрение полученных результатов исследования.** Достоверность научных результатов диссертации базируется на ранее выполненных научно-методических работах и прикладных рекомендациях в области проведения стендовых и дорожных испытаний несущей конструкции транспортных средств.

Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных, всероссийских и региональных научно-практических конференциях: «Ассоциация автомобильных инженеров» (г. Дмитров, 2022 г.); «МАНФ 2022» (г. Москва, 2022 г.); «МАНФ 2023» (г. Москва, 2023 г.); «Ассоциация автомобильных инженеров» (г. Дмитров, 2023 г.); «МАНФ 2024» (г. Москва, 2024 г.); «Наука и культура: поиски и открытия» (г. Москва, 2024 г.); «Перспективы инновационного развития в агротехнических и энергетических системах» (г. Москва, 2024 г.); «Инновационный потенциал развития науки в современном мире: технологии, достижения» (г. Уфа, 2024 г.); «Fundamental and applied approaches to solving scientific problems» (г. Уфа, 2024 г.).

**Публикации.** Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 9 научных работах общим объемом 5,2 п.л. (в т.ч. авторских – 4,0 п.л.), из них 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, и 6 статей в других изданиях.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав основного текста, общих выводов и списка использованных источников. Общий объем работы составляет 214 страниц машинописного текста, включая

152 рисунка, 19 таблиц, 38 формулы, 8 приложений, список используемой литературы включает 125 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** диссертации раскрыта проблематика и обоснована актуальность темы диссертационного исследования, отражены положения научной новизны, выносимые на защиту, а также практическая значимость результатов исследования.

**В первой главе** диссертации проведен анализ известных методик проведения испытаний на усталостную долговечность. Выполнен обзор способов обработки и схематизации случайных процессов, а также методов формирования циклов испытаний, на основании которых формируются методики проведения ресурсных испытаний. Рассмотрены способы перехода от случайного нагружения к гармоническому и блочному режиму нагружения. Также проведен анализ отечественного и зарубежного оборудования, предназначенного для испытаний несущей конструкции транспортных средств, в частности мотоциклов, на усталостную долговечность.

Обозначена проблема исследования – необходимость разработки методики испытаний элементов несущей конструкции мототехники на стенде с беговыми барабанами, которая включает в себя:

- способ оценки воздействия на несущую конструкцию объекта испытаний;
- способ перехода от дорожных испытаний к стендовым;
- разработку режима испытаний.

На основании проведенного анализа определена цель диссертационного исследования и сформулированы его задачи, определены методы и способы с помощью которых будет проводиться сравнение нагруженности несущей конструкции объекта испытаний и обеспечение перехода от испытаний на созданном стенде к дорожным.

**Вторая глава** диссертации посвящена исследованию нагруженности несущей конструкции мотоцикла во время полигонных испытаний для определения эквивалентных условий при проведении стендовых испытаний.

Для решения поставленной задачи было проведено режимометрирование мотоцикла. Перечень дорог для режимометрирования определялся из набора дорог полигона НИЦИАМТ (г. Дмитров), которые используются при проведении ресурсных дорожных испытаний. Для записи нагрузок, возникающих при движении, мотоцикл был инструментирован. На неподрессоренных и поддрессоренных массах установлены емкостные одноосевые датчики ускорения, на упругие элементы подвески были установлены тензорезисторы.

При режимометрировании были записаны следующие дороги: «Булыжник ровного мощения», «Бельгийская мостовая» и «Шумосоздающая дорога». Пример записи ускорений, возникающих на переднем колесе мотоцикла при движении по дороге «Булыжник ровного мощения», представлен на рисунке 1.

По результатам режимометрирования были определены условия проведения стендовых испытаний. Так, скорость, при которой будут проводиться испытания, должна быть не более 60 км/ч, но для возможности проведения испытаний при

более высоких скоростях было решено задать максимальную скорость, равную 90 км/ч.

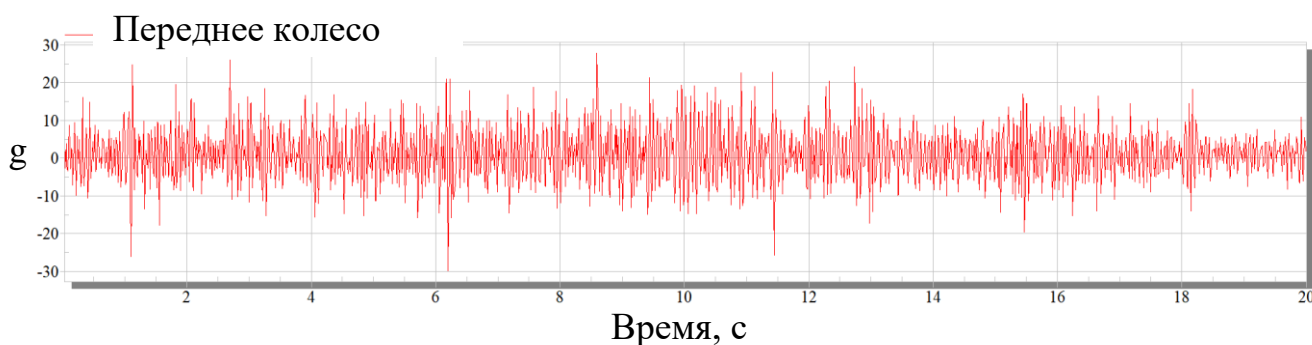


Рисунок 1 – Ускорения, записанные при движении по дороге «Булыжник ровного мощения»

Перед проведением анализа записанных сигналов была проведена оценка их стационарности, для чего были рассчитаны средние значения и среднеквадратичные отклонения отдельных участков сигнала. Записанные сигналы были определены стационарными, так как для полученных рядом отсутствовал тренд.

Для определения вертикальных перемещений колес мотоцикла записанные ускорения были дважды проинтегрированы (формула 1), для полученных данных были рассчитаны среднеквадратичные отклонения (формула 2).

$$S = \iint a(t) dt^2, \quad (1)$$

где  $S$  – перемещение колеса,  $a(t)$  – ускорение в момент времени.

$$\sigma_x = \sqrt{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (x(t) - \mu_x)^2 dt}, \quad (2)$$

где  $\sigma_x$  – среднее квадратичное отклонение,  $x(t)$  реализация,  $\mu_x$  – среднее значение,  $T$  – временной интервал

Требуемые вертикальные перемещения колес были рассчитаны по формуле 3.

$$\sigma_x = \frac{A_p}{\sqrt{2}}, \quad (3)$$

где  $\sigma_x$  – среднее квадратическое отклонение,  $A_p$  – амплитуда гармонического сигнала.

