

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»

ТРУДЫ НГТУ

им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

Журнал издается с 2010 года

№ 3 (154)

Нижний Новгород 2026

УДК 050(06)
ББК 9я54
Т 78

Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2026. № 3 (154). – 130 с.

Выходит 4 раза в год

Журнал включен ВАК при Минобрнауки России

в «Перечень рецензируемых научных изданий», в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» по специальностям: 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки, физико-математические науки); 2.3.8 – Информатика и информационные процессы (технические науки); 2.4.9 – Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность (технические науки); 2.5.11 – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы (технические науки)

Главный редактор А.А. Куркин

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**Н.Ю. Бабанов, В.В. Беляков, В.А. Горбунов, С.М. Дмитриев,
Н.Ю. Золотых, М.А. Легчанов, В.С. Макаров, В.Р. Милов, Ю.И. Молев, В.Н. Наумов, П.В. Пакшин,
Н.А. Прибатурин, Н.В. Старостин, А.С. Суркова, В.П. Хранилов, А.Е. Хробостов**

В.П. Хранилов – ответственный секретарь рубрики
«Информатика, управление и системный анализ»

М.А. Легчанов – ответственный секретарь рубрики «Ядерная энергетика и атомное машиностроение»

Ю.И. Молев – ответственный секретарь рубрики
«Машиностроение и транспорт: теория, технологии, производство»

В.И. Казакова (ответственный редактор)
А.В. Крылова (ответственный секретарь)

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»
(603155, Нижегородская обл., г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24)

Электронная версия журнала:
<https://www.nntu.ru/content/nauka/zhurnal-trudy-ngtu-im-r-e-alekseeva>

Средство массовой информации
зарегистрировано Роскомнадзором:
ПИ № ФС 77-56417 от 11.12.2013

УДК 050(06)
ББК 9я54

© Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева, 2026

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE RUSSIAN FEDERATION
FEDERAL STATE BUDGETARY EDUCATIONAL INSTITUTION
OF HIGHER EDUCATION
NIZHNY NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY
n.a. R.E. ALEKSEEV

TRANSACTIONS
of NNSTU n.a. R.E. ALEKSEEV

Published since 2010

№ 3 (154)

Nizhny Novgorod 2026

The journal is issued 4 times a year

The journal is included in HAC Ministry of Education and Science

in the «List of peer-reviewed scientific publications where must be published basic scientific results of dissertations on competition of a scientific degree of Candidate of Science, on competition of a scientific degree of Doctor of Science» in specialties: 2.3.1 – System analysis, management and information processing; 2.3.8 – Informatics and informational processes; 2.4.9 – Nuclear installations, fuel cycle, radiation safety; 2.5.11 – Ground transportation and technological facilities and complexes

Editor-in-Chief A.A. Kurkin

EDITORIAL BOARD

Members of Editorial Board: N.Yu. Babanov, V.V. Belyakov, V.A. Gorbunov, S.M. Dmitriev, V.P. Khranilov, A.Ye. Khrobostov, M.A. Legchanov, V.S. Makarov, V.R. Milov, Yu.I. Molev, V.N. Naumov, P.V. Pakshin, N.A. Pribaturin, N.V. Starostin, A.S. Surkova, N.Yu. Zolotikh

V.P. Khranilov – Executive Secretary of the Section «Computer science, management and system analysis»

M.A. Legchanov – Executive Secretary of the Section «Nuclear power and atomic power engineering»

Yu.I. Molev – Executive Secretary of the Section «Mechanical Engineering and Transport»

V.I. Kazakova (Executive Editor)
A.V. Krylova (Executive Secretary)

EDITOR AND PUBLISHER:

federal state budgetary educational institution of higher education
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

*The certificate on registration of periodic printed editions:
III № ФС 77-56417 11.12.2013*

*Electronic version of the journal:
<https://www.nmtu.ru/content/nauka/zhurnal-trudy-ngtu-im-r-e-alekseeva>*

© Nizhny Novgorod State Technical University
n.a. R.E. Alekseev, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, УПРАВЛЕНИЕ И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ	7
Гусев М.Н. Разработка алгоритма оперативной обработки спутниковых и инерциальных навигационных данных с применением методов машинного обучения	7
Нетронин И.В. Распределение ресурсов при формировании объемно-календарных планов для предприятий с единичным и мелкосерийным характером производства	16
Сичкар В.Н., Муромцев Д.И. Поэтапное обучение для робастного обнаружения объектов в системах предиктивного мониторинга	24
ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ	34
Егорова Е.С., Семененко А.Н., Мельников В.И. Экспериментальное исследование и теоретический анализ ослабления пучка гамма-квантов, наклонно падающего на барьер	34
МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО	47
Веселов Н.Б. Повышение проходимости и экологичности транспортно-технологических машин	47
Дьяков Ф.К. Использование трехкомпонентного метода испытаний для исследования проблем блокировки радаров ADAS	67
Коростелев С.А., Молев М.Ю., Черевастов М.Г. Изменение требований к управляемости автомобиля как путь повышения безопасности дорожного движения	82
Мазунова Л.Н. Разработка методики оценки и повышения подвижности наземных транспортно-технологических средств на основе многокритериальной оценки качества	100
Наказной И.О., Наумов В.Н. Экспериментальное определение потерь в гусеничном движителе	117
НАШИ АВТОРЫ	126

CONTENTS

COMPUTER SCIENCE, MANAGEMENT AND SYSTEM ANALYSIS	7
Gusev M.N. Development of algorithm for real-time processing of satellite and inertial navigational data using machine learning methods	7
Netronin I.V. Resource allocation in formation of master production schedules for enterprises with single-unit and small-batch production	16
Sichkar V.N., Mouromtsev D.I. Curriculum learning for robust object detection in predictive monitoring systems	24
NUCLEAR POWER AND ATOMIC POWER ENGINEERING	34
Egorova E.S., Semenenko A.N., Melnikov V.I. Experimental investigation and theoretical analysis of attenuation of a gamma-ray beam obliquely incident on a barrier	34
MECHANICAL ENGINEERING AND TRANSPORT: THEORY, TECHNOLOGY, PRODUCTION	47
Veselov N.B. Improving the cross-country capability and environmental friendliness of transport and technological vehicles	47
Dyakov Ph.K. Investigation of ADAS radar blocking problem using a three-component test method	67
Korostelev S.A., Molev M.Yu., Cherevastov M.G. Changing vehicle handling requirements as a way to improve road safety	82
Mazunova L.N. Development of a technique for assessing and improving the mobility of land technological vehicles based on multicriterial quality assessment	100
Nakaznoy I.O., Naumov V.N. Experimental determination of losses in tracked propulsion	117
AUTHORS	126

ИНФОРМАТИКА, УПРАВЛЕНИЕ И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

УДК 269.7.537

EDN TXAJAT

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПЕРАТИВНОЙ ОБРАБОТКИ СПУТНИКОВЫХ И ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ ДАННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

М.Н. Гусев

ORCID: 0009-0005-6366-292X e-mail: 123456789080-5@bk.ru

Арзамасское научно-производственное предприятие «ТЕМП-АВИА»

Арзамас, Нижегородская область, Россия

Представлен алгоритм обработки навигационной информации, предназначенный для интеграции данных от инерциальных навигационных систем (ИНС) и глобальных навигационных спутниковых навигационных систем (СНС). Для всесторонней оценки эффективности разработанного алгоритма проведено комплексное исследование, включающее как статистический анализ, так и полунатурное моделирование на синтезированных данных. Итоги численных экспериментов продемонстрировали повышенную точность предложенного алгоритма для определения местоположения навигационного объекта в сравнении с традиционным методом, основанным на использовании расширенного фильтра Калмана. Зафиксировано снижение среднеквадратической ошибки определения положения в диапазоне 8.3-14 % в условиях длительного (до 100 сек) отказа сигнала от СНС, что критически важно для обеспечения надежной навигации в условиях помех. Работоспособность предложенного алгоритма подтверждена в ходе полунатурного моделирования на вычислителе, используемом в навигационных изделиях. Предложенный подход базируется на применении машины экстремального обучения (Extreme Learning Machine – ELM), что в перспективе позволит существенно улучшить определение навигационных параметров.

Ключевые слова: навигационные системы; инерциальная навигация; спутниковая навигация; машинное обучение; машины экстремального обучения (Extreme Learning Machine – ELM); расширенный фильтр Калмана.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гусев, М.Н. Разработка алгоритма оперативной обработки спутниковых и инерциальных навигационных данных с применением методов машинного обучения // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2026. № 3. С. 7-15. EDN: TXAJAT

DEVELOPMENT OF ALGORITHM FOR REAL-TIME PROCESSING OF SATELLITE AND INERTIAL NAVIGATIONAL DATA USING MACHINE LEARNING METHODS

M.N. Gusev

ORCID: 0009-0005-6366-292X e-mail: 123456789080-5@bk.ru

JSC «Arzamas Research and Production Enterprise «TEMP-AVIA»

Arzamas, Nizhny Novgorod region, Russia

Abstract. This paper presents an algorithm for processing navigation information designed to integrate data from inertial navigation systems (INS) and global navigation satellite systems (GNSS). A comprehensive investigation, including both statistical analysis and hardware-in-the-loop (HIL) simulation using synthesized data, was conducted to thoroughly evaluate the effectiveness of the developed algorithm. The numerical experiments demonstrate that the proposed algorithm achieves higher accuracy in determining the location of a navigation object compared to the traditional approach based on the extended Kalman filter (EKF). A reduction in root mean square error of position determination in the range of 8.3-14 % was recorded under prolonged (up to 100 sec) GNSS signal outages, which is critical for ensuring reliable navigation in interference conditions. The functionality of the developed algorithm was confirmed through HIL simulation on a computer used in navigation products. This work proposes approach based on the application of an Extreme Learning Machine (ELM), which promises to significantly improve the determination of navigational parameters.

Key words: navigation systems; inertial navigation; satellite navigation; machine learning; extreme learning machine; extended Kalman filter.

FOR CITATION: Gusev M.N. Development of algorithm for real-time processing of satellite and inertial navigational data using machine learning methods. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 3. Pp. 7-15. EDN: TXAJAT

Введение

Комплексная обработка навигационной информации, получаемой от инерциальных и спутниковых навигационных систем, обычно осуществляется с помощью расширенного фильтра Калмана (ЕКФ). Его эффективность обусловлена возможностью оперативной оценки ошибок инерциальных навигационных систем (ИНС), базирующейся на анализе расхождений с данными спутниковых навигационных систем (СНС) [1]. Однако корректная работа ЕКФ требует математической модели системы, создание которой не всегда представляется возможным, что ограничивает его применение. Недостаточная точность оценок ЕКФ в условиях нестабильного обмена с СНС привела к необходимости поиска альтернативных подходов к интеграции данных, в частности, к использованию методов на основе искусственного интеллекта (ИИ) [2-4]. В рамках данного исследования предложен алгоритм на основе машины экстремального обучения [5], задачей которого является оценка ошибок ИНС.

В общем виде данная задача (e) сводится к минимизации разницы между истинным значением ($x(k)$) в момент времени k и его оценки ($\hat{x}(k)$), которая была получена в результате комплексной обработки данных в тот же момент времени k :

$$e = x(k) - \hat{x}(k) \rightarrow 0$$

1. Алгоритм машины экстремального обучения

Машина экстремального обучения (Extreme Learning Machine – ELM) – метод построения нейронных сетей прямого распространения. Спектр задач, которые способны решить навигационные системы (НС) на данной основе, широк: разреженная аппроксимация, регрессия, кластеризация и др. Главное преимущество ELM заключается в простоте обучения: параметры скрытых слоев не требуют настройки и могут быть заданы случайным образом или унаследованы от предыдущих слоев. Обучение выходных весов происходит за один шаг, что значительно упрощает и ускоряет процесс [6].

На рис. 1 представлена архитектура используемой нейронной сети.

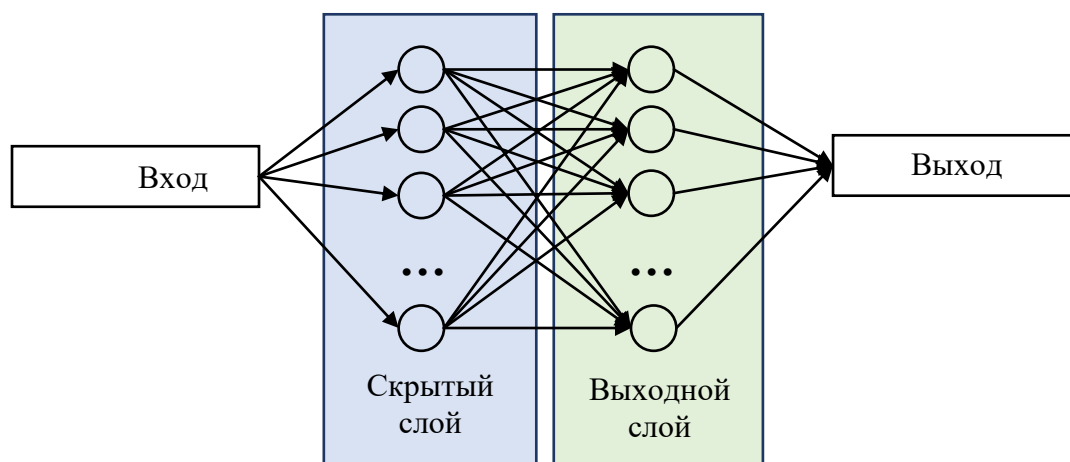


Рис. 1. Архитектура НС на основе ELM

Fig. 1. Architecture of the neural network based on ELM

Вид классического алгоритма обучения НС на основе ELM представлен ниже.

Алгоритм 1 ELM

Вход: $\Delta S_{m \times n}$ – набор обучающей информации, $\Delta X_{m \times p}$ – желаемый результат.

Выход: $Wout_{h+n \times p}$ – веса выходного слоя НС.

1. Вычисление отклика входного слоя $H_{m \times h} = F(\Delta S_{m \times n} \cdot Win_{n \times h})$;
2. При наличии функциональной зависимости ΔS от ΔX дополним матрицу $H_{m \times h+n} = [H_{m \times h} \Delta S_{m \times n}]$;
3. Находим псевдообратную матрицу $(H_{m \times h+n})^\dagger$;
4. Вычисляем веса выходного слоя $Wout_{h+n \times p} = (H_{m \times h+n})^\dagger \cdot \Delta X_{m \times p}$.

где n – количество входов НС; m – количество измерений одного обучающего окна; p – количество выходов НС; h – количество нейронов в скрытом слое НС; $F(\cdot)$ – сигмоидальная функция активации нелинейного слоя.

Использование всего массива входных данных ΔS при каждом шаге обучения приводит к значительной вычислительной нагрузке, особенно на этапах перемножения матриц и вычисления псевдообратной матрицы размером m . С ростом объема обучающей выборки (m) эта проблема становится критичной и может исключить возможность реализации алгоритма в режиме реального времени. Уменьшить затраты на вычисления накопительный режим обучения: обновление происходит лишь по факту формирования группы данных размером w . В данной работе для этих целей используется метод неперекрывающегося перемещаемого окна (рис. 2) [7]. Таким образом, коррекция весовых значений выходного блока производится по результатам обработки каждого отдельного временного отрезка.



Рис. 2. Схема обновления НС неперекрывающимся перемещаемым окном

Fig. 2. Scheme of neural network updating with a non-overlapping sliding window

Вычисление псевдообратной матрицы в уравнении может быть ресурсоемким и численно неустойчивым, что критично для выполнения в реальном времени. Для решения этой проблемы предложено свести задачу к стандартной задаче наименьших квадратов с использованием QR-факторизации [8]. Алгоритм реализован в виде следующей последовательности действий.

Алгоритм 2 ELM с QR-факторизацией

Вход: $\Delta S_{m \times n}$ – набор обучающей информации, $\Delta X_{m \times p}$ – желаемый результат.

Выход: $Wout_{h+n \times p}$ – веса выходного слоя НС.

При первом обучении алгоритм имеет следующий вид.

1. Заполнение буфера информации для обучения $\Delta S_{m \times n}$ и $\Delta X_{m \times p}$.
2. Вычисление отклика входного слоя $H_{m \times h} = F(\Delta S_{m \times n} \cdot Win_{n \times h})$.
3. При наличии функциональной зависимости ΔS от ΔX дополним матрицу $H_{m \times h+n} = [H_{m \times h} \Delta S_{m \times n}]$.
4. Формируем матрицу $HX_{w \times h+n+p} = [H_{w \times h+n} \Delta X_{w \times p}]$.
5. Находим матрицы $Q_{w \times h+n+p}$ и $R_{h+p \times h+n+p}$ через QR-факторизацию

$$\begin{bmatrix} Q_{w \times h+n+p} & R_{h+p \times h+n+p} \end{bmatrix} = qr(HX, 0).$$

6. Разложим матрицу $R_{h+n+p \times h+n+p}$ на три составляющих

$$\begin{bmatrix} Xt_{h+n \times h+n} & St_{h+n \times p} \\ 0 & Yt \end{bmatrix} = R_{h+n+p \times h+n+p}.$$

7. Находим обратную матрицу $Xt_{h+n \times h+n}^{-1}$.
8. Перемножим матрицы $Wout_{h+n \times p} = Xt_{h+n \times h+n}^{-1} \cdot St_{h+n \times p}$.

При повторном обучении алгоритм выглядит следующим образом.

1. Проведем конкатенацию $R_{h+p+w \times h+p} = \begin{bmatrix} R_{h+p \times h+p} \\ [H_{w \times h} \Delta X_{w \times p}] \end{bmatrix}$.
2. Находим матрицы $Q_{2w \times h+n+p}$ и $R_{2h+p \times h+n+p}$ через QR-факторизацию $[Q_2 \ R_2] = qr(R)$.
3. Разложим матрицу $R_{2h+n+p \times h+n+p}$ на три составляющих

$$\begin{bmatrix} Xt_{h+n \times h+n} & St_{h+n \times p} \\ 0 & Yt \end{bmatrix} = R_{2(h+n+p \times h+n+p)}.$$

4. Подготовка к следующему обучению $R = R_2$.
5. Находим обратную матрицу $Xt_{h+n \times h+n}^{-1}$.
5. Перемножим матрицы $Wout_{h+n \times p} = Xt_{h+n \times h+n}^{-1} \cdot St_{h+n \times p}$

где $qr(\)$ – QR-факторизация.

Первичный анализ показывает, что использование QR-факторизации для расчета обратной матрицы вносит погрешность, которая в контексте текущей работы не является значительной.

2. Реализация НС

В качестве входных данных используются измерения датчиков первичной информации (ДПИ, ΔS), доступные в режиме реального времени. Входной вектор состоит из шести значений (n): три показания от акселерометра (АКС) и три от датчиков угловой скорости (ДУС). Выходными данными являются значения коррекции вектора состояния ИНС (ΔX), также из шести значений: три по координатам и три по скоростям. Функционирование НС происходит в двух режимах. В случае отсутствия корректной информации от СНС, НС предсказывает коррекцию вектора состояния. При наличии таковой НС обучается, используя СНС в качестве источника эталонной информации. Для обучения НС был выбран метод перекрывающегося окна, с размером в 12 измерений. Оптимальное количество нейронов на скрытом слое определим посредством численного моделирования.

3. Численное моделирование

Численное моделирование осуществлялось на цифровом комплексе математического моделирования (ЦКМ) в режиме статистического моделирования и на комплексе имитационного моделирования (КИМ) в качестве полунатурных испытаний.

3.1. Моделирование на ЦКМ

ЦКМ – программно-математический комплекс, предназначенный для проверки алгоритмических блоков в контексте модели объекта. Он применяется не только для отработки кода, но и для проведения сопутствующего моделирования в ходе всего цикла экспериментов, начиная с ранних стадий испытаний.

Моделирование проводилось для нейронных сетей с различным количеством нейронов в скрытом слое – 12, 24, 48, 96, 192 и 384. Для каждой конфигурации алгоритма использовался один набор из 10000 уникальных сценариев. В каждом из них начальные условия были одинаковыми: высота, дальность и имитация длительного отказа СНС на 100 сек через 300 сек после начала автономного полета (рис. 3). До момента отказа СНС стабильно выдает эталонные измерения.

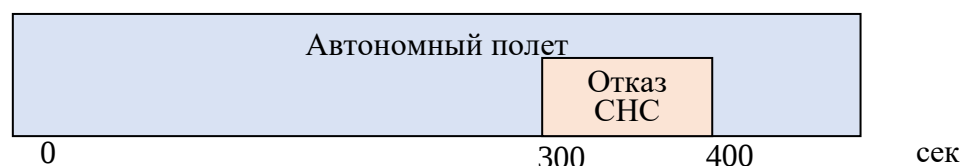


Рис. 3. Отказы СНС в сценарии

Fig. 3. Failures of the GNSS in the scenario

Сценарии различались углом ракурса (задавался от -180° до 180°) и погрешностями датчиков первичной информации, задаваемыми согласно потребительскому [9] классу точности (табл. 1). Результаты статистического моделирования (табл. 2) показывают, что чем больше нейронов на скрытом слое, тем большую точность имеет алгоритм на основе ELM. Алгоритм с 48 нейронами показал сравнимую погрешность с алгоритмом на основе EKF. Алгоритмы, имеющие 96 нейронов и более, оказались точнее алгоритма на основе EKF и имеют СКО погрешности определения местоположения на 8.3-14 % (для 96 и 386 нейронов соответственно). Однако эти тезисы справедливы для данных условий при достаточно длительном времени обучения (периода достоверной информации от СНС).