В результате, вертикальные перемещения колес мотоцикла должны быть не менее 20 мм, но необходимо иметь возможность оказывать большее перемещение колес, тем самым увеличивать воздействие на несущую конструкцию мотоцикла, за счет чего будет происходить форсирование испытаний.

Значимым фактором при проведении любого испытания является частотный диапазон, в котором оказывается нагружение. Для оценки частотных характеристик режимов нагружения в условиях полигона, записанные сигналы необходимо было перевести из временной области в частотную. Для этого использовалось преобразование Фурье (формула 4).

$$x(t) = \sum_{n=1}^{\infty} X_n \sin(2\pi f_n t + \Theta_n), \quad (4)$$

где  $x(t)$  – значение функции в момент времени  $t$ ,  $\Theta_n$  – начальная фаза,  $X_n$  – амплитуда,  $f_n$  – циклическая частота.

Следующим шагом были рассчитаны спектральные плотности мощности записанных сигналов (формула 5).

$$\Psi_x^2[f, f + \Delta f] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t, f, \Delta f) dt, \quad (5)$$

где  $x(t, f, \Delta f) dt$  – составляющие функции  $x(t)$ , имеющие частоты в интервале от  $f$  до  $f + \Delta f$ .

На рисунке 2 представлен результат расчета спектров ускорений, возникающих на неподрессоренных массах мотоцикла при движении по дороге полигона «Бельгийская мостовая».

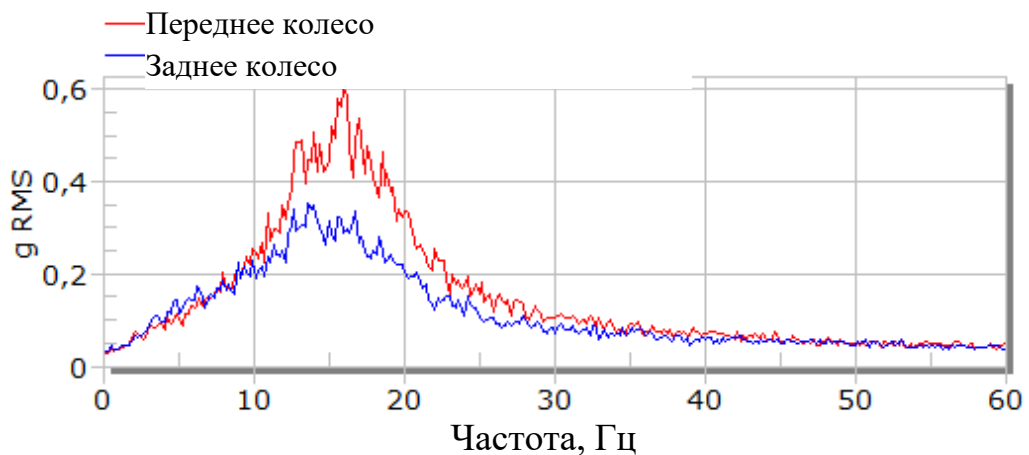


Рисунок 2 – Спектры ускорений неподрессоренных масс мотоцикла при движении по дороге «Бельгийская мостовая»

По результатам анализа было сделан вывод о том, что сигналы являются почти периодическими, так как в них присутствуют гармонические составляющие, определяемые собственными частотами неподрессоренных масс. Нагружение на стенде должно оказываться в диапазоне от 10 до 30 Гц, в таком случае условия проведения испытаний будут наиболее близки к реальной эксплуатации. На основании полученных данных и проведенном анализе аналогичных стендов были сформированы требования к проектируемому стенду, которые представлены в таблице 1. При разработке стенда важно спроектировать систему удержания таким образом, чтобы она вносила незначительные ограничения на перемещения мотоцикла, иначе условия проведения испытаний будут отличными от реальной эксплуатации.

**В третьей главе** диссертации описаны процессы разработки стенда и проведения эксперимента, по результатам которого были определены факторы, которые напрямую влияют на уровень нагружения несущей конструкции мотоцикла.

Таблица 1 – Технические требования к проектируемому стенду

Наименование характеристики, единицы измерений	Значение характеристики
Линейная скорость на поверхности бегового барабана, км/ч	1...90
Минимальная колесная база испытуемого транспортного средства, мм	1100
Минимальная колея испытуемого транспортного средства, мм	500
Полная масса мотоцикла в одиночном исполнении, кг	580
Полная масса мотоцикла в исполнении с боковым прицепом, кг	660

На основании измеренных перемещений колес мотоцикла при движении по дорогам была определена требуемая высота проектируемых неровностей, для обеспечения различного уровня нагружения были спроектированы неровности высотой 20 мм, 30 мм и 50 мм. Дополнительно для обеспечения бокового воздействия в пятне контакт были спроектированы косые неровности с углом относительно продольной оси 15, 30 и 45 градусов высотой 20 мм. Максимальный угол 45 градусов был выбран таким образом, чтобы при наезде колеса на неровность оказывалось максимальное нагружение в продольном и поперечном направлениях, но мотоцикл не терял устойчивость и не съезжал с бегового барабана. Общий вид неровностей представлен на рисунке 3.

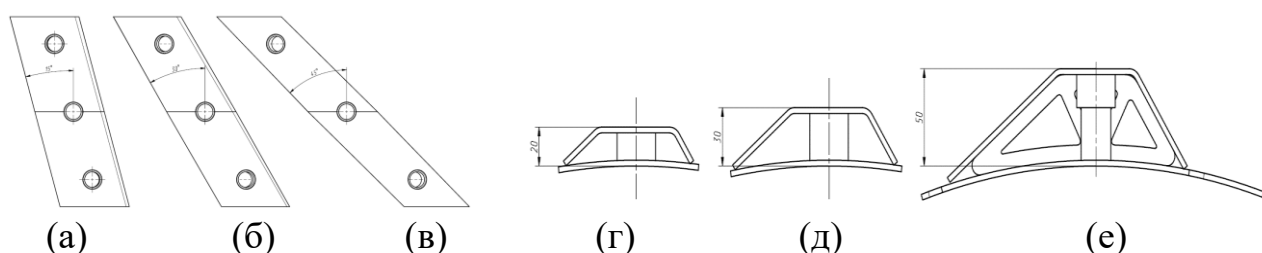


Рисунок 3 – Набор единичных неровностей (а – косая неровность с углом установки 15 градусов, б – косая неровность с углом установки 30 градусов, в – косая неровность с углом установки 45 градусов, г – прямая неровность высотой 20 мм, д – прямая неровность высотой 30 мм, е – прямая неровность высотой 50 мм)

Было решено использовать модульную конструкцию стенда, в которой каждый беговой барабан закреплен на своей индивидуальной раме и имеет независимые привод и управление. Предложенная конструкция стенда позволила устанавливать их в различных положениях и настраивать стенд под различные колесные базы и колеи транспортных средств. Помимо основной части стенда была спроектирована система удержания и балластирования объекта испытания на стенде. Внешний вид стенда и виртуальная модель, созданная в среде моделирования Siemens NX представлена на рисунке 4.

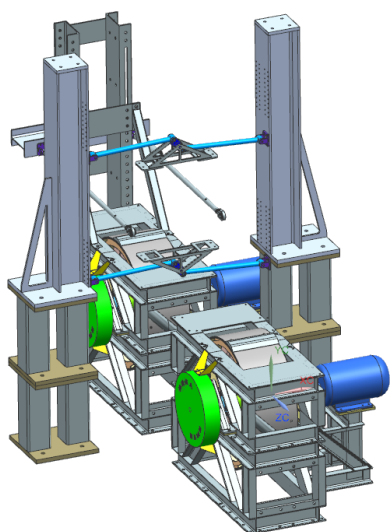


Рисунок 4 – Виртуальная модель и внешний вид стенда с беговыми барабанами

Основными задачами, которые необходимо было решить перед разработкой методики испытаний и проведением испытаний мотоцикла на созданном стенде, были связаны с определением факторов, которые будут оказывать влияние на уровень нагруженности несущей конструкции мотоцикла. К таким параметрам будут относиться: высота неровности, количество неровностей, установленных на беговой барабан, направление установки неровности (резкий или плавный наезд) и частота вращения самих беговых барабанов.

Для решения поставленной задачи необходимо было составить функцию отклика, которая связывала бы параметры оптимизации с факторами. Проводимый эксперимент можно классифицировать как интерполяционным, так как по результатам не требуется провести оптимизацию эксперимента, необходимо оценить количественную связь между факторами и выходным параметром. В свою очередь, проводимый эксперимент можно классифицировать, как однофакторный, так как при этом изменяться будет только один параметр. Тогда эксперимент может быть представлен в виде математической модели, связывающая уровень нагружения  $Y$  и факторы  $X$ :

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, X_4), \quad (6)$$

где  $X_1$  – высота установленной неровности,  $X_2$  – направление установки неровности,  $X_3$  – количество неровностей, установленных на беговой барабан,  $X_4$  – частота вращения бегового барабана.

Анализ проводился на основании записанных вертикальных ускорений, возникающий на неподдрессоренных массах мотоцикла. Результаты эксперимента приведены в таблице 2.

По результатам анализа измеренных пиковых и среднеквадратических значений был сделан ряд выводов:

1. Кривизна поверхности неровности, по которой колесо заезжает на неё, не оказывает влияния на пиковое значение ускорений, возникающих на несущей конструкции мотоцикла. Этот фактор не является значимым, что позволяет не учитывать его при формировании режима испытания.

Таблица 2 – Вертикальные ускорения, возникающие на неподрессоренных массах при наезде на прямые неровности

Неровность	Прямая 20 мм					Прямая 30 мм				
	Скорость, км/ч					Скорость, км/ч				
Параметр	11	22	43	65	87	11	22	43	65	87
Ускорение на переднем колесе, g										
Макс	6,0	8,3	8,0	8,1	8,4	7,9	12,0	14,4	14,7	-
Мин	-5,6	-11,8	-11,3	-8,7	-7,8	-6,6	-14,7	-15,5	-15,2	-
СКЗ	1,2	2,9	3,3	3,3	3,2	1,5	4,1	5,6	5,8	-
Ускорение на заднем колесе, g										
Макс	2,3	6,1	10,1	11,6	13,2	3,9	9,6	15,5	20,3	-
Мин	-5,1	-13,9	-13,4	-9,7	-10,2	-7,4	-17,4	-15,7	-15,9	-
СКЗ	0,5	2,3	3,2	3,3	3,7	1,2	3,1	4,4	5,2	-

2. Высота неровности оказывает влияние на пиковые значения ускорений, которые возникают на элементах несущей конструкции – большая высота неровности позволяет реализовать большие вертикальные ускорения. В рамках проведенного эксперимента максимальная высота неровностей была ограничена 20 мм, так как при наезде на более высокую неровность происходили «пробои» подвески, что является не эксплуатационными нагрузками, проводить испытания в таких условиях нецелесообразно.

3. Скорость вращения беговых барабанов влияет на величину ускорений (рисунок 5). При увеличении частоты вращения СКЗ ускорений сначала возрастают, а при достижении определенных скоростей (более 40 км/ч), пиковые значения ускорений уменьшаются, а СКЗ не увеличивается, что связано с тем, что колесо не успевает вернуться в свое первоначальное положение. Данная скорость будет зависеть от упругих характеристик подвески, демпфирующих характеристик амортизаторов, неподрессоренной массы и других параметров, которые являются характеристиками конкретного объекта испытания.

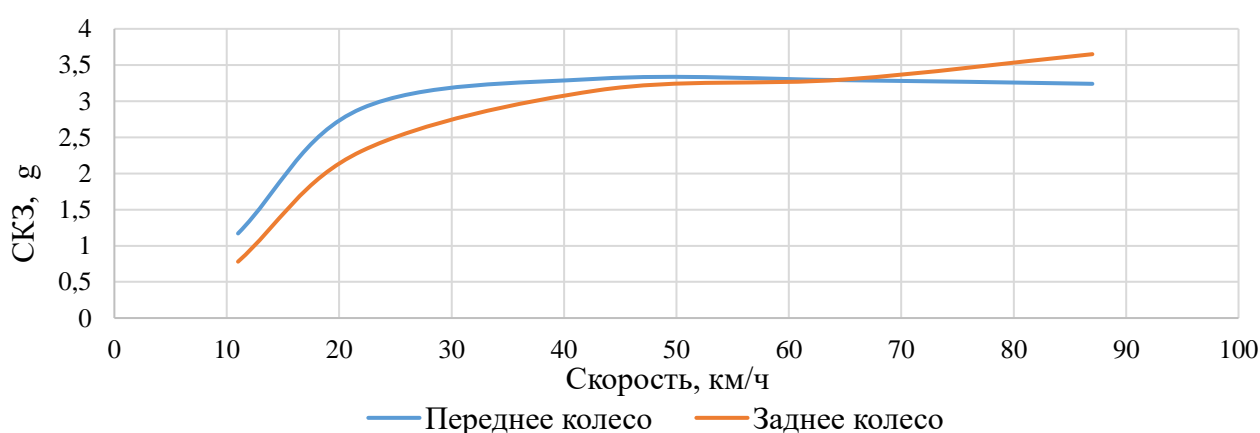


Рисунок 5 – СКЗ ускорений, возникающих на неподрессоренных массах при наезде на прямую неровность высотой 20 мм

4. Количество неровностей также оказывает влияние на величину достигаемых ускорений, при увеличении числа установленных неровностей на

поверхность бегового барабана, достигаются большие пиковые значения вертикальных ускорений.