Таблица 1.
Погрешности ДПИ

Table 1.
Errors of primary information sensors

Характеристика погрешности ДПИ	Значение	Единицы измерения
Нулевой сигнал АКС	0.01	м/с ²
Нулевой сигнал ДУС	120	град/ч
Неортогональность блока АКС	2	угл.мин
Неортогональность блока ДУС	2	угл.мин
Масштабный коэффициент АКС	0.2	%
Масштабный коэффициент ДУС	0.5	%

Таблица 2.
Результаты статистического моделирования

Table 2.
Results of statistical simulation

Алгоритм	СКО ошибки определения алгоритмом параметра на конец отказа СНС						Доля испытаний, в которых ЕКФ имел сферическую ошибку по координатам больше, чем ELM [%]
	По координатам [м]			По скоростям [м/с]			
	dB	dL	dH	dVx	dVy	dVz	
EKF	32.75	32.78	0.65	0.81	0.04	0.81	—
ELM_12	49.02	49.34	1.55	1.13	0.04	1.14	5.70
ELM_24	43.13	43.29	1.59	1.01	0.04	1.02	10.18
ELM_48	33.58	33.75	1.35	0.82	0.04	0.83	45.19
ELM_96	29.98	30.10	1.22	0.75	0.04	0.76	73.55
ELM_192	30.21	30.44	1.08	0.76	0.04	0.76	76.08
ELM_384	28.07	28.27	1.07	0.71	0.04	0.72	85.61

3.2. Моделирование на КИМ

Для проведения полунатурного моделирования использовался комплекс имитационного моделирования (КИМ). Отличием данного моделирования от предыдущего в том, что алгоритмы комплексирования выполняются непосредственно на микроконтроллере. Модель измерителей и внешние воздействия моделируются на ПК. Принципиальная схема функционирования КИМ представлена на рис. 4. В качестве вычислительной платформы алгоритмов использовался микроконтроллер STM32H743VIT6 с тактовой частотой 480 МГц и объемом оперативной памяти 512 КБ.

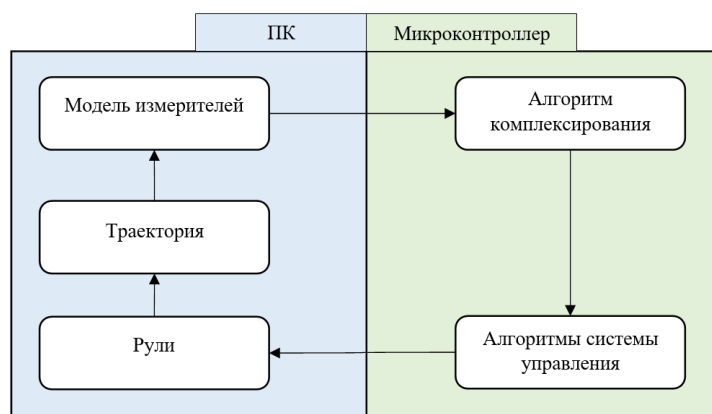


Рис. 4. Схема моделирования на КИМ

Fig. 4. Simulation scheme using hardware-in-the-loop

Сценарий моделирования был унифицирован с одним из сценариев, использованных при проведении статистического моделирования, для обеспечения сопоставимости результатов. В ходе полунатурного тестирования алгоритмов на КИМ было установлено, что доступные вычислительные ресурсы обеспечивают достаточный уровень производительности для всех исследуемых реализаций алгоритмов на основе ELM. Этот результат подтверждает эффективность проведенной модернизации алгоритма. Однако при реализации алгоритма с архитектурой скрытого слоя, содержащей 384 нейрона, оперативной памяти микроконтроллера оказалось недостаточно. Поэтому для проведения полунатурного моделирования на КИМ диапазон исследуемых ELM был ограничен количеством нейронов в скрытом слое до 192.

Результаты, представленные на рис. 5-7, демонстрируют, что алгоритмы ELM, использующие 48 и более нейронов на скрытом слое, обеспечивают точность не ниже, чем у алгоритма, реализованного на основе ЕKF. Следовательно, проведенное полунатурное моделирование подтверждает преимущество предложенного алгоритма, основанного на ELM, в задачах обработки навигационной информации при условии соблюдения ограничений по объему оперативной памяти.

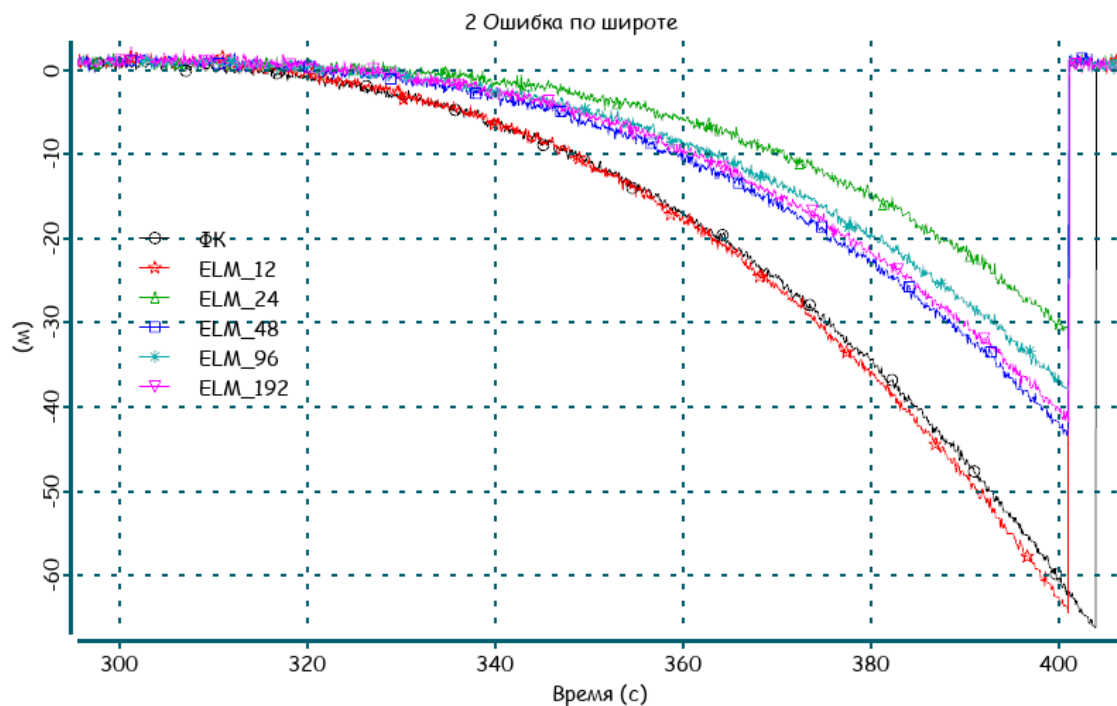


Рис. 5. Ошибки по широте алгоритмов комплексирования

Fig. 5. Latitude errors of the integration algorithms

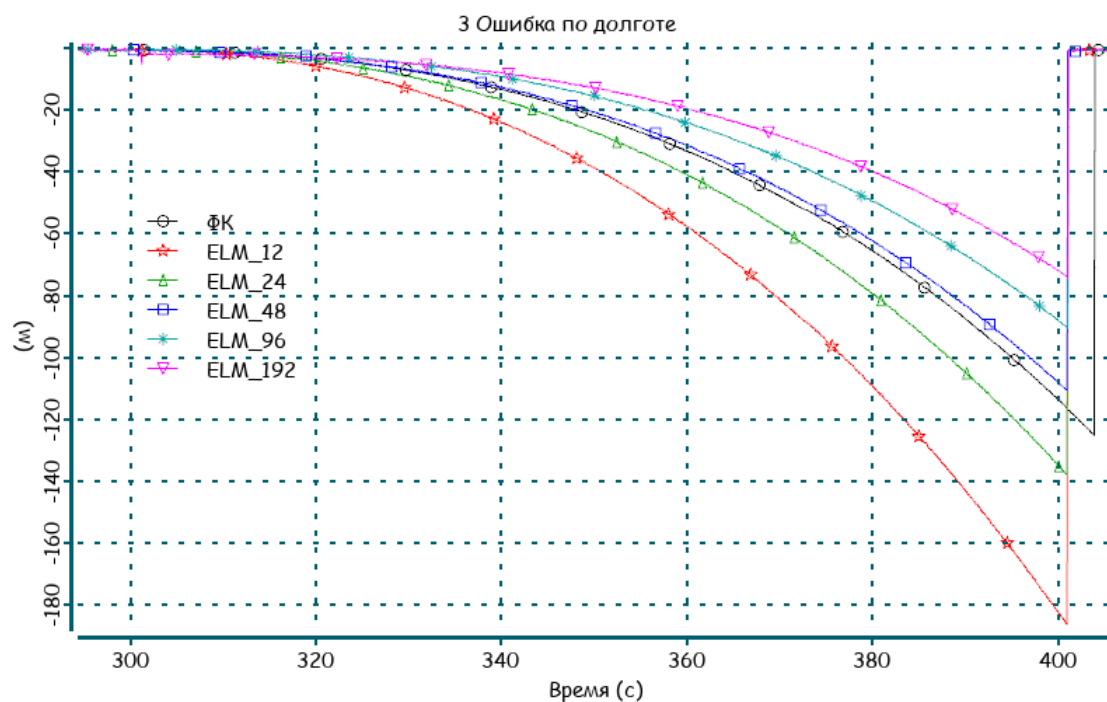


Рис. 6. Ошибки по долготе алгоритмов комплексирования

Fig. 6. Longitude errors of the integration algorithms

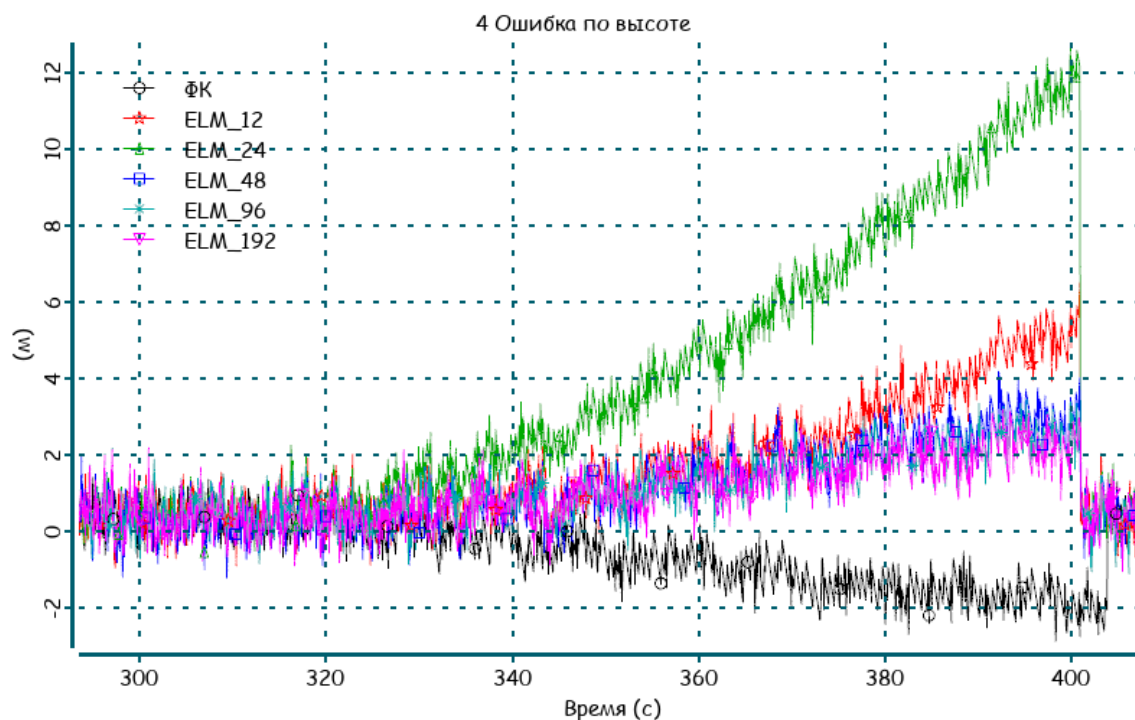


Рис. 7. Ошибки по высоте алгоритмов комплексирования

Fig. 7. Altitude errors of the integration algorithms

Заключение

Настоящая работа посвящена созданию алгоритма комплексной обработки навигационной информации, интегрирующего данные от ИНС и СНС через использование метода машинного обучения. Для адаптации под ограниченные вычислительные ресурсы была выполнена его оптимизация. Это позволило обеспечить работу системы в режиме реального времени на вычислителе, используемом на навигационных изделиях.

Проведенное статистическое моделирование, включающее сравнение алгоритмов на основе расширенного фильтра Калмана и ELM, показало, что при использовании 48 нейронов на скрытом слое точность работы алгоритмов сопоставима. Однако при увеличении количества нейронов алгоритмы на основе ELM демонстрируют более высокую точность определения навигационных параметров. Эффективность разработанного алгоритма была подтверждена в ходе полунатурного моделирования на КИМ, что свидетельствует о его практической применимости.

Следующие этапы работы планируется сосредоточить на практической проверке алгоритма в условиях, усложненных внешними факторами. Параллельно будет реализовано повышение производительности алгоритма ELM за счет более точной инициализации весов скрытого слоя и переноса основной вычислительной нагрузки на несколько временных итераций.

Библиографический список

1. **Браммер, К.** Фильтр Калмана-Бьюси / К. Браммер, Г. Зиффлинг. – М.: Наука, 1982. – 199 с.
2. **Потапов, А.С.** Технологии искусственного интеллекта / А.С. Потапов. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. – 218 с.
3. **Nilsson, N.J.** Principles of artificial intelligence / N.J. Nilsson. – Morgan Kaufmann, 2014. – 476 p.
4. **Russell, S.** Artificial intelligence: a modern approach / S. Russell, P. Norvig. – 2002. – 1132 p.
5. **Extreme learning machines** / E. Cambria, G.B. Huang, L.L.Ch. Kasun [et al] // IEEE Intelligent Systems. 2013. – Vol. 28, № 6. – P. 30-59.

6. **Брантон, С.Л.** Анализ данных в науке и технике / С.Л. Брантон, Дж.Н. Куц. – М.: ДМК Пресс, 2021. – 574 с.
7. **Noureldin A.** Optimizing neuro-fuzzy modules for data fusion of vehicular navigation systems using temporal cross-validation / A. Noureldin, A. El-Shafie, M.R. Taha // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2007. – Vol. 20, iss. 1. – P. 49-61. – DOI: 10.1016/j.engappai.2006.03.002.
8. **Мэрфи, К.П.** Вероятностное машинное обучение: введение / К.П. Мэрфи. – М.: ДМК Пресс, 2022. – 940 с.
9. **Lefèvre H.C.** The fiber-optic gyroscope: The Artech House applied photonics series / H.C. Lefèvre. – 2nd ed. – Boston: Artech House, 2014. – 391 с.

References

1. **Brammer K.,** Ziffling G. Fil'tr Kalmana-B'jusi [Kalman-Bucy filter]. Kolmanovskij V.B., translator. Moscow: Nauka; 1982. 199 p. (in Russian).
2. **Potapov A.S.** Tekhnologii iskusstvennogo intellekta [Artificial intelligence technologies]. Saint Petersburg: SPbGU ITMO; 2010. 218 p. (in Russian).
3. **Nilsson N.J.** Principles of artificial intelligence. Morgan Kaufmann; 2014. 476 p.
4. **Russell S.,** Norvig P. Artificial intelligence: a modern approach. 2002. 1132 p.
5. **Cambria E.,** Huang G.B., Kasun L.L.Ch. et al. Extreme learning machines. IEEE Intelligent Systems. 2013;28(6):30-59.
6. **Branton S.L.,** Kuts J.N. Analiz dannykh v nauke i tekhnike [Data analysis in science and engineering]. **Slinkin A.A.,** translator. Moscow: DМК Press; 2021. 574 p. (in Russian).
7. **Noureldin A.,** El-Shafie A., Taha M.R. Optimizing neuro-fuzzy modules for data fusion of vehicular navigation systems using temporal cross-validation. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2007;20(1):49-61. doi: 10.1016/j.engappai.2006.03.002.
8. **Murphy K.P.** Veroyatnostnoe mashinnoe obuchenie: vvedenie [Probabilistic machine learning: an introduction]. Slinkin A.A., translator. Moscow: DМК Press; 2022. 940 p. (in Russian).
9. **Lefèvre H.C.** The fiber-optic gyroscope. 2nd ed. Boston: Artech House; 2014. 391 p.

*Дата поступления
в редакцию: 28.05.2026*

*Дата принятия
к публикации: 17.07.2026*

УДК 658.512

EDN TMLZTP

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ОБЪЕМНО-КАЛЕНДАРНЫХ ПЛАНОВ ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ С ЕДИНИЧНЫМ И МЕЛКОСЕРИЙНЫМ ХАРАКТЕРОМ ПРОИЗВОДСТВА

И.В. НетронинORCID: 0009-0001-3647-8407 e-mail: ivnetronin@yandex.ru

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Нижний Новгород, Россия

Рассмотрена проблема формирования объемно-календарных планов для предприятий с единичным и мелкосерийным характером производства. Описаны два случая формализованного описания рассматриваемой проблемы: общий случай, когда производственная система моделируется трехуровневой сетевой структурой, и частный случай с древовидной сетевой структурой. Построены математические модели, поставлены оптимизационные задачи, для решения которых предлагаются алгоритмы. Представлен оригинальный алгоритм для решения задачи объемно-календарного планирования, имеющий линейно-логарифмическую сложность.

Ключевые слова: объемно-календарное планирование; единичное и мелкосерийное производство; трехуровневая иерархическая система; иерархическая система древовидной структуры.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Нетронин, И.В. Распределение ресурсов при формировании объемно-календарных планов для предприятий с единичным и мелкосерийным характером производства // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2026. № 3. С. 16-23. EDN TMLZTP

RESOURCE ALLOCATION IN FORMATION OF MASTER PRODUCTION SCHEDULES FOR ENTERPRISES WITH SINGLE-UNIT AND SMALL-BATCH PRODUCTION

I.V. NetroninORCID: 0009-0001-3647-8407 e-mail: ivnetronin@yandex.ru

Nizhny Novgorod State University n.a. N.I. Lobachevsky

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The paper considers the problem of forming master production schedules for enterprises with single-unit and small-batch production. Two cases of a formalized description of the problem under consideration are described: the general case, when the production system is modeled by a three-level network structure, and the special case, when it is modeled by a tree network structure. Mathematical models are created, optimization problems are formulated, and solution algorithms are proposed. An original algorithm with linear-logarithmic complexity is proposed for solving the master production scheduling problem.

Keywords: master production scheduling; single-unit and small-batch production; three-level hierarchical system; hierarchical tree-structured system.

FOR CITATION: Netronin I.V. Resource allocation in formation of master production schedules for enterprises with single-unit and small-batch production. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 3. Pp. 16-23. EDN TMLZTP

1. Введение. Содержательное описание проблемы формирования объемно-календарных планов

Задачи объемно-календарного планирования представляют собой эффективный инструмент, предназначенный для распределения плановых объемов производства изделий из портфеля заказов по подразделениям предприятия и подпериодам планирования по различным критериям. Основными среди них являются выполнение заданных директивных сроков изготовления выпускаемой продукции, равномерность расходования ресурсов по тактам планирования, а также уменьшения объемов незавершенного производства [1-8]. Как правило, в таких задачах большое внимание уделяется эффективному использованию производственных мощностей предприятия.

В работе предлагается следующая модель формализации рассматриваемой проблемы формирования объемно-календарного плана. Рассматривается трехуровневая иерархическая система, в которой распределяется однородный ресурс (нормо-часы, соответствующие изготавливаемым изделиям). Система состоит из «распределителя ресурса» (центра), который распределяет ресурс, «потребителей ресурса» – подразделений предприятия, непосредственно следующих за центром, и следующих за ними, в свою очередь, элементов, которые соответствуют распределению ресурсов для подразделений предприятия по календарным подпериодам планирования.

Задача рассматривается в общем виде, когда объемы ресурса, соответствующие элементам системы, задаются через сегменты, предполагая, что когда есть заранее определенные объемы ресурса, то приравнивая левые и правые границы сегментов, будут задаваться скалярные значения объема ресурса. Сегменты, соответствующие потребителям ресурса, т.е. подразделениям предприятия, определяются из условий обеспеченности подразделений ресурсами: если некоторому подразделению предприятия в заданный период планирования приписан сегмент $[A_{st}, B_{st}]$, то A_{st} определяет минимальный объем нормо-часов, меньше которого подразделение с номером s в такт t получить не может, а B_{st} определяет максимальный объем нормо-часов, которое предприятие с номером s может выполнить в такт t .

Требуется определить такие объемы ресурса, которые удовлетворяют сегментным ограничениям элементов системы и соответствуют экстремальным значениям различных критериев оптимальности.

2. Трехуровневая сетевая структура. Математическая модель

Будем моделировать систему распределения однородного ограниченного ресурса трехуровневой сетевой структурой $S = \langle V_0, V_s, V_{st} \rangle$, где V_0 – одноэлементное множество, соответствующее «распределителю» ресурса, V_s – множество подразделений предприятия, V_{st} – множество плановых подпериодов, соответствующих подразделениям предприятия, $s = \overline{1, s_0}, t = \overline{1, t_0}$.

Обозначим через $[A_0, B_0], [A_s, B_s], [A_{st}, B_{st}]$ минимально и максимально возможные объемы работ, которые соответствуют распределителю ресурсов, предприятиям и подразделениям предприятия по календарным подпериодам. При этом:

$$\sum_{t=1}^{t_0} A_{st} = A_s, s = \overline{1, s_0}, \sum_{s=1}^{s_0} A_s = A_0;$$

$$\sum_{t=1}^{t_0} B_{st} = B_s, s = \overline{1, s_0}, \sum_{s=1}^{s_0} B_s = B_0.$$

Обозначим через x_{st} количество ресурса, которое будет распределено подразделению предприятия s в такт планирования $t, s = \overline{1, s_0}, t = \overline{1, t_0}$. Тогда математическая модель рассматриваемой производственной системы формально представляется системой линейных алгебраических неравенств:

$$A_0 \leq \sum_{s=1}^{s_0} \sum_{t=1}^{t_0} x_{st} \leq B_0. \quad (1)$$

$$A_s \leq \sum_{t=1}^{t_0} x_{st} \leq B_s, s = \overline{1, s_0}. \quad (2)$$

$$A_{st} \leq x_{st} \leq B_{st}, s = \overline{1, s_0}, t = \overline{1, t_0}. \quad (3)$$

3. Постановка задачи формирования объемно-календарного плана

Из множества элементов системы выделим подмножество K «основных» элементов системы – подразделений предприятия, в которых выполняются наиболее трудоемкие операции. На подмноестве K зададим бинарное отношение « $>$ » с помощью функции $\mu(x_k)$, $x_k \in [A_k, B_k]$, $k \in K$. Будем говорить, что $x_k > x_l$ для $x_k \in [A_k, B_k]$, $x_l \in [A_k, B_k]$, тогда и только тогда, если $\mu(x_k) \geq \mu(x_l)$, $l, k \in K$. Тогда задача формирования объемно-календарного плана будет заключаться в решении многокритериальной задачи с ограничениями (1)-(3) и критериями: $\mu(x_k) \rightarrow opt, k \in K$. Основные элементы также могут иметь разную «важность», в зависимости от приоритетности изделий, которые они выполняют. В случае, если $\mu(x_k)$ линейные функции, $k \in K$, то

$$\mu(\vec{x}) = \sum_{k \in K} \mu(x_k) \rightarrow opt, x_k \in [A_k, B_k], k \in K. \quad (4)$$

4. Алгоритм решения

Полученная задача (1-4) является задачей линейного программирования и может быть решена, например, с использованием метода ортогональных проекций Агмона-Моцкина для решения большеразмерных задач линейного программирования [9], или открытых пакетов программ [10-11] для решения задач линейного программирования. Возникающие сложности связаны с большими вычислительными затратами на решение большеразмерных задач, соответствующих реальным производственным системам.

5. Иерархическая система древовидной структуры. Математическая модель

Учитывая, что задачи объемно-календарного планирования решаются на достаточно большой период в 5-7 лет, можно, используя некоторую идеализацию, перейти от общего вида представления производственной системы, к древовидной сетевой структуре [12]. Специфика древовидности иерархической системы для решения задачи формирования объемно-календарного плана позволила предложить алгоритм, имеющий линейно-логарифмическую сложность. Представим трехуровневую сетевую структуру $S = \langle V_0, V_s, V_{st} \rangle$, $s = \overline{1, s_0}$, $t = \overline{1, t_0}$, в виде взвешенного ориентированного дерева $T = (V, A)$, $A \subseteq V^2$, где совокупность множеств V_0, V_i, V_{ij} , $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$, является разбиением множества V .

Обозначим через $Q(i) = \{j | (i, j) \in A, j \in V\}$ – множество номеров вершин дерева, непосредственно следующих после вершины с i -ым номером, $i \in V \setminus V_{ij}$, $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$, а через $G(i) = \{j | (j, i) \in A, j \in V\}$ – множество номеров вершин дерева, непосредственно предшествующих вершине с i -ым номером, $i \in V \setminus V_0$. Каждой вершине i поставим в соответствие пару L_i, R_i , $0 \leq L_i < \infty$, $L_i \leq R_i$, где L_i и R_i – соответственно, нижняя и верхняя границы допустимых значений распределяемого ресурса, $i \in V$.

Пусть переменные x_{ij} определяют, сколько ресурса будет направлено по дуге $(i, j) \in A$. Тогда естественные условия баланса (отсутствие «потерь» ресурса при распределении) представимы в виде следующих ограничений:

$$\sum_{j \in G(i)} x_{ji} = x_i = \sum_{j \in Q(i)} x_{ij}, i \in V_s, s = \overline{1, s_0}, \quad (5)$$

$$x_i = \sum_{j \in Q(i)} x_{ij} i \in V_0, \quad (6)$$

$$x_i = \sum_{j \in G(i)} x_{ji}, i \in V_{st}, s = \overline{1, s_0}, t = \overline{1, t_0}. \quad (7)$$

Здесь величины x_i определяют объем ресурса, соответствующий вершине дерева с номером i , $i \in V$. Добавив к системе (5-7) ограничения, связанные с ресурсными условиями для вершин дерева:

$$L_i \leq x_i \leq R_i, i \in V, \quad (8)$$

получаем математическую модель формирования объемно-календарного плана для случая, когда иерархическая система, описывающая рассматриваемую проблему, является сильно-связной.

Исходя из условий (5-7), и того, что распределение ресурсов, соответствующее каждой вершине дерева ограничено как сверху L_i , так и снизу R_i , математическую модель можно преобразовать к виду:

$$L_i \leq \sum_{j \in Q(i)} x_{ij} \leq R_i, i \in V \setminus V_{st}, s = \overline{1, s_0}, t = \overline{1, t_0}, \quad (9)$$

$$L_i \leq \sum_{j \in G(i)} x_{ji} \leq R_i, i \in V_0, \quad (10)$$

$$0 \leq \sum_{j \in G(i)} x_{ji} - \sum_{j \in Q(i)} x_{ij} \leq 0, i \in V_s, s = \overline{1, s_0}. \quad (11)$$

Здесь условия (9)-(10) определяют ограничения на распределяемый ресурс для элементов системы, а условия (11) являются условиями баланса.

6. Условия совместности системы ограничений математической модели

Рассмотрим величины L_i^0 и R_i^0 , для которых выполняются соотношения:

$$L_i^0 = \sum_{j \in Q(i)} L_j^0, R_i^0 = \sum_{j \in G(i)} R_j^0, i \in V \setminus V_0.$$

Для их определения предлагается следующая процедура.

Найдем с величины L_i^p и R_i^p , $i \in V$:

$$L_i^p = L_i, R_i^p = R_i, i \in V_0, \quad (12)$$

$$L_i^p = \max (L_i, \sum_{j \in Q(i)} L_j^p), i \in V \setminus V_0,$$

$$R_i^p = \min (R_i, \sum_{j \in G(i)} R_j^p), i \in V \setminus V_0. \quad (13)$$

Если максимум выражения (12) с найденными значениями L_i^p достигается на L_i , то $L_i^0 = L_i^p$, а величины L_j^0 , $j \in Q(i)$ определяются путем увеличения значений L_j^p таким образом, чтобы $\sum_{j \in Q(i)} L_j^0 = L_i^0$.

Если максимум выражения (12) достигается на $\sum_{j \in Q(i)} L_j^p$, то $\sum_{j \in Q(i)} L_j^p = L_i^0$.

Если минимум выражения (13) с найденными значениями, R_i^p достигается на R_i , то $R_i^0 = R_i$, а величины R_j^0 , $j \in G(i)$ определяются путем уменьшения значений R_j^p таким образом, чтобы $\sum_{j \in G(i)} R_j^0 = R_i^0$.

Если минимум выражения (13) с найденными значениями R_i^p достигается на $\sum_{j \in G(i)} R_j^p$, то $R_i^0 = \sum_{j \in G(i)} R_j^p$, а $R_j^0 = R_j^p$, $j \in G(i)$.

Если после применения описанного алгоритма некоторые переменные определяются однозначно, то они исключаются из рассмотрения и исходная система преобразуется в систему меньшей размерности.

Приведенная здесь процедура получения новых границ сегментов согласно [12] называется процедурой приведения границ.

После проделанных преобразований математическая модель проблемы формирования объемно-календарных планов может быть представлена в виде совокупности линейных двухсторонних неравенств:

$$L_i^0 \leq \sum_{j \in G(i)} x_{ji} \leq R_i^0, i \in V_0, \quad (14)$$

$$L_i^0 \leq \sum_{j \in Q(i)} x_{ij} \leq R_i^0, i \in V_s, s = \overline{1, s_0}, \quad (15)$$

$$L_i^0 \leq \sum_{j \in Q(i)} x_{ij} \leq R_i^0, i \in V_{st}, s = \overline{1, s_0}, t = \overline{1, t_0}, \quad (16)$$

$$0 \leq \sum_{j \in G(i)} x_{ji} - \sum_{j \in Q(i)} x_{ij} \leq 0, i \in V_s, s = \overline{1, s_0}. \quad (17)$$

Конкретизируем критерий рассматриваемой задачи.

Введенный ранее функционал $\mu(\vec{x}) = \sum_{k \in K} \mu(x_k) \rightarrow \text{opt}$ предполагает следующую конкретизацию, зависящую от поставленных целей. Если к основным элементам системы относятся подразделения предприятия, задаваемые множеством V_s , для которых выполняются ограничения (15), и при этом требуется как можно больше использовать ресурсы этих подразделений, то:

$$\mu_i(x) = \sum_{j \in Q(i)} x_{ij} \rightarrow \max, i \in V_s, s = \overline{1, s_0}. \quad (18)$$

В случае, если предполагается сохранять определенный запас ресурсов основных подразделений:

$$\mu_i(x) = \sum_{j \in Q(i)} x_{ij} \rightarrow \min, i \in V_s, s = \overline{1, s_0}. \quad (19)$$

Алгоритм решения

Система неравенств (14)-(17) с приведенными границами при выполнении условий $L_i^0 \leq R_i^0, i \in V$, согласно теореме о приведенных границах [12], является совместной, и по построению ни одно из неравенств ограничений (14)-(16) не является зависимым. Отсюда в качестве ведущей гиперплоскости может быть выбрана гиперплоскость, соответствующая любому из односторонних неравенств этих ограничений, т.е. та, проецирование на которую приносит максимальное (минимальное) приращение текущему значению критерия оптимизационной задачи. После выполнения схемы жорданова исключения с последующим удалением ведущего столбца (переменной) и ведущей строки (ограничения), получим новую систему ограничений (меньшей размерности), для которой необходимо выполнить процедуру приведения границ сегментов (только для тех элементов системы, которые участвовали при выполнении схемы жорданова исключения). Новая система ограничений также является совместной и не содержит зависимых неравенств, т.е. для нее можно повторить предлагаемую процедуру.

Рассмотрим задачу 1, задаваемую системой ограничений (14-17), и критериями (18), которая является многокритериальной задачей с линейными ограничениями и линейными критериями. Рассмотрим один из критериев задачи 1 при заданном номере i , определяющим некоторое подразделение предприятия. Этому критерию соответствует ограничение $L_i^0 \leq \sum_{j \in Q(i)} x_{ij} \leq R_i^0$. Очевидно, что значение этого критерия на любом допустимом решении принадлежит сегменту $[L_i^0, R_i^0]$. Пусть исходная система (14-17) совместна. Рассмотрим сегмент $[L_i^*, R_i^*], [L_i^*, R_i^*] \subseteq [L_i^0, R_i^0]$. Рассмотрим систему ограничений (15), где вместо выбранного ограничения с номером i , рассмотрим ограничение $L_i^* \leq \sum_{j \in Q(i)} x_{ij} \leq R_i^*$. Применив к измененной системе описанную процедуру приведенных границ, можно проверить полученную систему на совместность. При этом вычислительная сложность такой проверки линейна.

Рассмотрим систему из k вложенных сегментов $[L_i^1, R_i^1] \subset [L_i^2, R_i^2] \subset \dots \subset [L_i^{k-1}, R_i^{k-1}] \subset [L_i^0, R_i^0]$. Поскольку мы рассматриваем максимизируемый критерий, «лучшим» сегментом будет тот, для которого совместна система (14-17) с замененным ограничением $L_i^0 \leq \sum_{j \in Q(i)} x_{ij} \leq R_i^0$ на ограничение $L_i^j \leq \sum_{j \in Q(i)} x_{ij} \leq R_i^j$, и несовместна при заменном

ограничении на $L_i^{j+1} \leq \sum_{j \in Q(i)} x_{ij} \leq R_i^{j+1}$. Монотонность, связанная с вложенностью системы сегментов, позволяет осуществлять для поиска лучшего сегмента двоичный поиск.

Для решения поставленной многокритериальной задачи 1 предлагается ввести лексикографическое упорядочивание частных критериев оптимальности (18), учитывающее «важности» изделий, которые будут изготавливаться в подразделениях предприятия. Будем предполагать, что введенная нумерация $s = \overline{1, s_0}$ уже соответствует введенному порядку.

Алгоритм решения задачи 1 заключается в последовательной проверке на совместность системы линейных двусторонних алгебраических неравенств, в которой всегда присутствуют без изменения ограничения (14), (16), (17) и ограничения (15) с измененными значениями левых и правых границ.

1-й шаг работы алгоритма

Рассматривается система ограничений (14)–(17), при условии, что ограничения с номером $i = 1$ системы (15) последовательно заменяются на ограничения, определяемыми системой из k вложенных сегментов $[L_i^1, R_i^1] \subset [L_i^2, R_i^2] \subset \dots \subset [L_i^{k-1}, R_i^{k-1}] \subset [L_i^0, R_i^0]$, каждый раз проверяя на совместность полученную систему неравенств, используя процедуру приведенных границ. Монотонность, связанная с вложенностью системы сегментов, позволяет осуществлять для поиска «лучшего» сегмента двоичный поиск.

2-й шаг работы алгоритма

Зафиксировав ограничение с номером $i = 1$ системы (15) на найденном сегменте, повторяем проделанную процедуру для ограничения $i = 2$ системы (15).

s_0 -й шаг работы алгоритма

Зафиксировав ограничение с номером $i = s_0 - 1$ системы (15) на найденном сегменте, повторяем проделанную процедуру для ограничения $i = s_0$ системы (15).

Предложенный алгоритм имеет линейно-логарифмическую сложность, и включает в себя проверку на совместность порядка $s_0 \log_2 k$ двусторонних систем линейных алгебраических неравенств, для чего используются линейные процедуры приведенных границ.

Результатом работы алгоритма станет совместная система линейных двусторонних алгебраических неравенств, любое решение которой будет допустимым решением поставленной задачи. Поскольку найденная система совместных ограничений представляет собой иерархическую систему древовидной структуры, решение исходной задачи (14)–(17) можно найти с использованием введенного ранее дерева $T = (V, A)$, $A \subseteq V^2$.

Вершине дерева, соответствующей ограничению с номером $i = 1$ системы (15) присваивается максимально возможное значение из сегмента, найденного для этой вершины. Применяется процедура приведенных границ, которая преобразует систему, но сохранит ее совместность. Затем то же самое повторяется последовательно для остальных ограничений в порядке $i = 2, i = 3, \dots, i = s_0$. Затем в произвольном порядке выбираются остальные вершины и для них выбираются произвольные значения из соответствующих сегментов. Найденные объемы распределяемого ресурса определяют решение исходной задачи (14)–(17). В результате несложных преобразований предложенный алгоритм может быть применен и к решению задачи 2 с минимизируемым критерием.

Заключение

В работе рассмотрена проблема формирования объемно-календарных планов для предприятий с единичным и мелкосерийным характером производства. Построена общая математическая модель, в рамках которой ставится многокритериальная задача объемно-календарного планирования. Путем свертки частных критериев оптимальности эта задача формализуется как задача линейного программирования, решение которой может быть осуществлено с использованием открытых пакетов программ. Для часто встречающегося случая, когда рассматриваемая задача ставится в рамках иерархической системы древовидной структуры, предложен алгоритм решения поставленной задачи, имеющий линейно-логарифмическую сложность.

Библиографический список

1. Прилуцкий, М.Х. Многокритериальное распределение однородного ресурса в иерархических системах / М.Х. Прилуцкий // Автоматика и телемеханика. – 1996. – № 2. – С. 139-146.
2. Прилуцкий, М.Х. Многокритериальные многоиндексные задачи объемно-календарного планирования / М.Х. Прилуцкий // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2007. – № 1. – С. 83-87.
3. Прилуцкий, М.Х. Оптимизационные задачи объемно-календарного планирования для нефтеперерабатывающих предприятий / М.Х. Прилуцкий, В.Е. Костюков // Системы управления и информационные технологии. – 2007. – № 2-1(28). – С. 188-193.
4. Афраимович, Л.Г. Многоиндексные задачи оптимального планирования производства / Л.Г. Афраимович, М.Х. Прилуцкий // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 10. – С. 148-155.
5. Прилуцкий, М.Х. Задачи календарного планирования для предприятий с единичным и мелкосерийным характером производства / М.Х. Прилуцкий, И.В. Нетронин // Системы управления и информационные технологии. – 2019. – № 3(77). – С. 46-51.
6. Прилуцкий, М.Х. Задачи объемно-календарного планирования для предприятий с единичным и мелкосерийным характером производства / М.Х. Прилуцкий, И.В. Нетронин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2019. – № 4(127). – С. 36-43.
7. Прилуцкий, М.Х. Решение задач объемно-календарного планирования для предприятий судостроения в условиях ограниченности ресурсов / М.Х. Прилуцкий, Е.А. Кумагина // Научные проблемы водного транспорта. – 2024. – № 80. – С. 35-42.
8. Игумнов, Л.А. Проблема существования решения у больших размерных задач линейного программирования / Л.А. Игумнов, М.Х. Прилуцкий // Информационные системы и технологии ИСТ-2020: Сборник материалов XXVI Международной научно-технической конференции, Нижний Новгород, 24-28 апреля 2020 года / Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород : Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. – 2020. – С. 825-829.
9. SoPlex. Sequentialobject-oriented simplex. [Электронный ресурс] – URL: <https://soplex.zib.de> (дата обращения 16.03.2026).
10. GLPK. GNU Linear Programming Kit. [Электронный ресурс] – URL: <https://www.gnu.org/software/glpk/> (дата обращения 16.03.2026).
11. Прилуцкий, М.Х. Распределение однородного ресурса в иерархических системах древовидной структуры / М.Х. Прилуцкий // Труды международной конференции «Идентификация систем и задачи управления SICPRO 2000». Москва, 26-28 сентября 2000 г. – М. : Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – 2000. – С. 238-249.

References

1. Prilutskiy M.Kh. Mnogokriterial'noe raspredelenie odnorodnogo resursa v ierarkhicheskikh sistemakh [Multicriteria distribution of a homogeneous resource in hierarchical systems]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 1996;(2):139-146. (in Russian).
2. Prilutskiy M.Kh. Mnogokriterial'nye mnogoindexnye zadachi ob'emno-kalendar'nogo planirovaniya [Multicriteria multi-index aggregate scheduling problems]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Theory and Control Systems]. 2007;(1):83-87. (in Russian).
3. Prilutskiy M.Kh., Kostyukov V.E. Optimizatsionnye zadachi ob'emno-kalendar'nogo planirovaniya dlya neftepererabatyvayushchikh predpriyatiy [Optimization problems of aggregate scheduling for oil refineries]. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii* [Control Systems and Information Technologies]. 2007;(2-1(28)):188-193. (in Russian).
4. Afraymovich L.G., Prilutskiy M.Kh. Mnogoindexnye zadachi optimal'nogo planirovaniya proizvodstva [Multi-index optimal production planning problems]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 2010;(10):148-155. (in Russian).
5. Prilutskiy M.Kh., Netronin I.V. Zadachi kalendar'nogo planirovaniya dlya predpriyatiy s edinichnym i melkoseriynym kharakterom proizvodstva [Scheduling problems for enterprises with unit and small-scale production]. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii* [Control Systems and Information Technologies]. 2019;(3(77)):46-51. (in Russian).

6. Prilutskiy M.Kh., Netronin I.V. Zadachi ob'emno-kalendarnogo planirovaniya dlya predpriyatiy s edinichnym i melkoseriynym kharakterom proizvodstva [Aggregate scheduling problems for enterprises with unit and small-scale production]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Transactions of NNTSU n.a. R.E. Alekseev]. 2019;(4(127)):36-43. (in Russian).
7. Prilutskiy M.Kh., Kumagina E.A. Reshenie zadach ob'emno-kalendarnogo planirovaniya dlya predpriyatiy sudostroeniya v usloviyakh ogranichennosti resursov [Solving aggregate scheduling problems for shipbuilding enterprises under resource constraints]. *Nauchnye problemy vodnogo transporta* [Scientific Problems of Water Transport]. 2024;(80):35-42. (in Russian).
8. Igumnov L.A., Prilutskiy M.Kh. Problema sushchestvovaniya resheniya u bol'sherazmernykh zadach lineynogo programmirovaniya [The problem of existence of a solution for large-scale linear programming problems]. In: «Informatsionnye sistemy i tekhnologii IST-2020: Sbornik materialov XXVI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii» [Information Systems and Technologies IST-2020: Proceedings of the XXVI International Scientific and Technical Conference]; 2020 Apr 24-28; Nizhniy Novgorod. Nizhniy Novgorod: Nizhniy Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev; 2020. p. 825-829. (in Russian).
9. SoPlex. Sequential object-oriented simPlex. Available from: <https://soplex.zib.de> [accessed 2026 Mar 16].
10. GLPK. GNU Linear Programming Kit. Available from: <https://www.gnu.org/software/glpk/> [accessed 2026 Mar 16].
11. Prilutskiy M.Kh. Raspredelenie odnorodnogo resursa v ierarkhicheskikh sistemakh drevoidnoy struktury [Distribution of a homogeneous resource in hierarchical systems of tree structure]. In: *Trudy mezhdunarodnoy konferentsii «Identifikatsiya sistem i zadachi upravleniya SICPRO 2000»* [Proceedings of the International Conference «System Identification and Control Problems SICPRO 2000»]; 2000 Sep 26-28; Moscow. Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences; 2000. p. 238-249. (in Russian).