5. Для косых неровностей была проведена оценка боковых ускорений при наезде на них при различных частотах вращения. Было подтверждено, что косые неровности с углом установки 45 градусов создают большие ускорения в поперечном направлении. Вертикальные ускорения, возникающие на переднем колесе мотоцикла при наезде на различные косые неровности, представлены на рисунке 6.

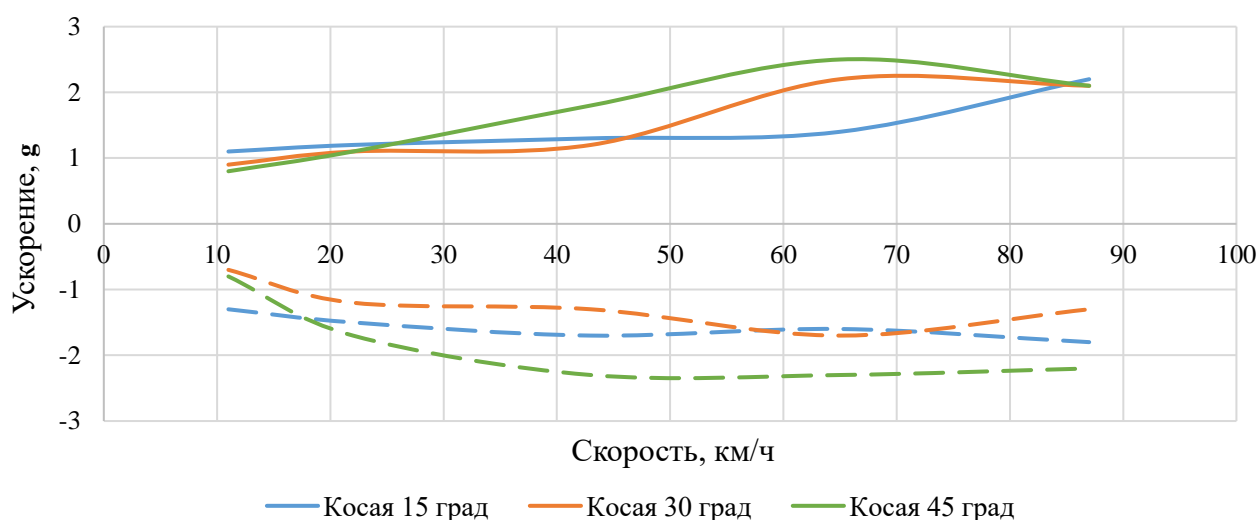


Рисунок 6 – Боковые ускорения, возникающие на переднем колесе мотоцикла при наезде на различные косые неровности (сплошной линией обозначены максимальные значения, пунктирной минимальные)

**В четвертой главе** диссертации описывается методика проведения испытаний мототехники на усталостную долговечность на стенде с беговыми барабанами.

На основании результатов проведенного эксперимента был сделан вывод, что для проведения испытаний различных объектов необходимо проводить процесс идентификации, при котором определяются динамические отклики на несущей системе объекта испытаний. Процесс идентификации состоит из последовательной установки каждой неровности на беговой барабан и регистрации нагрузок, возникающих на несущей конструкции объекта испытаний. Для оценки могут использоваться механические напряжения, измеренные на поверхностях деталей несущей конструкции, перемещения колес и другие параметры. В данной работе анализ проводился на основании вертикальных ускорений, возникающих на неподрессоренных и поддрессоренных массах мотоцикла, при вращении бегового барабана в диапазоне скоростей от минимальной до максимальной (от 10 до 110 км/ч), который представлен на рисунке 7. Максимальная скорость выбрана с запасом, учитывая условия, что дорожные испытания транспортных средств на усталостную долговечность проводятся при скоростях до 60 км/ч.

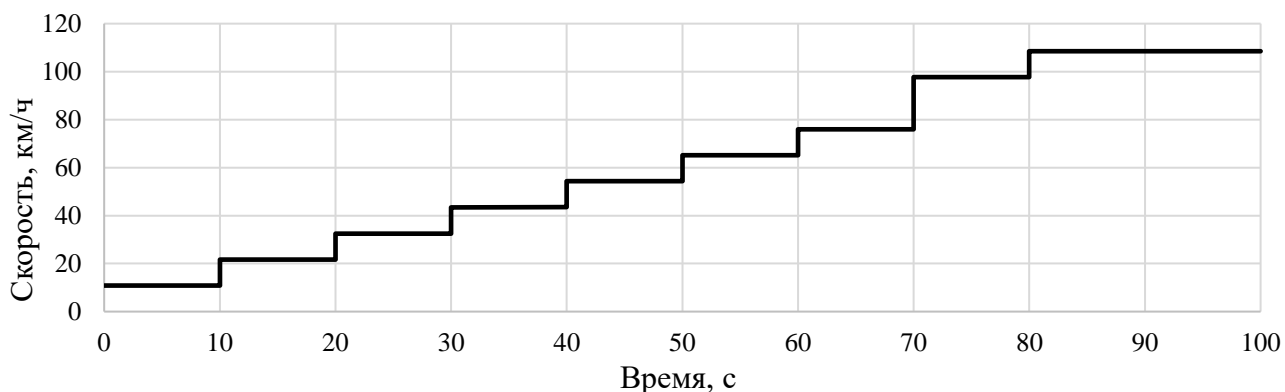


Рисунок 7 – Режим изменения частоты вращения бегового барабана при проведении идентификации объекта испытания

На основании проведенного процесса идентификации был сформирован режим испытаний. При его создании анализировались пиковые значения ускорений, возникающих на подрессоренных и непрорессоренных массах мотоцикла, так как необходимо было обеспечить максимальное воздействие при испытаниях на стенде. Частота вращения беговых барабанов была определена таким образом, чтобы оказать максимальное воздействие на несущую конструкции в широком диапазоне частот (низкочастотное и высокочастотное нагружение), это приблизило условия проведения испытаний к реальным. Был разработан режим нагружения (черная кривая, рисунок 8), который можно назвать «кусочно-линейная экспоненциальная развёртка». В непрерывном виде режим может быть описан формулой 7 и представлен в виде экспоненты (красная кривая, рисунок 8).

$$V = V_0 \times e^{k^{-1} \times t}, \quad (7)$$

где  $V$  – скорость вращения бегового барабана в момент времени  $t$ ,  $t$  – время, для которого вычисляется значение скорости,  $V_0$  – начальная скорость,  $e$  – константа, равная 2,718,  $k$  – константа, влияющая на скорость изменения скорости вращения,  $k \approx 22,2717$ .

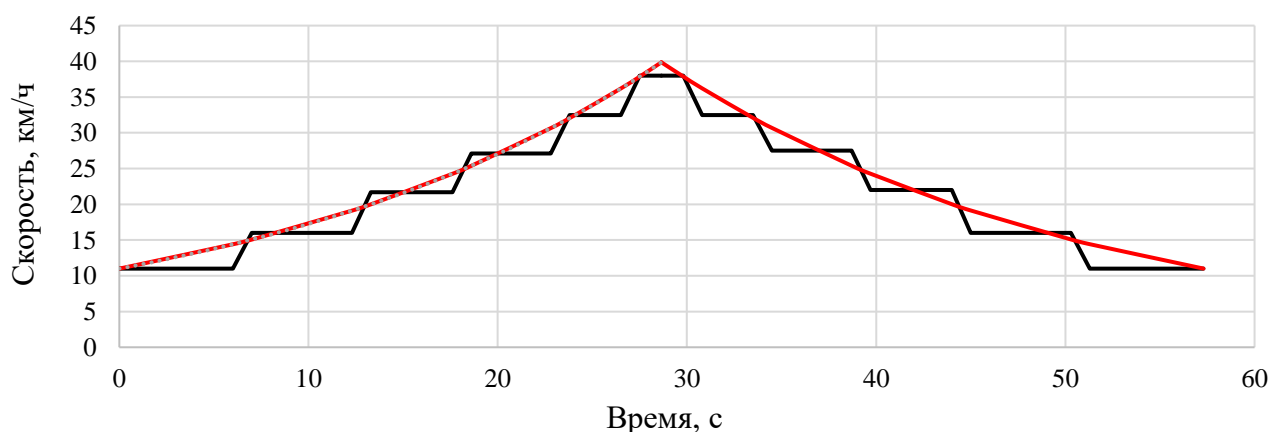


Рисунок 8 – Режим нагружения на стенде

Следующим этапом проводилось сопоставление накопленных повреждений при испытании разработанным режимом и при движении по дорогам полигона НИЦИАМТ, которые используются при проведении ресурсных испытаний

мотоциклов. Для оптимизации проведения расчетов, записанные ускорения с дорог полигона и режима нагружения на стенде, были соединены в последовательности. Запись нагрузок со стенда состояла из 10 повторений, а записи с дорог полигона («Шумосоздающая дорога», «Булыжник ровного мощения», «Бельгийская мостовая») были соединены в одну запись. В итоге длительность записи с дорог полигона составила 256 с, а режима на стенде – 378 с.

Полученные временные истории были обработаны с помощью метода схематизации случайных процессов, а именно «пересечения уровней» согласно ГОСТ 25.101-89. Результаты схематизации ускорений, возникающих на неподрессоренных массах представлены на рисунке 9.

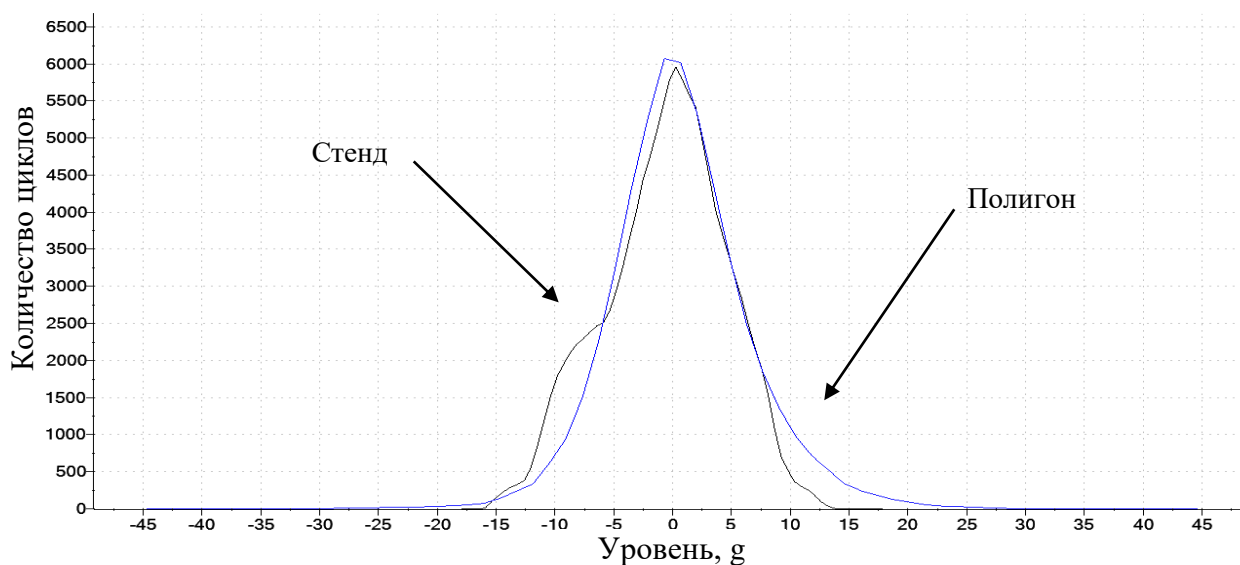


Рисунок 9 – Результат схематизации ускорений, возникающих на переднем колесе мотоцикла при испытании на стенде и движении по дорогам полигона

Для сравнения полученных распределений были рассчитаны площади под кривыми по формуле 8, где  $S_{\text{полигон}}$  – площадь под кривой, рассчитанной для сигналов с полигона,  $S_{\text{стенд}}$  – площадь под кривой, рассчитанной для сигналов со стенда.

$$c_2 = \frac{S_{\text{полигон}}}{S_{\text{стенд}}}. \quad (8)$$

Приемлемым считается значение коэффициента, лежащее в диапазоне от 0,65 до 1,3. В результате рассчитанное отношение площадей для кривых для неподрессоренных масс не превышала 25%, на основании чего был сделан вывод о аналогичном амплитудном составе сравниваемых сигналов.

Для оценки накопленных усталостных повреждений несущей конструкции мотоцикла и для последующего перехода от стендовых испытаний к дорожным, было решено рассчитать величины накопленных псевдоповреждений для каждого сигнала на полигоне и стенде (формула 9). Термин псевдоповреждения означает, что расчет накопленных повреждений проводится на основании кривой псевдоусталости, заданной для всей несущей конструкции, а не для конкретной детали. Результаты расчётов представлены в таблице 3.