**Дата поступления
в редакцию: 07.04.2026**

**Дата принятия
к публикации: 17.07.2026**

УДК 004.932.2:004.85

EDN WMTVBA

ПОЭТАПНОЕ ОБУЧЕНИЕ ДЛЯ РОБАСТНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ В СИСТЕМАХ ПРЕДИКТИВНОГО МОНИТОРИНГА

В.Н. СичкарORCID: 0000-0001-9825-0881 e-mail: valik123@gmail.com

Национальный исследовательский университет ИТМО

Санкт-Петербург, Россия

Д.И. МуромцевORCID: 0000-0002-0644-9242 e-mail: d.muromtsev@gmail.com

Национальный исследовательский университет ИТМО

Санкт-Петербург, Россия

Построена методология обучения системы предиктивного мониторинга, повышающая робастность обнаружения к перекрытию без увеличения вычислительной нагрузки в режиме инференса, что критически важно для развертывания на бортовых и периферийных вычислительных устройствах. Предлагается фреймворк из трех согласованных стратегий: поэтапного обучения с информационно-теоретической метрикой сложности, динамического адаптивного взвешивания функции потерь по байесовской оценке неопределенности и прогрессивной синтетической аугментации перекрытий. Компоненты действуют исключительно на этапе обучения и не модифицируют итоговую сеть. Эксперименты на наборе данных *MS COCO-Occluded* демонстрируют рост метрики *Fragment-Aware mAP* с 81,7 до 89,3 % при одновременном сокращении числа эпох обучения на 38 %. Предложенный подход обладает свойством переносимости: согласованный прирост 8,0-9,1 % абсолютной точности воспроизводится на детекторах YOLOv8-x, YOLOv9-c и YOLOv10-m, наиболее распространенных в задачах предиктивной диагностики. Практическая применимость метода для систем мониторинга в режиме реального времени и снижения эксплуатационных затрат при переобучении моделей под новые условия съемки обоснована полученными результатами.

Ключевые слова: техническое зрение; обнаружение объектов; частичное перекрытие; робастность модели; поэтапное обучение; предиктивное обслуживание; нейронные сети YOLO; глубокое обучение; адаптивное взвешивание потерь; байесовская неопределенность.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сичкар, В.Н. Поэтапное обучение для робастного обнаружения объектов в системах предиктивного мониторинга / В.Н. Сичкар, Д.И. Муромцев // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2026. № 3. С. 24-33. EDN WMTVBA

CURRICULUM LEARNING FOR ROBUST OBJECT DETECTION IN PREDICTIVE MONITORING SYSTEMS

V.N. SichkarORCID: 0000-0001-9825-0881 e-mail: valik123@gmail.com

ITMO University

Saint-Petersburg, Russia

D.I. MouromtsevORCID: 0000-0002-0644-9242 e-mail: d.muromtsev@gmail.com

ITMO University

Saint-Petersburg, Russia

Abstract. This paper presents a methodology for training a predictive monitoring system that improves the occlusion robustness of detection without increasing the inference-time computational cost, which is critical for deployment on onboard and edge devices. A framework of three coordinated strategies is proposed: curriculum learning driven by an information-theoretic difficulty metric, dynamic adaptive loss weighting based on Bayesian uncertainty, and pro-

gressive synthetic occlusion augmentation. The components operate only during the training stage and do not modify the final network. Experiments on the MS COCO-Occluded dataset demonstrate an increase in the Fragment-Aware mAP metric from 81.7 to 89.3 % while simultaneously reducing the number of training epochs by 38%. The proposed approach exhibits transferability: a consistent improvement of 8.0 to 9.1% in absolute accuracy is reproduced on YOLOv8-x, YOLOv9-c and YOLOv10-m detectors, which are the most common in predictive diagnostics tasks. The obtained results substantiate the practical applicability of the method for real-time monitoring systems and the reduction of operational costs when retraining models for new imaging conditions.

Keywords: computer vision; object detection; partial occlusion; model robustness; curriculum learning; predictive maintenance; YOLO neural networks; deep learning; adaptive loss weighting; Bayesian uncertainty.

FOR CITATION: Sichkar V.N. and Mouromtsev D.I. Curriculum Learning for Robust Object Detection in Predictive Monitoring Systems. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 3. Pp. 24-33. EDN WMTVBA

Введение

Эффективность современной системы предиктивного мониторинга определяется не только качеством сенсорики, но и скоростью реакции вычислительного модуля, который превращает изображение в управляющий сигнал. В сценариях осмотра линий электропередачи беспилотным летательным аппаратом, в роботизированных линиях контроля упаковки и при автоматическом сканировании готовой продукции на конвейере детектор объектов функционирует как центральный элемент киберфизической цепочки: данные с камеры (физический мир) преобразуются алгоритмом в решение (кибер-мир), а решение немедленно становится действием – отбраковкой, оповещением оператора или планированием технического обслуживания. Поэтому даже единичная ошибка детектирования влечет реальную потерю – выпуск дефектной продукции, пропуск повреждения опоры или ложный вызов выездной бригады.

Серьезным барьером для применения детекторов в подобных задачах является устойчивое к перекрытиям обнаружение. По различным оценкам, от 60 до 80 % наблюдаемых объектов в полевых условиях частично скрыты [1]: опорные конструкции перекрывают изоляторы, растительность экранирует элементы трубопроводов, а смежные детали на конвейере взаимно закрываются. При этом большинство публикуемых решений сосредоточено на архитектурных модификациях [2-4]: на добавлении модулей внимания, выделении контекстных признаков или ансамблировании. Процесс обучения – стратегия сэмплирования, схема взвешивания компонент потерь, тип аугментации обычно остается стандартным, что ограничивает потенциал даже самых современных архитектур.

Цель настоящей работы – предложить методологию обучения, повышающую устойчивость детектирования к перекрытиям без увеличения вычислительной нагрузки на инференс, что особенно важно для размещения моделей на бортовых вычислителях беспилотников и периферийных устройствах. Новизна работы определяется тремя компонентами: предложенной информационно-теоретической мерой сложности, количественно описывающей восстанавливаемое содержание перекрытого объекта; правилом адаптивного взвешивания потерь, использующим байесовскую оценку неопределенности через *Monte Carlo Dropout*; и трехэтапной прогрессивной аугментацией, согласованной с расписанием обучения и приближающей синтетические перекрытия к статистике реальных полевых сцен. Все три компонента применяются только во время обучения и оставляют конечную развернутую модель без изменений, что обеспечивает прямую совместимость с существующими стеками инференса. Прирост качества и сокращение вычислительных затрат достигаются переносом нагрузки с архитектуры на методологию обучения – направление, которое в литературе до сих пор изучено заметно слабее.

Постановка задачи и формальная модель

Базовый сценарий, в котором рассматривается работа детектора, имеет следующую структуру. Сенсор – бортовая камера беспилотника или стационарная камера над производственной зоной – формирует поток изображений; вычислительный модуль выполняет инференс детектора с фиксированной частотой (как правило, не выше 30:40 мс на кадр); полученные детекции поступают в управляющую логику, формирующую сигнал предиктивного обслуживания или решение о действии. Такие частотные рамки оставляют этап обучения единственным резервом для повышения качества без изменения вычислительных ресурсов.

Введем формальное описание задачи. Пусть I – входное изображение размера $H \times W \times 3$, M – бинарная маска перекрытия того же пространственного размера, Y – множество разметок объектов на изображении. Детектор f_θ с параметрами θ формирует множество детекций $D = f_\theta(I)$. Для каждого истинного объекта o с рамкой b_o^{gt} введем коэффициент видимости как долю незатененных пикселей внутри этой рамки, а степень перекрытия – как дополнение видимости до единицы:

$$v(o) = \text{Area}(b_o^{gt} \cap \{M = 0\}) / \text{Area}(b_o^{gt}), \quad \alpha(o) = 1 - v(o), \quad (1)$$

где $v(o) \in [0, 1]$ – коэффициент видимости объекта o , $\alpha(o) \in [0, 1]$ – степень его перекрытия. Стандартная процедура обучения минимизирует математическое ожидание функции потерь при равномерном сэмпировании из совместного распределения $P(I, Y, M)$. Это предположение в полевых условиях нарушается: распределение $\alpha(o)$ смещено в область высоких значений, а сложность обучения нелинейно зависит от $\alpha(o)$. Задача состоит в том, чтобы заменить равномерный сэмплер адаптивным распределением P_t , изменяющимся по эпохам t , и ввести динамические веса $\lambda_t(I, Y, M)$ для компонент составной функции потерь.

Информационно-теоретический фреймворк обучения

Предлагаемая методология включает три согласованные стратегии, применяемые исключительно на этапе обучения детектора: поэтапное обучение с информационно-теоретической метрикой сложности, динамическое адаптивное взвешивание функции потерь и прогрессивную синтетическую аугментацию. Каждая стратегия адресует сторону проблемы перекрытия – временную структуру обучения, относительный вклад компонент потерь и характер аугментаций, а в совокупности они образуют целостный фреймворк.

Поэтапное обучение с информационно-теоретической метрикой сложности

Идея поэтапного обучения, впервые сформулированная Bengio и соавторами [5] и систематизированная в обзоре [6], заключается в предъявлении сети обучающих примеров в порядке возрастания сложности. Для задачи перекрытия «сложность» нельзя свести к одному параметру: она зависит как от величины $\alpha(o)$, так и от семантики объекта, и от информативности окружающего его контекста. Чтобы корректно описать эту многомерность, введем информационно-теоретическую меру сложности.

Пусть F_{vis} – признаки, извлекаемые из видимой части объекта, F_{ctx} – признаки контекстного окружения, O – полное представление объекта. Восстановимая информация определяется как сумма взаимной информации видимых признаков с объектом и условной взаимной информации контекста с объектом при заданных видимых признаках. Через условную энтропию это представление эквивалентно записи $I_{rec}(o) = H(O) - H(O | F_{vis}, F_{ctx})$. Нормированная мера сложности тогда:

$$D(o) = 1 - I_{rec}(o) / H(O) = H(O | F_{vis}, F_{ctx}) / H(O), \quad (2)$$

где $H(\cdot)$ – дифференциальная энтропия, оценка которой выполняется по плотности k -ближайших соседей в признаковом пространстве [6]. Значение $D(o) \in [0,1]$ показывает, насколько недостаточно видимой и контекстной информации для надежной реконструкции объекта. На основании этой меры определяется эмпирирующее распределение $\pi_t(D)$, которое выбирает примеры со сложностью, близкой к текущему порогу $D_{max}(t)$:

$$D_{max}(t) = D_{init} + (1 - D_{init}) \cdot \sigma(t / T), \quad (3)$$

где $D_{init} = 0,3$ – начальный порог сложности, T – общее число эпох обучения, σ – сигмоидальная функция. Сигмоидальный профиль обеспечивает плавный переход от легких примеров к трудным и согласуется с эмпирическими наблюдениями [6]. Постепенное расширение границы $D_{max}(t)$ реализует последовательность обучения, которая критически важна в задачах полевого мониторинга: на ранних эпохах сеть формирует устойчивые фрагментарные признаки на легких примерах, а в дальнейшем учится восстанавливать объекты с сильным перекрытием, не теряя ранее усвоенных представлений.

Динамическое адаптивное взвешивание функции потерь на основе байесовской оценки неопределенности

Совокупная функция потерь в задаче обнаружения перекрытых объектов включает несколько компонент: классификационную L_{cls} , локализационную L_{loc} , потерю внимания L_{att} , потерю восстановления признаков L_{comp} и потерю согласованности L_{cons} . Применение фиксированных весовых коэффициентов игнорирует и эмпл-специфические особенности (для сильно перекрытых объектов критичнее восстановление признаков), и временные фазы обучения (на ранних эпохах важнее классификация, на поздних – точная локализация). В [7] показано, что взвешивание потерь через гомоскедастическую неопределенность обеспечивает ощутимый прирост качества; в [8] родственная идея реализована в фокальной потере для балансировки легких и сложных примеров. Развивая эту линию исследований для составных потерь при частичной наблюдаемости, предлагается следующее правило.

Неопределенность каждой компоненты k оценивается методом *Monte Carlo Dropout*, теоретически обоснованным в [9] как байесовская аппроксимация. На каждой итерации детектор прогоняется $S=10$ раз с активным *dropout*, и выборочная дисперсия u_k предсказаний принимается за оценку неопределенности. Адаптивный коэффициент вычисляется как:

$$\lambda_k(t) = \lambda_{k,0} \cdot \exp(-u_k / \tau), \quad k \in \{cls, loc, att, comp, cons\}, \quad (4)$$

где $\lambda_{k,0}$ – начальный весовой коэффициент компоненты, u_k – оценка ее выборочной дисперсии по S dropout-проходам, $\tau = 0,5$ – температурный параметр, регулирующий чувствительность правила. Высокая неопределенность указывает на плохо освоенную компоненту, и она получает увеличенный вес на следующем шаге градиентного спуска. После каждого обновления коэффициенты нормируются так, чтобы их сумма оставалась постоянной – это предотвращает вырождение составной функции потерь в одну компоненту, что особенно важно при длинных циклах переобучения, типичных для систем предиктивного мониторинга.

Прогрессивная синтетическая аугментация перекрытий

Применяемые на практике аугментации перекрытий – это прямоугольные маски, *random erasing* [10] и аналогичные формируют распределение синтетических искажений, плохо согласованное со статистикой реальной полевой сцены, что приводит к разрыву «синтетика – реальность». Особенно остро это проявляется в задачах БПЛА-инспекции, где реальные окклюдеры имеют сложную органическую форму, а не прямоугольную. Предлагается трехэтапная прогрессивная схема, в которой реалистичность и сложность маскирующих объектов синхронизированы с расписанием обучения. На стадии 1 (эпохи 1-100) применяются прямоугольные маски; на стадии 2 (эпохи 101-200) – маски с органическими очертаниями,

имитирующие соседние конструкции; на стадии 3 (эпохи 201-320) – маски, синтезируемые условным GAN-генератором, обученным на парах «чистое изображение – реальная маска перекрытия». Итоговая маска формируется как взвешенная комбинация трех типов:

$$M_{final}(t) = w_1(t) \cdot M_{rect} + w_2(t) \cdot M_{organic} + w_3(t) \cdot M_{GAN}, \quad (5)$$

где веса $w_i(t)$ задаются косинусным профилем, обеспечивающим плавный переход между стадиями. Синхронизация PSOА с расписанием поэтапного обучения обеспечивает синергический эффект: легкие примеры из расписания получают простые прямоугольные маски и используются для формирования базы фрагментарных признаков, тогда как трудные примеры аугментируются максимально реалистичными GAN-перекрытиями и приближают обучающее распределение к статистике реальной полевой сцены, которая регистрируется бортовой камерой беспилотника при инспекции инфраструктурных объектов.

Методика и условия эксперимента

Экспериментальная проверка проведена на наборе данных MS COCO-Occluded – расширении классического MS COCO [11], в котором к 118 тыс. обучающих и 5 тыс. валидационных изображений добавлены пиксельные маски перекрытия трех уровней сложности (легкое, умеренное, сильное). Выбор продиктован тем, что MS COCO является общепринятым промышленным эталоном, что обеспечивает воспроизводимость и сопоставимость с другими исследованиями, расширенная аннотация покрывает 847 тыс. экземпляров, достаточно для статистически устойчивых выводов, а разнообразие категорий объектов делает выводы переносимыми на различные сценарии предиктивного мониторинга.

В качестве базовых детекторов используются три однопроходные модели семейства YOLO: YOLOv8-x, YOLOv9-c [12] и YOLOv10-m [13]. Выбор продиктован практикой развертывания на периферийных вычислительных устройствах: именно YOLO-семейство массово применяется в полевых системах машинного зрения благодаря балансу точности и скорости инференса 25:30 кадров в секунду. Здесь YOLOv8-x представляет современный CNN-канон, YOLOv9-c реализует концепцию программируемой градиентной информации, а YOLOv10-m исключает процедуру подавления немаксимумов, что упрощает интеграцию в управляющий контур. Эксперименты выполнены на четырех ускорителях NVIDIA A100 80 ГБ при размере мини-батча 64, с оптимизатором *AdamW*, косинусным расписанием темпа обучения и смешанной точностью FP16. Итоговая валидация выполнена методом 5-блочной перекрестной проверки. Кроме стандартной метрики mAP@0,5 [11] применяются специализированные метрики, введенные в [3]. Основной является *Fragment-Aware mAP* (FA-mAP) – взвешенное по степени перекрытия среднее значение точности, в котором сильно перекрытые объекты получают больший вклад:

$$FA - mAP = \frac{\sum_o w(\alpha(o)) \cdot AP(o)}{\sum_o w(\alpha(o))}, \quad w(\alpha) = 1 + \gamma \cdot \alpha, \quad (6)$$

где $\gamma = 1,5$ – коэффициент усиления, эмпирически калиброванный по согласованности с экспертной оценкой; $AP(o)$ – средняя точность для объекта o ; $\alpha(o)$ – степень его перекрытия.

В качестве дополнительной метрики используется коэффициент устойчивости (Robustness Score, RS), определяемый как отношение FA-mAP при сильном перекрытии к FA-mAP при отсутствии перекрытия и характеризующий сохранение производительности модели при росте α .

Результаты и их обсуждение

В табл. 1 приведено сравнение базовой архитектуры ACRAFD [3], обученной по стандартной процедуре, с полным предложенным фреймворком, примененным поверх той же архитектуры ACRAFD, а также вклад каждой из стратегий по отдельности. Архитектура между

не изменяется – изменяется только процедура обучения. Все значения получены на валидационной части MS COCO-Occluded.

Таблица 1.
Влияние адаптивных стратегий обучения на качество и эффективность обучения детектора на MS COCO-Occluded

Table 1.
Influence of adaptive learning strategies on the quality and efficiency of detector training on MS COCO-Occluded

Метод обучения	FA-mAP, %	mAP@0,5, %	RS, %	Эпохи
ACRAFD (базовое обучение)	81,7	81,7	94,8	350
ACRAFD + поэтапное обучение	86,1	86,4	97,2	217
ACRAFD + динамические веса	84,6	84,9	96,1	315
ACRAFD + прогрессивная аугментация	84,3	84,6	95,7	328
ACRAFD + полный фреймворк	89,3	89,7	98,4	217
Прирост к базовому ACRAFD	+7,6	+8,0	+3,6	–38 %

Наибольший индивидуальный вклад вносит поэтапное обучение (+4,4 % FA-mAP при сокращении числа эпох на 38 %), что согласуется с теоретическими ожиданиями [5, 6]. Адаптивное взвешивание добавляет еще +2,9 % FA-mAP за счет более рационального использования градиентной информации. Прогрессивная аугментация дает +2,6 %, причем ее вклад особенно заметен в зоне сильных перекрытий. Совокупный эффект (+7,6 %) превышает сумму индивидуальных вкладов (+4,7 %), что подтверждает наличие синергии между стратегиями: расписание обучения, неопределенность и реалистичность аугментаций взаимно усиливаются. Дополнительный интерес представляет анализ качества по уровням перекрытия (табл. 2), позволяющий понять, в каком именно режиме фреймворк дает наибольший эффект.

Таблица 2.
Стратификация качества обнаружения (FA-mAP, %) по уровням перекрытия объектов

Table 2.
Stratification of detection quality (FA-mAP, %) by object occlusion levels

Метод обучения	Легкое (10-30 %)	Умеренное (30-50 %)	Сильное (50-70 %)	Среднее
ACRAFD (базовое обучение)	91,8	87,3	78,9	86,0
ACRAFD + поэтапное обучение	95,2	91,7	84,1	90,3
ACRAFD + динамические веса	93,7	89,6	81,4	88,2
ACRAFD + прогрессивная аугментация	93,4	89,2	82,7	88,4
ACRAFD + полный фреймворк	96,8	93,4	87,2	92,5

Полученные данные показывают, что наибольший абсолютный прирост (+8,3 процентных пункта) обеспечивается именно в режиме сильного перекрытия, который и составляет основную трудность для систем предиктивного мониторинга. В этих условиях стан-

дартно обученная модель пропускает значительную долю дефектных или поврежденных объектов, тогда как предложенный фреймворк целенаправленно компенсирует именно этот режим работы. Для оценки возможностей переноса предложенного подхода на различные архитектуры YOLO в табл. 3 приведены значения метрики $mAP@0,5$, полученные при применении одной процедуры обучения. Базовое обучение здесь означает стандартную процедуру с равномерным сэмплированием и фиксированными весами потерь.

Таблица 3.
Перенос предложенного фреймворка на различные архитектуры YOLO.
Метрика – $mAP@0,5$, %

Table 3.
Transfer of the proposed framework to various YOLO architectures. Metric: $mAP@0,5$, %

Архитектура	Базовое обучение	Адаптивное обучение	Прирост, %
YOLOv8-x	71,2	79,5	+8,3
YOLOv9-c	71,8	80,9	+9,1
YOLOv10-m	70,5	78,8	+8,3
Базовая модель ACRAFD	81,7	89,7	+8,0

Значения приростов в диапазоне 8,0:9,1 % при среднеквадратичном отклонении менее половины процента показывают, что предложенные стратегии не привязаны к конкретной архитектуре и могут быть применены к разным моделям, совместимой с градиентной оптимизацией. Это важно для практики, так как парки бортовых вычислителей беспилотников и периферийных устройств обычно стандартизованы под единое семейство детекторов, и предложенный подход может быть внедрен без замены существующего инференс-стека.

Заключение

В работе предложен и экспериментально проверен фреймворк адаптивных стратегий обучения для робастного обнаружения объектов при частичном перекрытии в системах предиктивного мониторинга на основе технического зрения. Он объединяет три согласованные компоненты: поэтапное обучение с информационно-теоретической мерой сложности, динамическое адаптивное взвешивание функции потерь на основе байесовской оценки неопределенности и прогрессивную синтетическую аугментацию перекрытий. Формализована сложность перекрытия через информационно-теоретическую меру восстановимой информации, построены схема взвешивания, опирающаяся на байесовскую неопределенность, и иерархическая схема прогрессивной аугментации, согласованная с расписанием обучения. Применение фреймворка к ранее предложенной архитектуре ACRAFD на наборе MS COCO-Occcluded [3] повышает метрику *Fragment-Aware mAP* с 81,7 до 89,3 % при одновременном сокращении числа эпох обучения на 38 %. Эксперименты переносимости подтверждают сохранение прироста в диапазоне 8,0:9,1 % на детекторах YOLOv8-x, YOLOv9-c и YOLOv10-m.