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i}, \quad (9)$$

где  $n_i$  – число циклов при амплитуде напряжений  $S_i$ ,  $N_i$  – число циклов до разрушения при амплитуде напряжений  $S_i$ .

Таблица 3 – Расчет накопления псевдоповреждений для различных режимов испытаний

Режим	Переднее колесо	Заднее колесо	Передняя часть рамы	Задняя часть рамы
Стенд	$0,85 \times 10^{-17}$	$1,34 \times 10^{-18}$	$1,08 \times 10^{-21}$	$1,42 \times 10^{-21}$
Полигон	$2,31 \times 10^{-17}$	$7,04 \times 10^{-18}$	$9,16 \times 10^{-21}$	$7,04 \times 10^{-21}$
Отношение (стенд/полигон)	0,37	0,19	0,12	0,20

В результате было определено, что уровень нагружения на стенде несколько ниже по сравнению с полигонными испытаниями, что отразилось на длительности испытаний. Но процесс накопления повреждений более плавный, что позволяет обнаружить начало роста усталостных трещин и других отказов. В итоге было рассчитано, что 1 час испытаний на стенде с беговыми барабанами эквивалентен 4 км пробега по описанной последовательности из дорог полигона. Проведение испытаний в условиях стенда, в отличие от полигона, можно организовать в круглосуточном режиме, без выходных и независимо от погодных условий, что в итоге компенсирует увеличение их длительности. Для другого исходного эквивалентного набора дорог, к которым приводится режим испытания на стенде, соотношение будет другим и необходимо повторить расчет согласно разработанной методике.

По результатам работы была сформирована методика проведения испытаний элементов несущей конструкции мототехники на стенде беговыми барабанами (рисунок 10). Методика включает в себя этапы подготовки к испытаниям, которые описывают задание эквивалентных дорог и режимов испытания, определение состава объекта испытания. При проведении испытаний комплектного мотоцикла рекомендуется проводить его режимометрирование. После подготовительных этапов проводится процесс идентификации объекта испытания, в рамках которого определяются тип (высота или угол установки) неровностей, которые устанавливаются на беговой барабан, и скорости вращения беговых барабанов. После определения типа неровностей и скоростей вращения разрабатывается режим испытаний. Оценка нагруженности несущей конструкции может проводиться на основании виброускорений, возникающих на подпрессоренных массах, механических напряжениях, возникающих на поверхностях деталей несущей конструкции объекта испытания. В случае проведения стендовых испытаний, эквивалентных дорожным, необходимо определить перечень дорог, в ином случае режим может быть разработан на основании нагрузок, возникающих в элементах несущей конструкции, а длительность испытаний будет рассчитываться на основании прочностных характеристик деталей.



Рисунок 10 – Алгоритм выполнения испытаний несущей конструкции мототехники на стэнде с беговыми барабанами на усталостную долговечность согласно разработанной методике

Для обеспечения накопления повреждаемости эквивалентной дорожному воздействию, необходимо, чтобы по каждому каналу, относящемуся к неподрессоренным массам, отношение величин, рассчитанных накопленных псевдопровеждений, находилось в диапазоне  $0,7 \dots 1,3$ . Это требование возможно представить в виде системы уравнений (10), где количество уравнений определяется каналами измерения, по которым проводится сопоставление. В качестве сравниваемых параметров могут рассматриваться ускорения, механические напряжения, усилия, деформации и перемещения, возникающие на несущей конструкции.

$$\begin{cases} N_1 = \frac{d_{11}}{d_{12}}; \\ N_2 = \frac{d_{21}}{d_{22}}, \text{ где } 0,7 < N_n < 1,3, \\ \dots \\ N_n = \frac{d_{n1}}{d_{n2}}, \end{cases} \quad (10)$$

где  $d_{n1}$  – накопленные псевдоповреждения на стэнде,  $d_{n2}$  – накопленные повреждения при эквивалентном нагружении (на полигоне, дорогах общего пользования и другие),  $N_n$  – отношение накопленных повреждений по отдельным каналам на стэнде и при эквивалентном нагружении.

В заключении методика описывает процесс проведения испытаний, который определяет периодичность наблюдения за объектом испытаний и классификацию возникающих отказов.

В пятой главе диссертации описывается процесс проведения испытаний согласно разработанной методике. В качестве первого объекта испытаний был выбран мотоцикл BMW K1600GTL. База испытаний была определена наработкой, при которой наступит критический отказ одного из элементов несущей

конструкции. Критическим отказом считается усталостная трещина рамы мотоцикла, разрушение упругих элементов подвесок и элементов направляющего аппарата подвесок мотоцикла.

На протяжении всего процесса испытаний отмечались места вредных контактов пластиковых облицовочных панелей мотоцикла, а также разрушение кронштейнов приборной панели. На основании наблюдений был сделан вывод о том, что облицовочные панели также могут, в свою очередь, являться объектами испытаний на разработанном стенде.

На 173 часе испытаний произошло разрушение крепежных отверстий передней части рамы, на которой закрепляются приборная панель, передняя фара и передние облицовочные панели. Места разрушения представлены на рисунке 11.



Рисунок 11 – Разрушенные места крепления передней части рамы

Критический отказ наступил на 303 часе испытаний, когда произошло разрушение мест крепления задней части рамы к основной. Нарботка стенда соответствовала 1212 км пробега по описанной ранее последовательности дорог полигона. Поэтому было решено завершить испытания и определить базу испытаний для следующих сравнительных испытаний в 300 часов.

Следующим объектом испытания был проектируемый во ФГУП «НАМИ» мотоцикл Augus Merlon категории L3. На мотоцикле были установлены датчики ускорения на подрессоренных и неподрессоренных массах, точки установки датчиков выбирались наиболее близкими к тем, которые использовались при режимометрировании и испытаниях мотоцикла-аналога. Для данного объекта испытаний был также проведен процесс идентификации.

Во время испытаний на облицовочных панелях мотоцикла были также замечены вредные контакты. На 175 часе испытания произошло разрушение передней дополнительной рамы (рисунок 12). Следует отметить, что при испытаниях мотоцикла BMW аналогичная часть рамы разрушилась на 173 часе, несмотря на совершенно различные конструкции двух узлов.

На 147 часе испытаний произошло разрушение кронштейна радиатора охлаждения. При сравнении разрушении аналогичных кронштейнов при проведении виброиспытаний, было определено, что характер и месторасположение усталостных трещин были схожи, что подтверждает корректность условий нагружения на барабанном стенде.

На протяжении всего испытания произошло 11 выходов из строя амортизаторов подвески мотоцикла. На протяжении всех испытаний проводилась работа совместно с поставщиком амортизаторов. В результате корректирующих

мер, наработка на отказ амортизаторов при испытаниях на стенде с беговыми барабанами была повышена.