Полученные результаты позволяют рекомендовать предложенную методологию к практическому применению в системах предиктивного мониторинга на основе технического зрения, в задачах БПЛА-инспекции инфраструктурных объектов и автоматического контроля качества на периферийных вычислительных устройствах. Особенно важно, что все компоненты фреймворка действуют исключительно на этапе обучения и оставляют развернутую модель неизменной: это означает совместимость с существующими стеками инференса, отсутствие увеличения задержки и потребления памяти на бортовых вычислителях, а также возможность развертывания модели без изменения существующих эксплуатационных регла-

ментов. Дальнейшие исследования будут направлены на интеграцию протокола мета-переноса для быстрой адаптации к новым условиям съемки и на валидацию фреймворка на отраслевых наборах данных систем предиктивного обслуживания.

Библиографический список

1. **Wang A.** Robust object detection under occlusion with context-aware compositional nets / A. Wang, Y. Sun, A. Kortylewski, A. Yuille // *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on computer vision and pattern recognition (CVPR 2020)*. – Seattle, USA, 2020. – P. 12642–12651.
2. **Carion N.** End-to-end object detection with transformers / N. Carion, F. Massa, G. Synnaeve, N. Usunier, A. Kirillov, S. Zagoruyko // *Computer vision – ECCV 2020. Lecture notes in computer science*, vol. 12346. – Springer, Cham, 2020. – P. 213-229.
3. **Sichkar V.N.** Advanced contextual reconstruction architecture for robust object detection under partial occlusion // *Problems of artificial intelligence*. – 2026. – Vol. 40. – P. 25-40.
4. **Finn C.** Model-agnostic meta-learning for fast adaptation of deep Networks / C. Finn, P. Abbeel, S. Levine // *Proceedings of the 34th International conference on machine learning (ICML 2017)*. PMLR, vol. 70. – Sydney, Australia, 2017. – P. 1126-1135.
5. **Bengio Y.** Curriculum learning / Y. Bengio, J. Louradour, R. Collobert, J. Weston // *Proceedings of the 26th Annual international conference on machine learning (ICML 2009)*. – Montreal, Canada, 2009. – P. 41-48.
6. **Soviany P.** Curriculum learning: a survey / P. Soviany, R.T. Ionescu, P. Rota, N. Sebe // *International journal of computer vision*. – 2022. – Vol. 130. – P. 1526-1565. – Springer.
7. **Kendall A.** Multi-task learning using uncertainty to weigh losses for scene geometry and semantics / A. Kendall, Y. Gal, R. Cipolla // *Proceedings of the IEEE Conference on computer vision and pattern recognition (CVPR 2018)*. – Salt Lake City, USA, 2018. – P. 7482-7491.
8. **Lin T.-Y.** Focal loss for dense object detection / T.-Y. Lin, P. Goyal, R. Girshick, K. He, P. Dollár // *Proceedings of the IEEE International conference on computer vision (ICCV 2017)*. – Venice, Italy, 2017. – P. 2980-2988.
9. **Gal Y.** Dropout as a bayesian approximation: representing model uncertainty in deep learning / Y. Gal, Z. Ghahramani // *Proceedings of the 33rd International conference on machine learning (ICML 2016)*. PMLR, vol. 48. – New York, USA, 2016. – P. 1050-1059.
10. **Yun S.** CutMix: regularization strategy to train strong classifiers with localizable features / S. Yun, D. Han, S.J. Oh, S. Chun, J. Choe, Y. Yoo // *Proceedings of the IEEE/CVF International conference on computer vision (ICCV 2019)*. – Seoul, Korea, 2019. – P. 6023-6032.
11. **Lin T.-Y.** Microsoft COCO: common objects in Context / T.-Y. Lin, M. Maire, S. Belongie, J. Hays, P. Perona, D. Ramanan, P. Dollár, C.L. Zitnick // *Computer Vision – ECCV 2014. Lecture notes in computer science*, vol. 8693. – Springer, Cham, 2014. – P. 740-755.
12. **Wang C.-Y.** YOLOv9: learning what you want to learn using programmable gradient information / C.-Y. Wang, I.-H. Yeh, H.-Y.M. Liao // *Computer vision – ECCV 2024. Lecture notes in computer science*, vol. 15089. – Springer, 2025. – P. 1-21.
13. **Wang A.** YOLOv10: Real-time end-to-end object detection / A. Wang, H. Chen, L. Liu, K. Chen, Z. Lin, J. Han, G. Ding // *Advances in neural information processing systems*. – 2024. – Vol. 37. – P. 107984-108011.
14. **He K.** Deep residual learning for image recognition / K. He, X. Zhang, S. Ren, J. Sun // *Proceedings of the IEEE Conference on computer vision and pattern recognition (CVPR 2016)*. – Las Vegas, USA, 2016. – P. 770-778.
15. **Ren S.** Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks / S. Ren, K. He, R. Girshick, J. Sun // *Advances in neural information processing systems*. – 2015. – Vol. 28. – P. 91-99.
16. **Vaswani A.** Attention is All You Need / A. Vaswani, N. Shazeer, N. Parmar, J. Uszkoreit, L. Jones, A.N. Gomez, Ł. Kaiser, I. Polosukhin // *Advances in neural information processing systems*. – 2017. – Vol. 30. – P. 5998-6008.
17. **Zhang S.** Occlusion-aware R-CNN: detecting pedestrians in a crowd / S. Zhang, L. Wen, X. Bian, Z. Lei, S.Z. Li // *Proceedings of the european conference on computer vision (ECCV 2018)*. Lecture notes in computer science. – Springer, Cham, 2018. – P. 637-653.

18. **Zhao Y.** DETRs Beat YOLOs on real-time object detection / Y. Zhao, W. Lv, S. Xu, J. Wei, G. Wang, Q. Dang, Y. Liu, J. Chen // *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on computer vision and pattern recognition (CVPR 2024)*. – Seattle, USA, 2024. – P. 16965-16974.
19. **Oks S.J.** Cyber-physical systems in the context of industry 4.0: a review, categorization and outlook / S.J. Oks, M. Jalowski, M. Lechner, S. Mirschberger, M. Merklein, B. Vogel-Heuser, K.M. Möslin // *Information systems frontiers*. – 2024. – Vol. 26, no. 5. – P. 1731-1772. – Springer.
20. **Carvalho T.P.** A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance / T.P. Carvalho, F.A.A.M.N. Soares, R. Vita, R.P. Francisco, J.P. Basto, S.G.S. Alcalá // *Computers and industrial engineering*. – 2019. – Vol. 137. – Article 106024. – Elsevier. – DOI: 10.1016/j.cie.2019.106024 (в DOI нуждается в проверке).
21. **DeVries T.** Improved regularization of convolutional neural networks with cutout [Электронный ресурс] / T. DeVries, G.W. Taylor. – arXiv preprint arXiv:1708.04552. – 2017. – URL: <https://arxiv.org/abs/1708.04552> (дата обращения: 17.04.2026).
22. **Krizhevsky A.** ImageNet classification with deep convolutional neural networks / A. Krizhevsky, I. Sutskever, G.E. Hinton // *Advances in neural information processing systems*. – 2012. – Vol. 25. – P. 1097–1105.

References

1. Wang A., Sun Y., Kortylewski A., Yuille A. Robust object detection under occlusion with context-aware compositional nets. In: *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2020)*. Seattle, USA; 2020. p. 12642-12651. (in English).
2. Carion N., Massa F., Synnaeve G., Usunier N., Kirillov A., Zagoruyko S. End-to-end object detection with transformers. In: *Computer Vision – ECCV 2020. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 12346. Springer, Cham; 2020. p. 213-229. (in English).
3. Sichkar V.N. Advanced contextual reconstruction architecture for robust object detection under partial occlusion. *Problemy iskusstvennogo intellekta* [Problems of Artificial Intelligence]. 2026;40:25-40. (in English).
4. Finn C., Abbeel P., Levine S. Model-agnostic meta-learning for fast adaptation of deep networks. In: *Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning (ICML 2017)*. PMLR, vol. 70. Sydney, Australia; 2017. p. 1126-1135. (in English).
5. Bengio Y., Louradour J., Collobert R., Weston J. Curriculum learning. In: *Proceedings of the 26th Annual International Conference on Machine Learning (ICML 2009)*. Montreal, Canada; 2009. p. 41-48. (in English).
6. Soviany P., Ionescu R.T., Rota P., Sebe N. Curriculum learning: a survey. *International Journal of Computer Vision*. 2022;130:1526-1565. Springer. (in English).
7. Kendall A., Gal Y., Cipolla R. Multi-task learning using uncertainty to weigh losses for scene geometry and semantics. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2018)*. Salt Lake City, USA; 2018. p. 7482-7491. (in English).
8. Lin T.-Y., Goyal P., Girshick R., He K., Dollár P. Focal loss for dense object detection. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV 2017)*. Venice, Italy; 2017. p. 2980-2988. (in English).
9. Gal Y., Ghahramani Z. Dropout as a Bayesian approximation: representing model uncertainty in deep learning. In: *Proceedings of the 33rd International Conference on Machine Learning (ICML 2016)*. PMLR, vol. 48. New York, USA; 2016. p. 1050-1059. (in English).
10. Yun S., Han D., Oh S.J., Chun S., Choe J., Yoo Y. CutMix: regularization strategy to train strong classifiers with localizable features. In: *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV 2019)*. Seoul, Korea; 2019. p. 6023-6032. (in English).
11. Lin T.-Y., Maire M., Belongie S., Hays J., Perona P., Ramanan D., et al. Microsoft COCO: common objects in context. In: *Computer Vision – ECCV 2014. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 8693. Springer, Cham; 2014. p. 740-755. (in English).
12. Wang C.-Y., Yeh I.-H., Liao H.-Y.M. YOLOv9: learning what you want to learn using programmable gradient information. In: *Computer Vision – ECCV 2024. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 15089. Springer; 2025. p. 1-21. (in English).
13. Wang A., Chen H., Liu L., Chen K., Lin Z., Han J., et al. YOLOv10: Real-time end-to-end object detection. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2024;37:107984-108011. (in English).

14. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep residual learning for image recognition. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2016). Las Vegas, USA; 2016. p. 770-778. (in English).
15. Ren S., He K., Girshick R., Sun J. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2015;28:91-99. (in English).
16. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A.N., et al. Attention is all you need. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2017;30:5998-6008. (in English).
17. Zhang S., Wen L., Bian X., Lei Z., Li S.Z. Occlusion-aware R-CNN: detecting pedestrians in a crowd. In: Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV 2018). Lecture Notes in Computer Science. Springer, Cham; 2018. p. 637-653. (in English).
18. Zhao Y., Lv W., Xu S., Wei J., Wang G., Dang Q., et al. DETRs beat YOLOs on real-time object detection. In: Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2024). Seattle, USA; 2024. p. 16965-16974. (in English).
19. Oks S.J., Jalowski M., Lechner M., Mirschberger S., Merklein M., Vogel-Heuser B., et al. Cyber-physical systems in the context of industry 4.0: a review, categorization and outlook. *Information Systems Frontiers*. 2024;26(5):1731-1772. Springer. (in English).
20. Carvalho T.P., Soares F.A.A.M.N., Vita R., Francisco R.P., Basto J.P., Alcalá S.G.S. A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. *Computers and Industrial Engineering*. 2019;137:106024. Elsevier. doi: 10.1016/j.cie.2019.106024. (in English).
21. DeVries T., Taylor G.W. Improved regularization of convolutional neural networks with cutout [Internet]. arXiv preprint arXiv:1708.04552. 2017. Available from: <https://arxiv.org/abs/1708.04552> [accessed 2026 Apr 17]. (in English).
22. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2012;25:1097-1105. (in English).

*Дата поступления
в редакцию: 16.05.2026*

*Дата принятия
к публикации: 17.07.2026*

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 539.1.074.8

EDN OLDYTA

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОСЛАБЛЕНИЯ ПУЧКА ГАММА-КВАНТОВ, НАКЛОННО ПАДАЮЩЕГО НА БАРЬЕР

Е.С. ЕгороваORCID: 0009-0003-8178-941X email: egorova2002@yandex.ruНижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***А.Н. Семенов**ORCID: 0009-0005-8532-4374 email: semenenko7@yandex.ruНижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***В.И. Мельников**ORCID: 0009-0001-2864-0136 email: sgu-1@yandex.ruНижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Представлены результаты экспериментального исследования и теоретического анализа угловой зависимости ослабления узкого пучка γ -квантов радионуклида Am-241 (тип источника ИГИА-5м) с энергией фотонов 59,54 кэВ. В качестве исследуемых образцов использованы плоские барьеры из следующих материалов: медь, латунь, графит. Актуальность работы обусловлена необходимостью оптимизации массогабаритных характеристик биологической защиты ядерных энергетических установок, в том числе, судового базирования, космического назначения и мобильных медицинских комплексов, где учет геометрии облучения позволяет существенно снизить толщину барьеров без потери эффективности. Эксперименты выполнены на специализированном стенде с коллимированным до 2 мм пучком γ -квантов и сцинтилляционным детектором. Измерения проведены для углов падения γ -квантов от 0° до 60° с шагом 20° . Теоретическое описание выполнено на основе экспоненциального закона ослабления с учетом зависимости эффективной толщины барьера от угла: $d_{\text{эфф}} = \frac{x_0}{\cos \theta}$. Показано, что увеличение угла падения приводит к росту кратности ослабления излучения для всех исследованных материалов, при этом экспериментальные данные хорошо согласуются с теоретическими расчетами. Результаты подтверждают целесообразность учета углов падения при проектировании биологической защиты и могут быть использованы в учебно-лабораторном практикуме для студентов технических специальностей.

Ключевые слова: биологическая защита; γ -излучение, Am-241 ; угловая зависимость; ослабление; фотоэффект; медь; латунь; графит; коллимация; экспериментальные методы.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Егорова, Е.С. Экспериментальное исследование и теоретический анализ ослабления пучка гамма-квантов, наклонно падающего на барьер / Е.С. Егорова, А.Н. Семенов, В.И. Мельников // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2026. № 3. С. 34-46. EDN: OLDYTA

EXPERIMENTAL INVESTIGATION AND THEORETICAL ANALYSIS OF ATTENUATION OF A GAMMA-RAY BEAM OBLIQUELY INCIDENT ON A BARRIER

E.S. EgorovaORCID: 0009-0003-8178-941X email: egorova2002@yandex.ruNizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.N. SemenenkoORCID: 0009-0005-8532-4374 email: semenenko7@yandex.ru

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R. E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

V.I. MelnikovORCID: 0009-0001-2864-0136 email: sgu-1@yandex.ru

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R. E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The paper presents the results of an experimental investigation and theoretical analysis of the angular dependence of attenuation of a narrow gamma-ray beam from a radionuclide Am-241 (IGIA-5m source type) with a photon energy of 59.54 keV. The test samples were flat barriers made of the following materials: copper, brass, graphite. The relevance of the work is due to the need to optimize the mass and size characteristics of biological protection for nuclear power plants, including ship-based, space-based and mobile medical complexes, where taking into account the irradiation geometry can significantly reduce the barriers thickness without loss of efficiency. The experiments were performed on a specialized test bench with a gamma-ray beam collimated to 2 mm and a scintillation detector. Measurements were carried out for gamma-ray angles of incidence from 0° to 60° in increments of 20°. The theoretical description is based on the exponential attenuation law taking into account the dependence of the effective barrier thickness on the angle: $d_{eff} = \frac{x_0}{\cos \theta}$. It is shown that increasing the angle of incidence leads to an increase in the radiation attenuation coefficient for all the studied materials, while the experimental data are in good agreement with theoretical calculations. The obtained results confirm the feasibility of taking into account the angles of incidence when designing biological protection and can be used in educational and laboratory practice for engineering students.

Key words: biological protection; gamma radiation; Am-241; angular dependence; attenuation; photoelectric effect; copper; brass; graphite; collimation; experimental methods.

FOR CITATION: E.S. Egorova, A.N. Semenenko, V.I. Melnikov. Experimental investigation and theoretical analysis of attenuation of a gamma-ray beam obliquely incident on a barrier. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 3. Pp. 34-46. EDN: OLDYTA

Введение

Биологическая защита ядерных энергетических установок является одним из ключевых элементов обеспечения радиационной безопасности персонала и окружающей среды. Традиционные подходы к проектированию защиты основываются на выборе материала и его толщины, обеспечивающих требуемую кратность ослабления излучения при нормальном падении пучка [1, 2]. Однако в реальных условиях эксплуатации источники ионизирующего излучения могут располагаться под различными углами относительно защитных барьеров, а сами барьеры имеют сложную геометрическую форму. Вопрос о влиянии угла падения излучения низкоэнергетического источника на эффективность ослабления исследован недостаточно полно. Большинство справочных данных приводят значения линейных и массовых коэффициентов ослабления только для геометрии узкого пучка при нормальном падении [3, 4]. Вместе с тем, при косом падении эффективная толщина барьера увеличивается, что позволяет уменьшить массогабаритные характеристики защиты – фактор, особенно важный для судовых ядерных установок [5].

Цель настоящей работы – экспериментальное определение зависимости ослабления узкого пучка γ -излучения низкой энергии от угла падения на плоский барьер из различных материалов (медь, латунь, графит) и сравнение полученных данных с теоретической моделью.

Теоретические основы

При прохождении через вещество узкий моноэнергетический пучок γ -излучения ослабляется по экспоненциальному закону [6]:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x} \quad (1)$$

где:

I_H – начальная интенсивность падающего на барьер пучка γ -квантов, $\frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$;

I – интенсивность пучка γ -квантов после прохождения поглощающего слоя толщиной x , $\frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$;

μ – линейный коэффициент ослабления, см^{-1} ;

x – толщина барьера, см.

Линейный коэффициент ослабления связан с массовым коэффициентом μ_m соотношением:

$$\mu = \mu_m \cdot \rho \quad (2)$$

где:

μ – линейный коэффициент ослабления, см^{-1} ;

μ_m – массовый коэффициент ослабления, $\frac{\text{см}^2}{\text{г}}$;

ρ – плотность материала, $\frac{\text{г}}{\text{см}^3}$.

При косом падении пучка под углом θ к нормали эффективная толщина барьера возрастает:

$$x_{\text{эфф}} = \frac{x_0}{\cos \theta} \quad (3)$$

где:

$x_{\text{эфф}}$ – эффективная толщина барьера, см;

x_0 – физическая толщина барьера, см;

θ – угол падения излучения относительно нормали, °.

Соответственно, теоретическая зависимость интенсивности пучка γ -квантов от угла падения описывается выражением:

$$I(\theta) = I_H \cdot e^{\frac{-\mu \cdot x_0}{\cos \theta}} \quad (4)$$

где:

I_H – начальная интенсивность падающего на барьер пучка γ -квантов, $\frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$;

$I(\theta)$ – зависимость интенсивности от угла падения, $\frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$;

μ – линейный коэффициент ослабления, см^{-1} ;

x_0 – физическая толщина барьера, см;

θ – угол падения пучка γ -квантов относительно нормали, °.

Для энергии γ -квантов Am-241 (59,54 кэВ) доминирующим процессом взаимодействия является фотоэлектрическое поглощение, сечение которого пропорционально Z^5 , однако это справедливо лишь для материалов с высоким атомным номером. В случае меди ($Z = 29$) и латуни ($Z \sim 30$) оно еще заметно, в графите ($Z = 6$) этот процесс пренебрежимо мал, и главную роль играет комптоновское рассеяние. На основе данных NIST [7] были рассчитаны линейные коэффициенты ослабления для исследуемых материалов, указанные в табл. 1.

В качестве источника ионизирующего излучения использовался Am-241. Несмотря на то, что он является α -излучателем, его выбор для изучения взаимодействия γ -квантов с веществом физически обоснован и широко распространен в исследовательской практике. Кажущееся противоречие снимается при рассмотрении схемы распада изотопа Am-241. Он претерпевает α -распад с периодом полураспада 432,6 г., превращаясь в изотоп Np-237 [9]. Однако α -распад происходит не напрямую в основное состояние дочернего ядра, а преимущественно (более чем в 99 % случаев) на его возбужденные уровни [7]. Возбужденное ядро Np-237, находясь на высокоэнергетичном уровне, практически мгновенно (за время $\sim 10^{-12}$ с) переходит в основное состояние, испуская избыток энергии в виде γ -квантов. Именно этот процесс является источником γ -излучения источника на основе Am-241. Ключевой для большинства применений является γ -линия с энергией 59,54 кэВ, которая возникает при переходе дочернего ядра Np-237 из первого возбужденного состояния в основное [9].

Таблица 1.
Линейные коэффициенты ослабления для исследуемых материалов

Table 1.
Linear attenuation coefficients for the studied materials

Материал	Плотность (ρ), $\frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	Массовый коэффициент ослабления (μ_m), $\frac{\text{см}^2}{\text{г}}$	Линейный коэффициент ослабления (μ), см^{-1}
Медь	8,920	1,593	14,210
Графит	2,260	0,175	0,396
Латунь*	8,750	1,596	13,970

На рис.1 изображена схема распада Am-241.