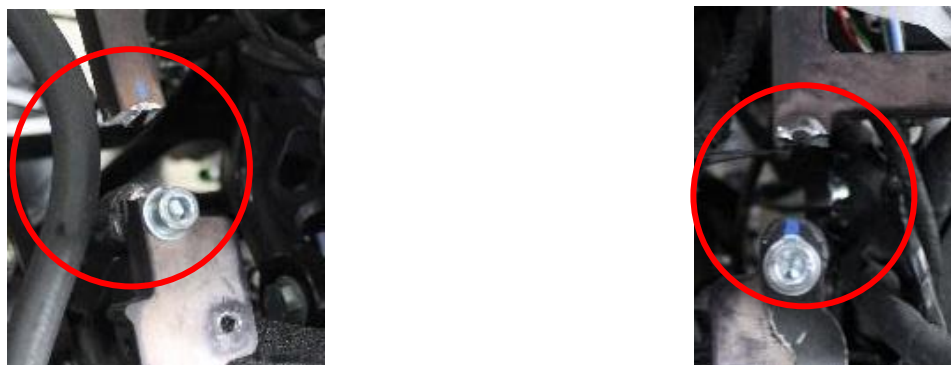


Рисунок 12 – Разрушение передней части рамы мотоцикла

В результате испытания целевая наработка мотоцикла в 300 часов была достигнута. Для определения запаса было решено увеличить базу испытаний до 400 часов, которая также была достигнута. По результатам испытаний внесены незначительные изменения в несущую конструкцию мотоцикла и доработаны места крепления облицовочных панелей.

В заключении цикла сравнительных испытаний мотоциклов проводились испытания мотоцикла Augus Merlon категории L4 (с боковым прицепом), внешний вид мотоцикла, установленного на стенде представлен на рисунке 13. Для данного объекта испытаний процесс идентификации также проводился.



Рисунок 13 – Мотоцикл Augus Merlon категории L4, установленный на стенд

Во время проведения испытаний мотоцикла с боковым прицепом были выявлены недостатки конструкции крепления декоративных панелей бокового прицепа. Были также замечены места вредных контактов облицовочных панелей, а также произошло разрушение кронштейнов заднего фонаря мотоцикла.

На 182 часе испытаний произошло разрушение рамы бокового прицепа и шарового пальца крепления бокового прицепа. Внешний вид места разрушения рамы бокового прицепа представлен на рисунке 14.



Рисунок 14 – Место разрушения рамы бокового прицепа

Для определения причины разрушения места крепления бокового прицепа и его рамы было проведено сравнение результатов виртуальных испытаний рамы мотоцикла и разрушенного участка рамы. Проводить сравнения с реальными отказами при эксплуатации не представляется возможным, так как при пробеговых испытаниях не были достигнуты сопоставимые наработки. Для сравнения были выбраны режимы виртуальных испытаний, имитирующие наезд колеса бокового прицепа на кирпич (рисунок 15 А) и лежащий полицейский (рисунок 15 Б), так как эти условия наиболее близки к режиму нагружения на стенде.

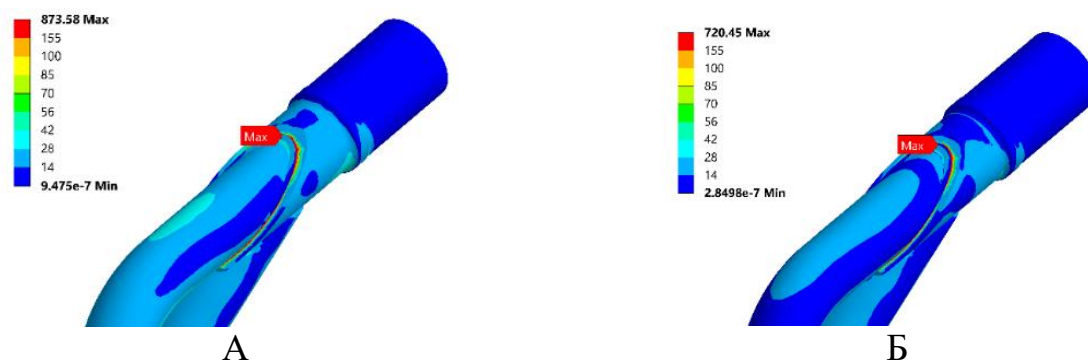


Рисунок 15 – Напряжения, возникающие в узле крепления рамы бокового прицепа, при виртуальных испытаниях

Проводя сравнительную оценку места разрушения участка рамы по результатам виртуальных расчетов и натурных испытаний, было отмечено сходство их расположения. Точка возникновения усталостной трещины расположена в области, соответствующей напряжениям, при которых наступают пластические деформации при виртуальных испытаниях. Схожесть результатов виртуальных и натурных испытаний позволяет сделать вывод о том, что характер нагружения на стенде совпадает с моделируемыми условиями нагружения, которые, в свою очередь, базируются на реальной эксплуатации. По результатам проведенных испытаний в несущую конструкции мотоцикла были внесены изменения, которые были подтверждены при последующих испытаниях.

### Основные результаты и выводы по работе

1. Проведен анализ методик и стендов для проведения испытаний несущей конструкции мотоцикла и её элементов на усталостную долговечность, который показал, что для проведения испытаний необходимо использовать барабанный стенд.

2. Проведено исследование нагруженности несущей конструкции мотоцикла в условиях полигонных испытаний, на основании которого определены условия проведения стендовых испытаний. В свою очередь, требуемые вертикальные перемещения колес мотоцикла должны составлять не менее 20 мм, нагружение должно осуществляться в частотном диапазоне от 10 до 30 Гц, скорость вращения барабанов должна составлять не более 60 км/ч. При проведении испытаний на стенде необходимо иметь возможность изменять указанные параметры, за счет чего может осуществляться форсирование испытаний.

3. Разработана конструкция стенда с беговыми барабанами для испытаний несущей конструкции мотоцикла и её элементов на усталостную долговечность.

Модульная конструкция стенда, ранее не применяемая для таких стендов, позволила приспособить стенд для испытаний различных мотоциклов, включая мотоцикл с боковым прицепом. Также была спроектирована система удержания мотоцикла, которая оказывает минимальное воздействие на объект испытаний, что приближает условия стендовых испытаний к реальным. Изготовленный набор единичных прямых неровностей (20, 30 и 50 мм) позволяет обеспечить требуемые вертикальные перемещения колес мотоцикла и при необходимости их увеличить. За счет установки косых неровностей оказывается нагружение в боковом направлении, а различные углы установки (15, 30 и 45 градусов) позволяют варьировать нагружение.