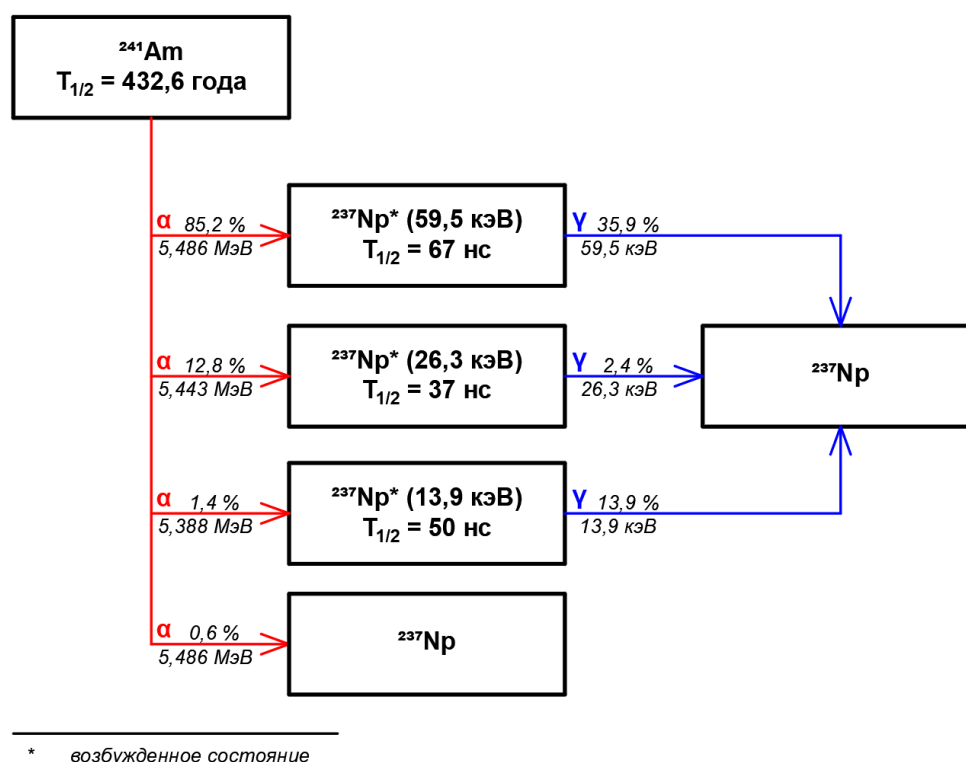


Рис. 1. Распад Am-241

Fig. 1. Am-241 decay

Таким образом, источник Am-241 является не «чистым» α -излучателем, а комбинированным α - и γ -излучателем, где γ -кванты являются вторичным продуктом α -распада. Для экспериментальных работ по изучению ослабления γ -излучения важна монохроматичность источника. Пик 59,54 кэВ является узким, четким и доминирующим в γ -спектре Am-241. Хотя существуют и другие, более слабые γ -переходы (например, 26,4 кэВ), их интенсивность на порядки ниже, и они не влияют на результаты измерений в пике полного поглощения 59,54 кэВ [9]. Выбор Am-241 обусловлен двумя факторами. Во-первых, энергия достаточно велика, чтобы проникать через образцы (барьеры) толщиной от десятых долей миллиметра до единиц сантиметров в зависимости от материала, что удобно для лабораторных исследований [10]. Во-вторых, для биологической защиты от излучения Am-241 не требуется массивное экранирование, что упрощает конструкцию экспериментальной установки [10].

*Для латуни принят усредненный состав: Cu – 90 %, Zn – 10 % [8].

Для того изучения именно γ -излучения, нужно исключить попадание α -частиц в детектор. Исполнение источника на основе Am241, а также конструкция экспериментальной установки полностью исключают попадание α -частиц в чувствительный объем детектора.

Методика эксперимента

Исследования проводились на специализированном стенде, схема которого представлена на рис. 2 (вид сверху).

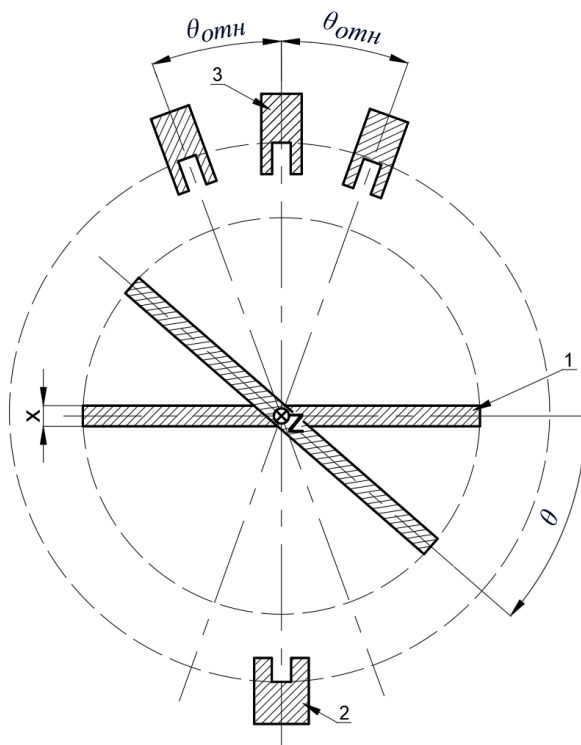


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

1 – защитный барьер; 2 – контейнер с источником; 3 – детектор

Fig. 2. Schematic diagram of the experimental setup:

1 – protective barrier; 2 – container with source; 3 – detector

В ходе эксперимента контейнер с источником (2) оставался неподвижным. Защитный барьер (1) и детектор (3) вращались вокруг оси Z. Ось Z перпендикулярна плоскости основания установки и направлена на наблюдателя. Угол поворота барьера относительно источника θ изменялся в диапазоне от 0° до 60° с шагом 20° . При фиксации каждого значения угла поворота барьера θ детектор перемещался относительно оси «источник – детектор» на относительный угол $\theta_{отн}$ в диапазоне от -6° до $+6^\circ$ с шагом 1° . Отрицательные значения соответствуют повороту детектора против часовой стрелки относительно указанной оси, положительные – по часовой стрелке. Коллиматоры диаметром 2 мм использовались как для источника, так и для детектора. Расстояние от барьера до источника составляло 60 мм, а до детектора – 70 мм. Регистрация γ -квантов осуществлялась с помощью блока детектирования БДЕГ-25(25)Н со сцинтилляционным детектором на основе кристалла NaI(Tl) и вакуумным фотоумножителем R3998. Малая площадь чувствительной области за счет применения дополнительного коллиматора ($\varnothing$ 2 мм) обеспечила регистрацию только центральной части коллимированного пучка, что минимизировало вклад рассеянного излучения. Измерения проводились с помощью спектрометрического комплекса модели СКС-07П-Г42, в частности в программе eSBS [11]. Интенсивность излучения рассчитывалась по формуле:

$$I = \frac{\bar{N}}{t} - I_{\text{фон}} \quad (5)$$

где:

I – интенсивность падающего на барьер пучка γ -квантов за вычетом фона, $\frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$;

N – скорость счета за время измерения t , имп;

t – время измерения, с;

$I_{\text{фон}}$ – интенсивность фонового излучения, $\frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$.

В данной работе предполагается прямая пропорциональность скорости счета импульсов и интенсивности пучка γ -квантов, так как опыт проводился в условиях низких скоростей счета, где влиянием мертвого времени детектирующей системы можно пренебречь. Статистическая погрешность измерений определялась на основе распределения Пуассона:

$$\sigma_{I(t)} = \sqrt{N} \quad (6)$$

$$\sigma_I = \frac{\sqrt{N}}{t} \quad (7)$$

Результаты

Основные результаты измерений следующие. Интенсивность прямого пучка γ -квантов источника Am-241 при коллимации составила $I_n = 84,380 \pm 1,315 \frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$, что значительно превышает уровень фона $I_{\text{фон}} = 0,363 \pm 0,038 \frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$. На рис. 3 представлена зависимость интенсивности $I(\theta)$ от относительного угла поворота детектора $\theta_{\text{отн}}$ в отсутствие барьера. На рис. 4-6 показаны зависимости интенсивности $I(\theta)$ от угла поворота барьера θ при различных фиксированных значениях $\theta_{\text{отн}}$. Все данные приведены за вычетом фона. Статистическая погрешность оценена как выборочное среднеквадратичное отклонение по трем повторениям. Измерение интенсивности пучка γ -квантов с коллиматором показало, что Am-241 дает достаточную для регистрации интенсивность. Интенсивность при прямом падении пучка γ -квантов без барьера: $I_n = 84,380 \pm 1,315 \frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$.

С помощью полученных данных были построены графики зависимости интенсивности I_θ от относительного поворота $\theta_{\text{отн}}$ детектора без барьера (рис. 3), а также графики зависимости интенсивности $I(\theta)$ от угла поворота барьера из различных материалов θ и относительного поворота $\theta_{\text{отн}}$ детектора (рис. 4-6). Все значения приведены с учетом фона и статистической погрешности. Статистическая погрешность измерений рассчитана как выборочное среднеквадратическое отклонение (СКО) в серии из трех повторений.

На основе линейных коэффициентов ослабления μ , определенных по базе данных NIST [7] для энергии $E = 59,54$ кэВ (табл. 1), и экспериментально измеренной интенсивности падающего коллимированного пучка γ -квантов $I_n = 84,380 \frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$ были рассчитаны теоретические зависимости интенсивности $I(\theta)$ по формуле (4). Приведенные данные демонстрируют, что интенсивность $I(\theta)$ для всех трех материалов монотонно убывает с ростом угла поворота θ , что обусловлено увеличением эффективной толщины барьера (3).

На рис. 7-9 представлены совмещенные графики, на которые вынесены как экспериментальные точки, так и теоретические, рассчитанные по формуле (4). Такое представление позволяет наглядно оценить степень соответствия теории и эксперимента для каждого материала.

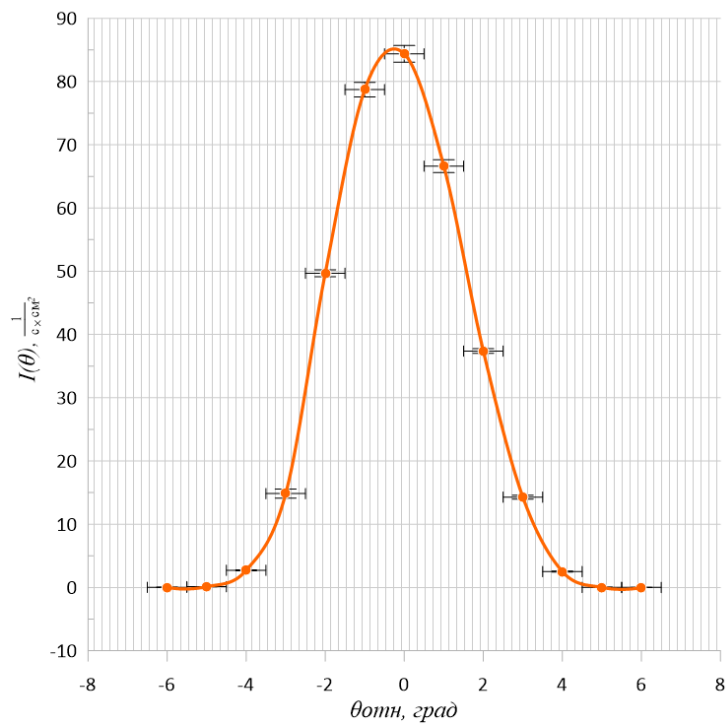


Рис. 3. Экспериментальная зависимость интенсивности без барьера I_0 от относительного угла поворота детектора $\theta_{\text{отн}}$

Fig. 3. Experimental dependence of the unshielded intensity I_0 on the detector relative rotation angle $\theta_{\text{отн}}$

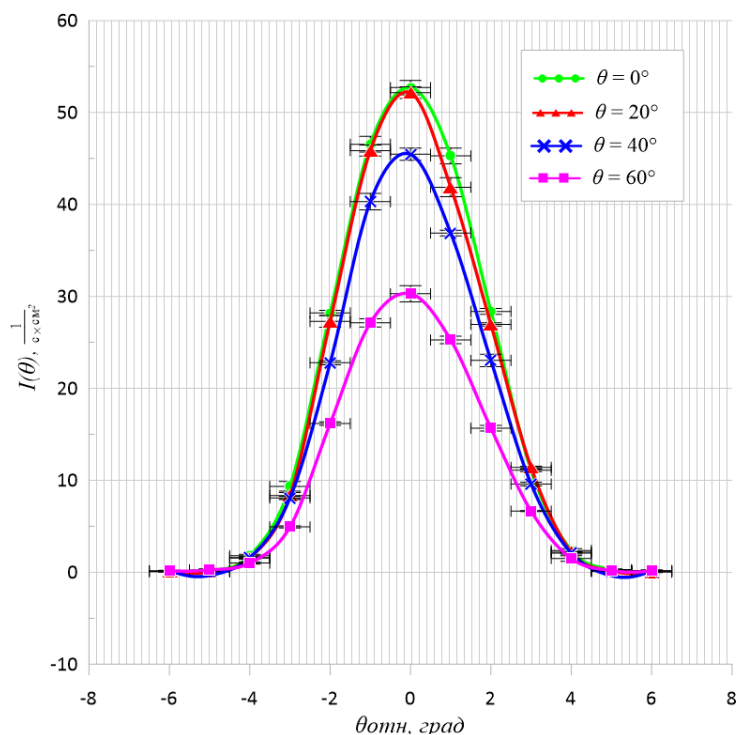


Рис. 4. Экспериментальная зависимость интенсивности $I(\theta)$ от угла падения θ для меди (0,4 мм)

Fig. 4. Experimental dependence of intensity $I(\theta)$ on the angle of incidence θ for copper (0,4 mm)

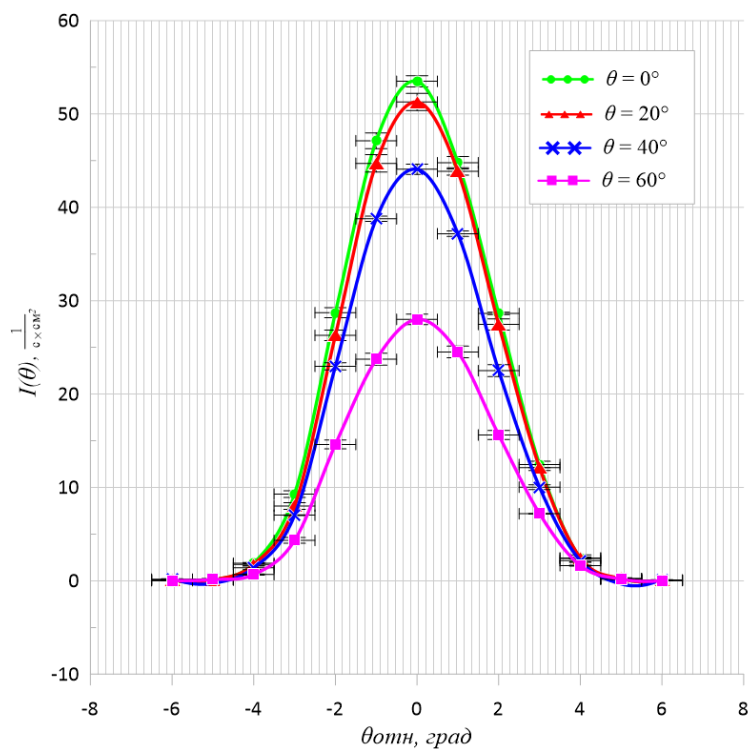


Рис. 5. Экспериментальная зависимость интенсивности $I(\theta)$ от угла падения θ для графита (20 мм)

Fig. 5. Experimental dependence of intensity $I(\theta)$ on the angle of incidence θ for graphite (20 mm)

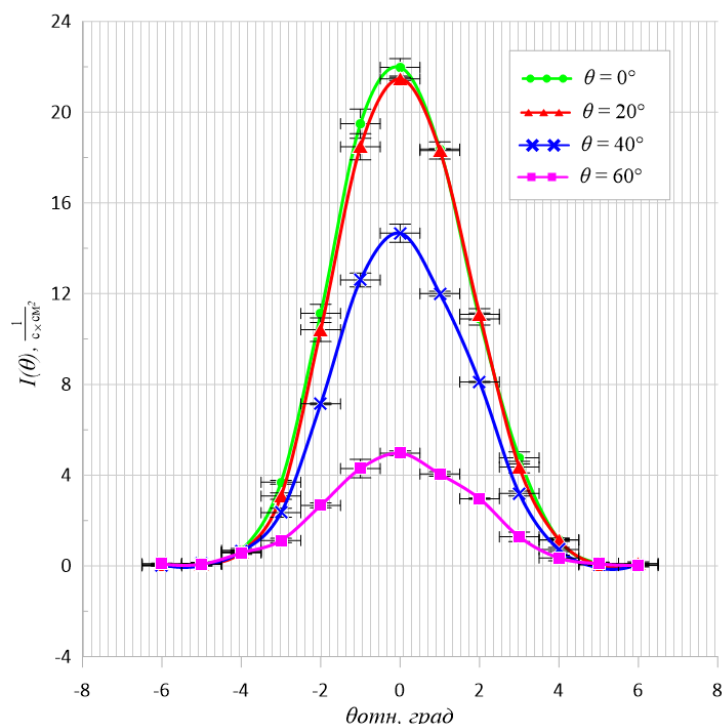


Рис. 6. Экспериментальная зависимость интенсивности $I(\theta)$ от угла падения θ барьера из латуни (1 мм)

Fig. 6. Experimental dependence of intensity $I(\theta)$ on the angle of incidence θ for brass (1 mm)

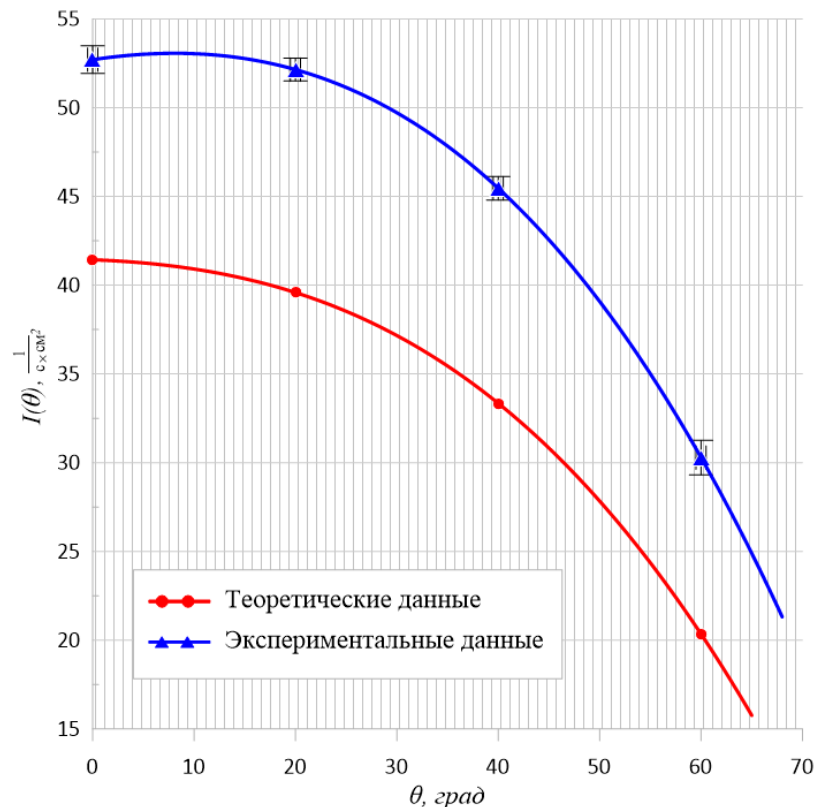


Рис. 7. Зависимость интенсивности от угла падения для барьера из меди (0,4 мм): экспериментальная и теоретическая кривая

Fig. 7. Dependence of intensity on the angle of incidence for a copper barrier (0,4 mm): experimental and theoretical curves

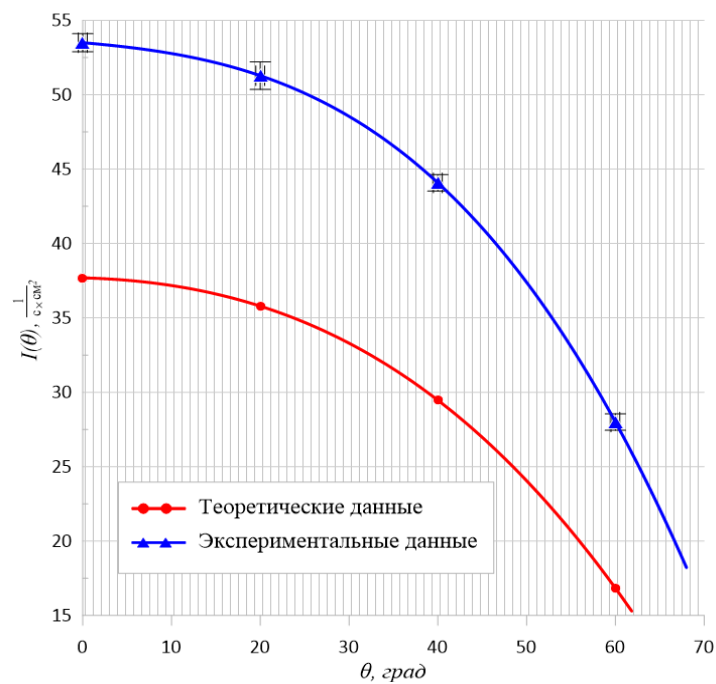


Рис. 8. Зависимость интенсивности от угла падения для барьера из графита (20 мм): экспериментальная и теоретическая кривая

Fig. 8. Dependence of intensity on the angle of incidence for a for graphite barrier (20 mm): experimental and theoretical curves

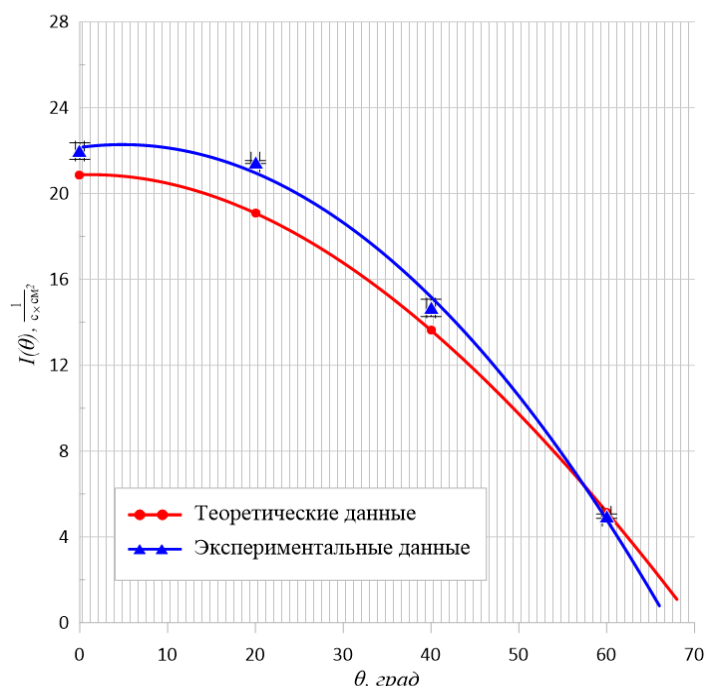


Рис. 9. Зависимость интенсивности от угла падения для барьера из латуни (1 мм): экспериментальная и теоретическая кривая

Fig. 9. Dependence of intensity on the angle of incidence for a for brass barrier (1 mm): experimental and theoretical curves

Для количественного сравнения ослабляющей способности материалов при нормальном падении ($\theta = 0^\circ$) рассчитаны кратность ослабления K по формуле (8) и линейные коэффициенты ослабления по формуле (9).

$$K = \frac{I_H}{I} \quad (8)$$

где: I_H – начальная интенсивность падающего на барьер пучка γ -квантов, $\frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$; I – интенсивность пучка γ -квантов, $\frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$; K – коэффициент ослабления.

$$\mu = \frac{1}{x} \cdot \ln \left(\frac{I_H}{I} \right) \quad (9)$$

где: x – толщина барьера; I_H – начальная интенсивность падающего на барьер пучка γ -квантов, $\frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$; I – интенсивность после прохождения слоя x , $\frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$; $\ln$ – натуральный логарифм.

В табл. 2 записаны результаты вычислений линейных коэффициентов ослабления.

Таблица 2.
Сравнительная эффективность материалов

Table 2.
Comparative efficiency of the materials

	Материал		
	Медь	Графит	Латунь
$\mu_{\text{эксп}}, \text{см}^{-1}$	$11,767 \pm 0,034$	$0,228 \pm 0,030$	$13,453 \pm 0,090$
$\mu_{\text{теор}}, \text{см}^{-1}$	14,210	0,396	13,970

Обсуждение полученных результатов

Как следует из данных табл. 2, экспериментальные значения линейного коэффициента ослабления $\mu_{\text{эксп}}$ для меди ($9,413 \text{ см}^{-1}$) систематически ниже теоретического $\mu_{\text{теор}}$ ($14,210 \text{ см}^{-1}$). Для латуни наблюдается некоторое незначительное расхождение ($\mu_{\text{эксп}} = 13,453 \text{ см}^{-1}$,

$\mu_{теор} = 13,970 \text{ см}^{-1}$), для графита экспериментальное значение $\mu_{эксп}$ ($0,228 \text{ см}^{-1}$) также ниже теоретического ($0,396 \text{ см}^{-1}$), однако характер расхождения иной. Такое различие требует дополнительного анализа, который был выполнен на основе угловых зависимостей интенсивности (рис. 3-9) с акцентом на положение пика и его изменение с ростом угла падения барьера θ . Для медного барьера при нормальном падении пучка γ -квантов ($\theta = 0^\circ$) максимальная интенсивность $I_\theta = 52,703 \frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$. При этом экспериментальные значения систематически превышают теоретические. Такое поведение указывает на малоугловое рассеяние: рассеянные фотоны сохраняют направление, близкое к исходному, и попадают в детектор. Геометрия эксперимента (коллимация 2 мм) обеспечивает попадание в детектор фотонов, рассеянных на угол менее 1° . При энергии 59,54 кэВ потеря энергии при комптоновском рассеянии на такой угол составляет менее 0,01 кэВ, что не разрешается сцинтилляционным детектором (NaI(Tl)). Малая толщина медного образца (0,4 мм) не позволяет поглотить рассеянную компоненту, поэтому рассеянные фотоны регистрируются как «прошедшие», что и приводит к занижению $\mu_{эксп}$. Этого достаточно, чтобы снизить измеренное значение с 14,210 до 9,413 см^{-1} .

Для графитового барьера (рис. 8) при нормальном падении максимальная интенсивность I_0 составляет $53,493 \frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$, что отличается от теоретической I_0 ($38,219 \frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$). С ростом угла падения до 60° максимум снижается до $28,000 \frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$. При этом во всех случаях сохраняется четко выраженный пик. Различие между экспериментом и теорией объясняется следующим. При малом атомном номере графита ($Z = 6$) и большой толщине (20 мм) часть фотонов испытывает однократное или двукратное комптоновское рассеяние и сохраняет направление, достаточное для попадания в детектор. Простая экспоненциальная модель не учитывает этот вклад. Однако, в отличие от меди, рассеянная компонента в графите не приводит к значительному занижению $\mu_{эксп}$, поскольку табличное значение $\mu_{теор}$ для графита само по себе мало. Наиболее интересное поведение демонстрирует латунь (рис. 9). При $\theta = 0^\circ$ максимум ($21,977 \frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$) находится при $\theta_{отн} = 0^\circ$. Однако при $\theta = 20^\circ, 40^\circ$ и 60° наблюдается четкое смещение пика от нулевого угла поворота детектора. Это смещение пика является прямым экспериментальным доказательством преобладания рассеяния над чисто направленным прохождением. При косом падении на латунь (1 мм) основная часть фотонов, достигших детектора, – это не первичные кванты, а однократно рассеянные, изменившие направление. Оптимальная толщина латуни (1 мм) достаточна для того, чтобы поглотить часть рассеянной компоненты, но не настолько велика, чтобы подавить эффект полностью – поэтому $\mu_{эксп}$ и $\mu_{теор}$ согласуются, но угловое распределение смещается.

Таким образом, занижение $\mu_{эксп}$ для меди обусловлено сочетанием трех факторов: 1) достаточно высокое сечение рассеяния вперед (когерентного и комптоновского) при 59,54 кэВ; 2) малая толщина барьера, при которой рассеянные фотоны не успевают поглотиться; 3) геометрия коллимации, пропускающая рассеяние на углы $<1^\circ$ в детектор. Для латуни и графита эти факторы либо ослаблены за счет большой толщины, либо скомпенсированы.

Выводы

1. Экспериментально установлено, что для всех исследованных материалов увеличение угла падения γ -излучения от 0 до 60° приводит к монотонному уменьшению интенсивности за барьером, что качественно соответствует теоретической модели, основанной на увеличении эффективной толщины барьера при косом падении.

2. Экспериментальное значение линейного коэффициента ослабления для барьера из меди толщиной 0,4 мм оказалось существенно ниже теоретического. Анализ угловых зависимостей показал систематическое превышение экспериментальной интенсивности над теоретической при всех углах падения. Предположительно причиной является малоугловое рассеяние (когерентное и комптоновское): рассеянные фотоны попадают в детектор благодаря

геометрии коллимации и регистрируются как прошедшие. Малая толщина барьера не позволяет поглотить рассеянную компоненту.

3. Для графита экспериментальная максимальная интенсивность выше теоретического значения. Расхождение между теорией и экспериментом объясняется вкладом однократного и двукратного комптоновского рассеяния вперед, не учтенного в простой экспоненциальной модели. Однако, в отличие от меди, это расхождение не приводит к значительному занижению $\mu_{\text{эксп}}$.

4. Для латуни экспериментальные и теоретические значения интенсивности согласуются при всех углах падения с незначительным отклонением. Ключевая особенность – при увеличении угла падения θ наблюдается отчетливое смещение пика углового распределения от $\theta_{\text{отн}} = 0^\circ$. Это является прямым доказательством того, что при косом падении основной вклад вносят однократно рассеянные фотоны, изменившие направление движения. Толщина 1 мм является достаточной для поглощения рассеянной компоненты, поэтому $\mu_{\text{эксп}}$ хорошо согласуется с $\mu_{\text{теор}}$.

5. Занижение $\mu_{\text{эксп}}$ для меди не является следствием инструментальных ошибок (для латуни и графита в идентичных условиях расхождение либо практически отсутствует, либо имеет иную природу). Оно обусловлено специфическим сочетанием трех факторов: достаточно высокое сечение рассеяния, малая толщина образца и геометрия коллимации, пропускающая рассеяние на углы $<1^\circ$ в детектор. Смещение пика на угловых зависимостях является надежным диагностическим признаком режима рассеяния.

6. При проектировании радиационной защиты от источников γ -излучения в диапазоне энергий 50-60 кэВ необходимо учитывать:

- для тонких образцов (менее 1 мм для материалов со средним Z) табличные коэффициенты ослабления для материалов со средним Z при малых толщинах могут занижаться из-за малоуглового рассеяния;
- для материалов с малым Z (графит, вода, бетон) и большой толщиной экспериментальное пропускание может систематически превышать расчетное, полученное по экспоненциальной модели. Это связано с тем, что модель не учитывает вклад однократно рассеянных вперед фотонов, регистрируемых детектором;
- оптимальная толщина (как в случае латуни 1 мм) обеспечивает согласие с табличными данными и сохраняет направленность пучка.

7. Полученные результаты демонстрируют, что экспоненциальная модель дает адекватное качественное описание угловой зависимости ослабления, однако для количественного согласия с экспериментом в тонких образцах со средним Z требуется учет малоуглового рассеяния, а в толстых образцах малого Z – учет однократного рассеяния вперед. Строгий учет этих эффектов возможен методами Монте-Карло. В рамках данной работы такое моделирование не проводилось, однако сам факт выявления и количественной оценки расхождений имеет самостоятельную методическую ценность. Данные могут быть использованы в учебно-лабораторном практикуме для студентов технических специальностей при изучении взаимодействия ионизирующего излучения с веществом.

Библиографический список

1. **Машкович, В.П.** Защита от ионизирующих излучений: Справочник / В.П. Машкович, А.В. Кудрявцева. – М.: Энергоатомиздат, 2013. – 464 с.
2. **Иванов, В.И.** Основы радиационной безопасности атомных станций / В.И. Иванов, В.П. Машкович, Э.М. Центрер. – М.: Энергоатомиздат, 2012. – 328 с.
3. **Hubbell, J.H.** Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients 1 keV to 20 MeV for Elements $Z = 1$ to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest / J.H. Hubbell, S.M. Seltzer. – NISTIR 5632, 1995. – 118 p.
4. **Абрамов, А.И.** Основы экспериментальных методов ядерной физики / А.И. Абрамов, Ю.А. Казанский, Е.С. Матусевич. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 544 с.

5. **Климов, А.Н.** Ядерная физика и ядерные реакторы / А.Н. Климов. – М.: Энергоатомиздат, 2011. – 480 с.
6. **Гусев, Н.Г.** Защита от ионизирующих излучений: Том 1. Физические основы защиты / Н.Г. Гусев, В.А. Климанов, В.П. Машкович [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 512 с.
7. X-Ray Mass Attenuation Coefficients. NIST Standard Reference Database 126. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients> (дата обращения: 10.02.2026).
8. **Батоев, В.А.** Радиационная защита: теория и практика / В.А. Батоев, С.В. Батоева. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. – 212 с.
9. **Kocher, D.C.** Radioactive Decay Data Tables: A Handbook of Decay Data for Application to Radiation Dosimetry and Radiological Assessments / D.C. Kocher. – Oak Ridge: Technical Information Center, U.S. Department of Energy, 1981. – 224 p. – (DOE/TIC-11026).
10. **Knoll, G.F.** Radiation Detection and Measurement / G.F. Knoll. – 4th ed. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2010. – 860 p.
11. ВНИИА. Обзор отечественных радиометрических и спектрометрических систем, которые могут быть использованы для целей учета и контроля ядерных материалов [Электронный ресурс]. URL: <https://vniia.ru/rgamo/literat/obzor/index.html> (дата обращения 19.02.2026)

References

1. Mashkovich V.P., Kudryavtseva A.V. Zashchita ot ioniziruyushchikh izlucheniy : Spravochnik [Protection against ionizing radiation : Handbook]. Moscow: Energoatomizdat; 2013. 464 p. (in Russian).
2. Ivanov V.I., Mashkovich V.P., Tsenter E.M. Osnovy radiatsionnoy bezopasnosti atomnykh stantsiy [Fundamentals of radiation safety of nuclear power plants]. Moscow: Energoatomizdat; 2012. 328 p. (in Russian).
3. Hubbell J.H., Seltzer S.M. Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients 1 keV to 20 MeV for Elements Z = 1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest. NISTIR 5632; 1995. 118 p.
4. Abramov A.I., Kazanskiy Yu.A., Matusevich E.S. Osnovy eksperimental'nykh metodov yadernoy fiziki [Fundamentals of experimental methods of nuclear physics]. Moscow: Energoatomizdat; 2010. 544 p. (in Russian).
5. Klimov A.N. Yadernaya fizika i yadernye reaktory [Nuclear physics and nuclear reactors]. Moscow: Energoatomizdat; 2011. 480 p. (in Russian).
6. Gusev N.G., Klimanov V.A., Mashkovich V.P., et al. Zashchita ot ioniziruyushchikh izlucheniy : Tom 1. Fizicheskie osnovy zashchity [Protection against ionizing radiation : Vol. 1. Physical foundations of protection]. Moscow: Energoatomizdat; 1989. 512 p. (in Russian).
7. Batoev V.A., Batoeva S.V. Radiatsionnaya zashchita: teoriya i praktika [Radiation protection: theory and practice]. Saint Petersburg: Izd-vo Politekh. un-ta; 2018. 212 p. (in Russian).
8. Kocher D.C. Radioactive Decay Data Tables: A Handbook of Decay Data for Application to Radiation Dosimetry and Radiological Assessments. Oak Ridge: Technical Information Center, U.S. Department of Energy; 1981. 224 p. (DOE/TIC-11026).
9. Knoll G.F. Radiation Detection and Measurement. 4th ed. Hoboken: John Wiley & Sons; 2010. 860 p.
10. X-Ray Mass Attenuation Coefficients. NIST Standard Reference Database 126. Available from: <https://www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients> [accessed 2026 Feb 10].
11. VNIIA. Obzor otechestvennykh radiometricheskikh i spektrometricheskikh sistem, kotorye mogut byt' ispol'zovany dlya tseley ucheta i kontrolya yadernykh materialov [Review of domestic radiometric and spectrometric systems that can be used for nuclear material accounting and control]. Available from: <https://vniia.ru/rgamo/literat/obzor/index.html> [accessed 2026 Feb 19]. (in Russian).

**Дата поступления
в редакцию: 10.05.2026**

**Дата принятия
к публикации: 01.07.2026**

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 629.3

EDN JQDGFH

ПОВЫШЕНИЕ ПРОХОДИМОСТИ И ЭКОЛОГИЧНОСТИ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

Н.Б. ВеселовORCID: 0009-0008-2148-096X e-mail: veselov@nzttn.ru

ООО НПО «ТРАНСПОРТ»

Нижний Новгород, Россия

Приведены результаты испытаний по воздействию на грунт сельскохозяйственных тракторов, лесозаготовительных машин и вездеходных транспортных средств. Установлено, что наибольшую универсальность для тяговых и транспортных машин обеспечивают ленточные пневмогусеницы, состоящие из отдельных пневмоэлементов, разнесенных вдоль оси гусеницы на одну треть их длины (по ширине их может быть два, три, четыре в зависимости от полной массы машины). Эта универсальность обеспечивается тем, что пневматические гусеницы с поперечным расположением трактов состоят из тяговой металлической цепи с симметричным расположением пневмотрактов или с уширением только во внешнюю сторону машины. Смещение пневмотрактов влево и вправо относительно оси гусеницы приводит к увеличению периметра опорной поверхности гусеницы и, как следствие, более высоких тягово-сцепных параметров. В частном случае, на тракторе ВТ-150, пневмогусеница установлена с уширением во внешнюю сторону, а на снегоболотоходе ТТМ-6901 – с симметричным расположением пневмотрактов. Результаты испытаний подтверждены многолетним опытом эксплуатации этих машин, круглогодично показывающих высокую проходимость во всех регионах страны.

Ключевые слова: проходимость транспортно-технологических машин; гусеничный движитель; опорная поверхность гусеницы; пневмогусеницы; пневмотраки.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Веселов, Н.Б. Повышение проходимости и экологичности транспортно-технологических машин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2026. № 3. С. 47-66. EDN: JQDGFH

IMPROVING THE CROSS-COUNTRY CAPABILITY AND ENVIRONMENTAL FRIENDLINESS OF TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL VEHICLES

N.B. VeselovORCID: 0009-0008-2148-096X e-mail: veselov@nzttn.ru

LLC NPO «TRANSPORT»

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article presents the results of tests on the impact of agricultural tractors, logging machines and amphibious all-terrain vehicles on soil. The greatest versatility for traction and transport vehicles is provided by pneumatic belt tracks, consisting of individual pneumatic elements spaced along the track axis by one third of their length (in width there can be two, three, four, depending on the total weight of the vehicles). Pneumatic tracks with transverse track arrangement consist of a traction metal chain with a symmetrical arrangement of pneumatic tracks or with widening only on the outer side of the machine. The displacement of the pneumatic tracks to the left and right relative to the track axis leads to an increase in the perimeter of the track bearing surface and, as a consequence, higher traction parameters. The pneumatic track is installed with widening to the outer side on the VT-150 tractor, and on the TTM-6901 amphibious all-terrain vehicle – with a symmetrical arrangement of the pneumatic tracks. Forty years of experience in operating these vehicles has demonstrated their high cross-country capability in summer and winter conditions in all regions of the country.

Key words: cross-country capability of transport and technological vehicles; caterpillar track; track bearing surface; pneumatic caterpillar; pneumatic tracks.

FOR CITATION: Veselov N.B. Improving the cross-country capability and environmental friendliness of transport and technological vehicles. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 3. Pp. 47-66. EDN: JQDGFH

Введение

Отечественные предприятия сельского хозяйства, лесозаготовительной отрасли, энергетики и нефтегазопроводного транспорта оснащены значительным количеством транспортно-технологических машин (ТТМ). В достижении их высокой производительности, технико-экономической эффективности и экологической безопасности далеко не исчерпаны имеющиеся резервы. Разрушающее и уплотняющее воздействие на почву сельхозугодий ходовыми системами сельскохозяйственной техники известны давно. Исследования, проведенные совместно со специалистами ВИМа, показали, что применение серийных гусеничных тракторов приводит к снижению урожайности зерновых культур на 10-15 % из-за разрушения структуры и уплотнения почвы, вызывая также ее эрозию. Основным препятствием для применения гусеничной техники является недопустимо высокие пиковые давления движителей на опорную поверхность, что ведет к образованию глубокой колеи, потере подвижности машин и разрушению верхних слоев почвы и растительного покрова.

По результатам исследований, проведенных совместно с ЦНИИМЭ, сложная ситуация с применением гусеничных машин различного назначения в лесном хозяйстве сложилась при освоении лесосек на переувлажненных и заболоченных почвах. В этих условиях проявилась несостоятельность традиционных гусеничных движителей не только с экономической, но и, что особенно важно, с экологической точки зрения. Трелевочные тракторы и гусеничные лесоповалочные машины, используемые в таких условиях, имеют малые технологические и транспортные скорости, не позволяя полностью реализовать номинальную грузоподъемность и производительность, разрушая почвенный покров лесосек. Еще сложнее ситуация с применением гусеничных ТТМ в тундровых и лесотундровых районах, где интенсивное освоение обширных пространств этих территорий с помощью гусеничной техники в короткие сроки вывело из оборота и привело к заболачиванию сотни тысяч гектаров тундры. Например, пробег гусеничной машины на 100 км приводит к повреждению почвы и растительности тундры на площади в 10...12 га. Очевидно, требуются меры по предотвращению вредного воздействия движителей гусеничных машин на почву. Успешное решение проблемы эффективного транспортного и технологического обслуживания названных отраслей в значительной мере зависит от совершенства конструкций и приемлемого экологического воздействия ТТМ на окружающую среду.

Ретроспектива создания пневмогусеничных движителей для тракторов, транспортеров и транспортно-технологических машин в СССР и России

Целью работы является формирование теоретических основ создания высокоэластичных движителей машин для обслуживания агропромышленного комплекса, нефтегазопроводов, энергетического и лесного производств в сложных природно-климатических условиях. Объектами исследований являлись: сельскохозяйственные тракторы Т-54С, Т-70С, Т-150; лесозаготовительные тракторы ТТ-4М, ТДТ-55, ЛП-19Д; гусеничные транспортеры ГАЗ-47, ГАЗ-71, ТТМ-3903, ТТМ-4902, ТТМ-5906; экскаваторы ЭО-5015, ЭО-4121, ЭО-4124; ТТМ серии СТПр-6901, серии ТТМ-6902. Исследования проводились на макетах, экспериментальных и опытных образцах, стендах, серийно выпускаемых машинах с использованием современных измерительных средств и методов обработки результатов экспериментов.

В работе обобщены результаты пятидесятилетних исследований проблемы создания высокоэластичных гусеничных движителей и серийного производства ТТМ на их основе, реализованные в разработках конструкторского бюро ООО НПО «Транспорт» за последние 35 лет. В рамках решения данной проблемы разработаны методики расчетов высокоэластич-

ных элементов движителя, их напряженно-деформированного состояния (НДС). Впервые исследовано влияние пневматических гусениц на тягово-сцепные характеристики машины, плавность хода, проходимость. Разработано, изготовлено и исследовано более 20 различных вариантов машин с высокоэластичными движителями. Новизна технических решений, использованных при создании ТТМ, обоснована более 40 авторскими свидетельствами, патентами, медалями и дипломами различных выставок, в том числе, золотыми медалями 1 степени ВДНХ СССР. Поиск новых решений был начат с анализа различных типов колесных и гусеничных движителей. Выбор был сделан в пользу гусеничных движителей с пневматическими гусеницами (рис. 1).