4. Разработан способ и проведена оценка влияния варьируемых параметров на уровень нагруженности несущей конструкции и определено, что основное влияние оказывают высота неровности, скорости вращения бегового барабана, а также количество установленных неровностей. В свою очередь, косые неровности с большим углом установки позволяют достичь больших значений ускорений в боковом направлении. При увеличении частоты вращения СКЗ вертикальных ускорений сначала возрастают, а при достижении определённых скоростей (для данного объекта испытаний более 40 км/ч) пиковые значения ускорений уменьшаются, а СКЗ не увеличивается. В результате разработан процесс идентификации, позволяющий определить параметры (скорость вращения барабанов, тип и количество используемых неровностей) режима нагружения на созданном стенде. На основании измеренных динамических откликов также возможно проведение валидации расчетной модели.

5. Разработана новая методика испытаний несущей конструкции мототехники на стенде с беговыми барабанами на усталостную долговечность. Методика состоит из следующих основных этапов: подготовка объекта испытаний; режимометрирование; проведение процесса идентификации объекта испытаний; формирование режима нагружения; сравнение и оценка нагруженности несущей конструкции при испытаниях на стенде и при дорожных испытаниях; задание цикла испытания и определение его длительности на основании расчета псевдоповреждаемости; проведение испытаний с формированием протокола. Разработанная методика позволяет проводить испытания с уровнем нагружения, эквивалентным дорожному или полигонному. На основании разработанного процесса идентификации разработан режим нагружения, имеющий форму «кусочно-линейной экспоненциальной развёртки», определена скорость, высота и количество неровностей. При таком режиме, нагружение осуществляется в более широком диапазоне частот и амплитуд ускорений, в отличие от испытаний при постоянной скорости. Разработка режима нагружения индивидуально для каждого объекта испытаний позволяет приблизить условия к реальной эксплуатации, а испытание разных объектов одним режимом – обеспечить сравнительную оценку между ними.

6. Проведена расчетная оценка нагруженности мотоцикла на стенде и разработан метод перехода от нагруженности несущей конструкции при дорожных испытаниях на полигоне к эквивалентным стендовым на основании схематизации случайных процессов и расчета накопленной псевдоповреждаемости. Таким

образом, наработка мотоцикла на стенде в 303 часа соответствовал пробегу 1212 км по заданным дорогам полигона. По результатам формируется цикл испытаний на стенде с эквивалентным накоплением псевдоповреждаемости дорожным испытаниям.

7. Проведены испытания мотоциклов категорий L3 и L4: BMW 1600 GTL, Aurus Merlon в одиночном исполнении (версия L3) и с боковым прицепом (версия L4). По результатам сравнительного анализа испытаний на стенде с беговыми барабанами с виртуальными и виброиспытаниями по характеру полученных повреждений и выявленных зон риска был сделан вывод о том, что нагружение на стенде сопоставимо с эксплуатационным и позволяет совместно с испытаниями несущей конструкции также проводить испытания элементов экстерьера и других систем мотоцикла. По результатам испытаний были внесены изменения в элементы несущей конструкции мотоцикла.

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:**

1. Кузьмин А.О., Мещеряков Д.Е., Эйдельман А.Л. Стенды для испытаний несущей конструкции и подвесок мотоцикла. Ресурсные испытания мотоциклов и их компонентов. // Известия МГТУ «МАМИ». 2022. Том 16, № 4. С. 337–343. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-108958/>. **Издание входит в перечень ВАК РФ.**

2. Кузьмин А.О., Мещеряков Д.Е. Создание стенда с беговыми барабанами для испытания мототехники на усталостную прочность. Труды НАМИ. 2024;(2):66-77. <https://doi.org/10.51187/0135-3152-2024-2-66-77>. **Издание входит в перечень ВАК РФ.**

3. Кузьмин А.О., Мещеряков Д.Е. Определение динамического отклика объекта испытаний на стенде с беговыми барабанами для последующего моделирования нагрузок. Труды НАМИ. 2025;(2):82-90. EDN: QNBZBT. **Издание входит в перечень ВАК РФ.**

4. Стендовые испытания элеткромотоцикла «Аурус Мерлон» в НАМИ / Д.Е. Мещеряков, А.Л. Эйдельман, Р.М. Кулешов [и др.] // Автомобильная промышленность. – 2025. – № 9. – С. 19-26. – EDN QDGFWS.

5. Кузьмин А.О. Инновационные направления испытаний отдельных агрегатов мототехники // Перспективы инновационного развития в агротехнических и энергетических системах: материалы Международной научно-практической конференции (20 ноября 2024 г., Москва) – М.: Издательство: Российский государственный университет народного хозяйства им. В.И. Вернадского, 2024. – С. 25-30.

6. Кузьмин А.О. Методика проведения испытаний одноколейных наземных транспортных средств // Наука и культура: поиски и открытия: материалы XVIII Международной научно-практической конференции, Балашиха, 05 ноября 2024 года. – Балашиха: ФГБОУ ВО Министерства сельского хозяйства Российской Федерации «Российский государственный университет народного хозяйства им. В.И. Вернадского», 2024. – С. 200-202.

7. Кузьмин А.О. Особенности проведения стендовых испытаний // Инновационный потенциал развития науки в современном мире: технологии, инновации, достижения: сборник научных статей по материалам XVI Международной научно-практической конференции (22 ноября 2024 г., г. Уфа). – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр «Вестник науки», 2024. – С. 125-132.

8. Кузьмин А.О. Основы проведения дорожных и стендовых испытаний авто и мототехники // Fundamental and applied approaches to solving scientific problems: сборник научных статей по материалам XVI Международной научно-практической конференции (3 декабря 2024 г., г. Уфа); в 3 ч., Ч. 1. – Уфа: Научно-издательский центр Вестник науки, 2024. – С. 85-90.

9. Кузьмин А.О. Особенности проведения испытаний мототехники на стендах с беговыми барабанами // Современные проблемы энергоэффективности агроинженерных исследований в условиях цифровой трансформации: материалы Международной научно-практической конференции (20 мая 2025 г., Москва) – М.: Издательство: Российский государственный университет народного хозяйства им. В.И. Вернадского, 2025. – С. 85-89.

Подписано в печать 28 апреля 2026 г.

Бумага офсетная

Формат 60x84 1/16

Печ. л. 1,5

Офсетная печать

Тираж 100 экз.

Заказ №

---

Отпечатано в типографии ФГБНУ ФНЦ ВНИИЭСХ с оригинал-макета  
123007, г. Москва, Хорошевское шоссе, дом 35, корп. 2.