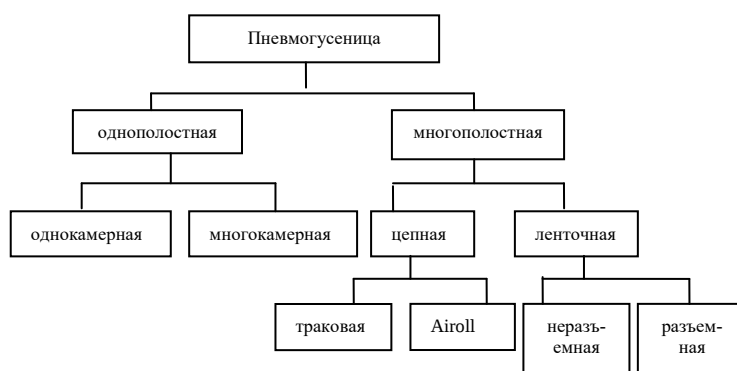


Рис. 1. Классификация пневмогусениц

Fig. 1. Classification of pneumatic tracks

Как показал анализ, к числу заслуживающих серьезного внимания относится пневмогусеницы, многополостные ленточные разъемные и пневмогусеницы, многополостные цепные траковые. Первые патенты на их конструкции относятся к 1918-1925 гг. В различных странах не раз возвращались к вопросу создания работоспособного пневмогусеничного движителя [1]. Однако получение работоспособных образцов ограничивалось отсутствием технологических возможностей реализации конструкторских разработок, недостаточно высоким качеством резинотехнических материалов и др. В дальнейшем развитие химической индустрии позволило осуществить целый ряд разработок пневмогусениц, применив при их изготовлении новые резинотехнические материалы и технологии. Весь комплекс работ по созданию экологически безопасных движителей ТТМ следует рассматривать в их хронологическом развитии, во взаимосвязи с изменяющимися по мере накопления экспериментальными и теоретическими результатами исследований конструкций движителей и машин в целом [2].

Исследования пневматических гусениц включали два направления:

- 1) пневматические гусеницы многополостные ленточные, состоящие из пневмоэлементов, разнесенных один относительно другого вдоль по длине гусеницы [3];
- 2) пневмогусеницы цепные траковые с поперечно расположенными траками относительно оси гусеницы и имеющие симметричные эластичные уширители или уширители во внешние стороны машины [4].

Высокой универсальностью для тяговых и транспортных машин обладает ленточная пневматическая гусеница, состоящая из отдельных траков по ширине и разнесенных один относительно другого вдоль оси гусеницы на одну треть их длины. Это направление работ дает возможность унификации конструкций пневматических гусениц для большого класса гусеничных транспортных средств. Всего в ОНИЛ ВМ и СКТБ ТТМ НТГУ им. Р.Е. Алексеева было разработано, изготовлено и исследовано семь различных конструкций пневмогусеничных движителей на базе тракторов Т-54С, Т-70С, Т-150, транспортеров ГАЗ-47 и ГАЗ-71 (рис. 2-7).

Пневматические элементы соединяются между собой с помощью спаренных параллельных пальцев, цевок и направляющих гребней. Такое соединение пневматических эле-

ментов дает возможность считать данную гусеницу ленточной, состоящей из жесткого неармированного участка (участок с меньшим расстоянием между пальцами) и гибкого, армированного металлокордом (участок с большим расстоянием между пальцами). Путем подбора силовой арматуры несущего пояса и набора пневмоэлементов по ширине гусеницы можно получить гусеничный обвод, не уступающий по прочностным характеристикам обводу с металлической гусеницей. Гусеница может состоять по ширине из двух, трех, четырех и т.д. пневмоэлементов в зависимости от типа машины, ее массы и требуемой величины удельного давления [5].



Рис. 2. Трактор Т-70С

Fig. 2. T-70C tractor



Рис. 3. Трактор Т-54С

Fig. 3. T-54C tractor



Рис. 4. Трактор Т-150

Fig. 4. T-150 tractor



Рис. 5. Транспортёр ГАЗ-47

Fig. 5. GAZ-47 transporter



Рис. 6. Транспортёр ГАЗ-71

Fig. 6. GAZ-71 transporter



Рис. 7. Транспортёр ГАЗ-47

Fig. 7. GAZ-47 transporter

По первому варианту для получения работоспособной конструкции пневматического элемента были рассмотрены напряженные участки гусеничного обвода и режимы его работы. Такими участками являются дуговые ветви на ведущем и направляющем колесах и участки, находящиеся в контакте с опорной поверхностью. На дуговых участках гусеничного обвода силовой каркас пневмоэлементов с продольным расположением в гусенице нагружается растягивающим усилием, обусловленным силой тяги, предварительным натяжением и центробежной силой. При поперечном расположении пневмоэлементов на этих участках нагружаются элементы крепления пневмотраков к металлическим звеньям, а силовой каркас обеспечивает необходимую жесткость для стабилизации консольной части пневмоэлемента и прочность в местах заделки элементов крепления.

При разработке движителей ТТМ с пневматическими гусеницами для оптимизации геометрических размеров и прочности пневмоэлементов был проделан значительный объем расчетно-теоретических и экспериментальных исследований взаимодействия гусеничного движителя с опорной поверхностью. При оценке несущей способности пневмотраков на упругом основании использована гидромеханическая модель основания, которую описывает уравнение Терцаги-Герсеванова. Такой подход к анализу взаимодействия движителя машины с полотном пути в период создания требовал небольших вычислительных ресурсов и давал хорошую качественную сходимость результатов расчета и эксперимента [6].

На рис. 8 показана зависимость осадки движителя от скорости движения машины, а на рис. 9 – распределение относительных напряжений в почве стандартных движителей с металлической и однотипной резино-пневматической гусеницами [7].

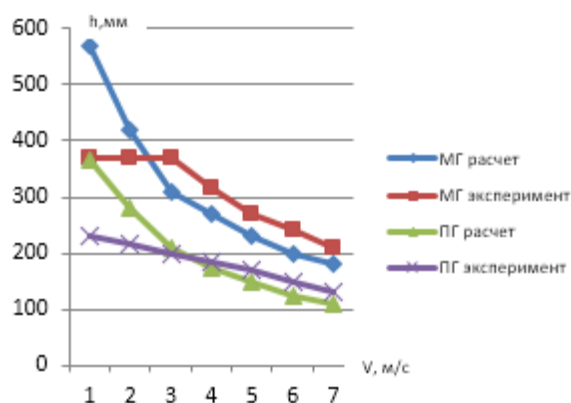


Рис. 8. Зависимость осадки движителя от скорости движения машины

Fig. 8. Dependence of the track sinkage on the vehicle speed

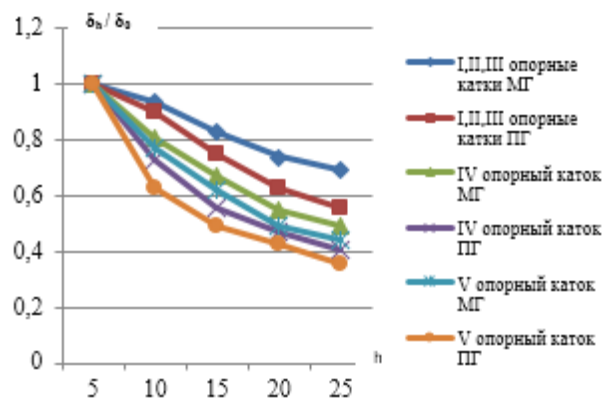


Рис. 9. Распределение

относительных напряжений в почве:

δ_h – напряжение в массе полотна пути;

δ_0 – давление в зоне контакта гусеницы и опорной поверхности; δ_h / δ_0 – относительные напряжения на глубине I-V – номера опорных катков

Fig. 9. Distribution of relative stresses in the soil:

δ_h – is the stress in the roadbed mass;

δ_0 – is the pressure in the contact zone between the track and the bearing surface;

δ_h / δ_0 – are the relative stresses at depth.

I-V are the numbers of the road wheels

Разработка конструкций пневмоэлементов требовала решения ряда задач по определению их геометрических и прочностных характеристик. В силу сложной структуры пневмоэлементов и противоречивости предъявляемых требований, определение основных параметров проводилось поэтапно, с совмещением теоретических и экспериментальных методов исследований (НДС). При рассмотрении нагруженности отдельных участков гусеничного обвода было установлено, что для гусеницы с продольным расположением пневмотраков наибольшие растягивающие усилия действуют на силовой пояс на тяговой ветви и на опорной поверхности, на дуговых участках силовой пояс претерпевает изгиб и, в зависимости от расположения нейтральной оси, часть его испытывает напряжения сжатия, а часть – напряжения растяжения. Каркас пневмооболочки практически не нагружен на тяговой ветви растягивающими нагрузками и испытывает напряжения изгиба на дуговых участках. Положение нейтральной оси определяется внутренней структурой пневмоэлемента (рис. 10).

Как показали экспериментальные исследования, максимальная упругая деформация гусеницы не должна превышать 2-2.5 %. Поскольку силовой пояс представляет собой композитную конструкцию, состоящую из металлического, вязкоэластичного или капронового корда и резины, для обеспечения требуемой продольной жесткости силового пояса необходимо применять поправочный коэффициент в условии прочности. Величина коэффициента запаса

прочности варьируется от 2 для металлокорда до 10 для вязкого и капронового кордов. Для исключения остаточных деформаций силового пояса были разработаны технологические приемы, заключающиеся в предварительной вытяжке под определенной нагрузкой собранного, но не вулканизированного каркаса и вулканизация изделия в напряженном состоянии. Напряженное состояние изделия обеспечивается конструкцией прессформ.

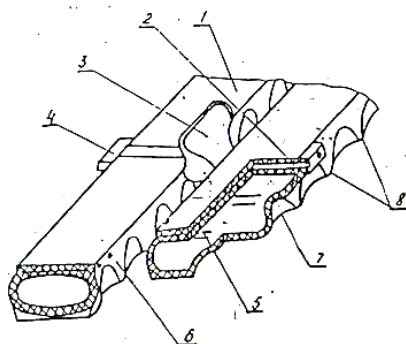


Рис. 10. Пневмогусеница с продольным расположением пневмоэлементов:

1 – пневмотрак; 2 – палец; 3 – направляющий гребень; 4 – цевка; 5 – корд;
6 – боковина; 7 – впадина; 8 – грунтозацеп

Fig. 10. Pneumatic track with longitudinal arrangement of pneumatic elements:

1 – pneumatic track; 2 – pin; 3 – guide horn; 4 – driving pin; 5 – cord;
6 – sidewall; 7 – recess; 8 – grouser

На рис. 11 показаны характеристики деформации пневматического элемента и его компонентов.

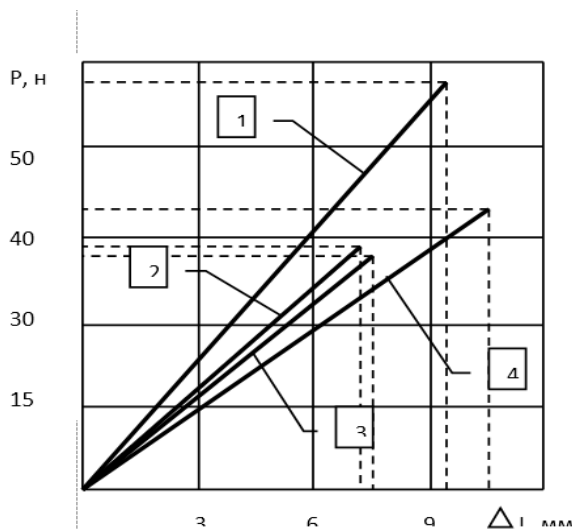


Рис. 11. Характеристики деформации пневмоэлемента:

1 – корд 40Л15; 2 – секция пневмоэлемента; 3 – силовой пояс отдельный; 4 – корд 22Л15

Fig. 11. Deformation characteristics of the pneumatic element:

1 – cord 40L15; 2 – pneumatic element section; 3 – separate load-bearing belt; 4 – cord 22L15

Пневматическая оболочка, взаимодействующая с опорной поверхностью и обеспечивающая реализацию сцепления гусеницы с полотном пути и передачу тягового усилия, выполнена как единое целое с силовым поясом пневмоэлемента. Она обуславливает упругость гусеницы в вертикальном и боковом направлениях. Жесткость оболочки определяется давлением воздуха, конструкцией боковин, числом слоев корда и углами укладки нитей корда. Жесткостные параметры оболочки выбираются из условия обеспечения требуемого пятна контакта с опорной поверхностью и устойчивости машины в боковом направлении. Эти параметры зависят от внутреннего давления воздуха в элементе, от числа слоев от схемы ук-

ладки армирующих материалов и определяются в первом приближении по аналогии с автомобильными шинами. Экспериментально установлено, что прогиб пневмотраков при номинальной вертикальной нагрузке должен быть ограничен величиной 10-12 % от высоты профиля, что согласуется с опытом проектирования и эксплуатации диагональных автомобильных шин.

Наибольшее влияние на величину прогиба оказывает давление воздуха в диапазоне 0-0.2 МПа. Дальнейшее повышение давления незначительно увеличивает грузоподъемность пневмотрака. На рис.12 показана зависимость прогиба Δh пневмоэлемента от внутреннего давления воздуха при различных углах закроя корда. Особенности поведения пневмоэлемента при нагружении внутренним давлением воздуха определяются свойствами его каркаса, состоящего из слоев обрешиненного корда с перекрещивающимися нитями, что обуславливает анизотропию механических свойств.

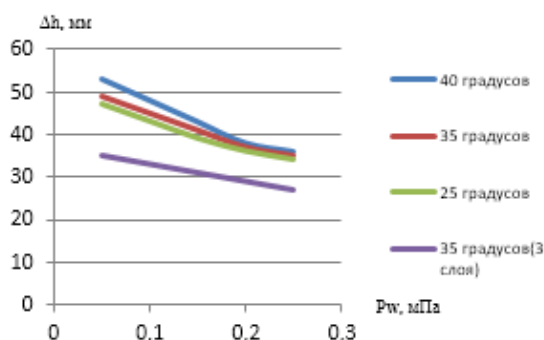


Рис. 12. Зависимость прогиба пневмоэлемента от внутреннего давления воздуха при различных углах закроя корда

Fig. 12. Dependence of the pneumatic element deflection on the internal air pressure at different cord cutting angles

При определении напряженного состояния резинокордной оболочки пневмоэлемента можно рассматривать его как тонкостенную сетчатую оболочку, нагруженную внутренним давлением. Для пневмогусениц с поперечным расположением пневмоэлементов расчетная методика потребовала существенного расширения и уточнения. Такая необходимость обусловлена тем, что поперечно расположенный пневмоэлемент передает тяговое усилие через оболочку на металлическую гусеничную цепь в паре силовой каркас-подошва металлического звена, а вертикальную нагрузку на опорную поверхность передается не только оболочкой, находящейся под звеном, но и своей консольной частью (рис. 13).

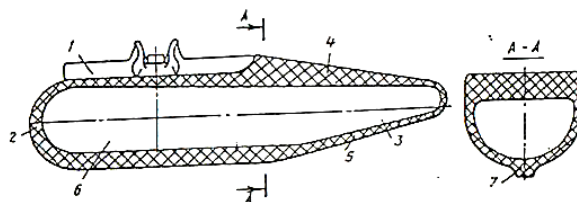


Рис. 13. Схема пневмоэлемента поперечно расположенного на тяговой цепи:

1 – тяговая цепь; 2 – пневмобаллон; 3 – внутренняя полость;
4 – эластичная консоль; 5, 7 – грунтозацепы

Fig. 13. Diagram of a pneumatic element, transversely located on a drive chain:

1 – drive chain; 2 – pneumatic cylinder; 3 – internal cavity; 4 – elastic console; 5, 7 – grousers

При передаче вертикальной нагрузки часть элемента, находящаяся под металлическим звеном, испытывает нагрузочный режим, аналогичный оболочке продольного расположенного пневмоэлемента. Консольная часть нагружена изгибающим моментом от верти-

кальной реакции опорной поверхности. Наиболее значимо это проявляется при движении машины по снегу и грунтам с низкой несущей способностью (болото, снег, пашня и пр.). Это обстоятельство потребовало разработки новой методики расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) каркаса пневмооболочки и силового пояса пневмоэлемента. Поскольку с математической точки зрения расчет пневмотрака на нагрузку, не зависящую от продольной координаты и расчет НДС пневматической шины эквивалентны, то и методики их расчета во многом должны быть близки. Однако специфика взаимодействия пневмотрака с деформируемым основанием и наличие изгибаемой консольной части исключает возможность применения безмоментной теории сетчатых оболочек Бидермана, поэтому расчет НДС проводился по модели моментной многослойной анизотропной оболочки Кирхгофа-Лява и сдвиговой оболочки типа Тимошенко [6].

При определении НДС пневмотрака решены две независимые задачи:

- расчет НДС и контактного давления для некруговой цилиндрической многослойной оболочки под действием нагрузки, независимой от продольной координаты;
- расчет НДС для некруговой цилиндрической оболочки от изгибающей нагрузки.

При анализе напряженно-деформированного состояния пневмотрака, контактирующего с жестким основанием, рассматривалась многослойная оболочка, геометрические параметры и механические характеристики которой были заданы из реальной конструкции. Расчетно-теоретические исследования НДС пневмоэлементов и эксперименты по оценке деформаций пневмотраков под действием вертикальных нагрузок на различных опорных поверхностях показали высокую сходимость результатов, позволили обосновать прочностные и геометрические параметры элементов и определили необходимость учета упругодемпфирующих свойств пневмотраков при анализе плавности хода машин.

Исследования колебаний корпуса были проведены для пяти- и шестикатковых машин с пневматическими и металлическими гусеницами. Во-первых, необходимо было установить влияние на динамику колебаний машины (движение без явлений «пробоев» пневмоэлементов) таких параметров пневматической гусеницы, как коэффициент демпфирования и вертикальная жесткость, а также исследовать влияние некоторых конструктивных параметров самой машины на уровень колебаний корпуса в различных условиях движения. Второй задачей являлось исследование нелинейной динамики системы поддрессирования машины в критических случаях движения, когда возникают «пробои» пневмоэлементов при переездах через сосредоточенные препятствия.

В табл. 1. приведены обобщенные данные по вертикальным ускорениям центра масс корпуса исследованной машины при ее движении по трассе со случайным профилем неровностей как без учета «пробоев» пневматического элемента, так и с их учетом.

Таблица 1.

Вертикальные ускорения центра масс машины

Table 1.

Vertical accelerations of the vehicle center of mass

№	Тип машины	Применяемая модель	$Q_{y_{шт}}$	$D_{y_{шт}}$	Примечание
1	Машина с ПГ	Линейная модель	2,4	5,76	
2	Машина с ПГ	Нелинейная модель	3,2	10,24	Расчетное количество «пробоев» на участке 200 м составило 3-5 раз
3	Машина с МГ	Линейная модель	4,9	24,01	

Сравнение расчетных значений ускорений центра масс корпуса машин при движении по дорогам со случайным микропрофилем показывает, что уровень ускорений центра масс машины с металлическими гусеницами выше почти в 1,5 раза [8]. Для проверки расчетов были проведены экспериментальные исследования плавности хода на фонах, характерных для сельскохозяйственных и транспортных машин: грунтовая дорога и паровое поле. В ходе

исследований фиксировались вертикальные ускорения на сидении механика-водителя, в центре масс и в двух точках носовой части корпуса обоих бортов.

Результаты экспериментальных исследований, отмечены точками на рис. 14, 15. Очевидно, характер изменения расчетных и экспериментальных среднеквадратических значений ускорений идентичны. Количественное совпадение результатов следует считать удовлетворительным. Средняя погрешность при этом составляет 20-25 %. Анализ показал, что при движении по паровому полю среднеквадратические ускорения на сидении механика-водителя машины с пневматической гусеницей изменяются от 0,9 до 4,2 м/с², для машины с металлической гусеницей, соответственно, при тех же условиях движения находятся в диапазоне от 1,8 до 7,2 м/с². Из анализа уровня колебаний машин при движении по укатанной грунтовой дороге следует, что среднеквадратические значения ускорений по сути одинаковы и изменяются в диапазоне от 1,4 до 1,8 м/с².

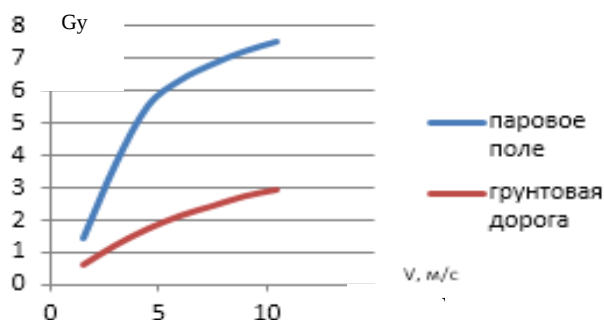


Рис. 14. Среднеквадратические значения ускорений на сидении водителя (металлогусеница):

1 – паровое поле; 2 – грунтовая дорога

Fig. 14. Root mean square acceleration values at the driver's seat (metal track):

1 – fallow field, 2 – dirt road

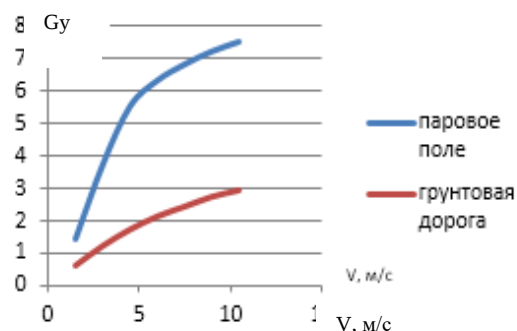


Рис. 15. Среднеквадратические значения ускорений на сидении водителя (пневмогусеница):

1 – паровое поле; 2 – грунтовая дорога

Fig. 15. Root mean square acceleration values at the driver's seat (pneumatic track):

1 – fallow field; 2 – dirt road

Проведенным анализом влияния параметров пневматических элементов движителя на колебания корпуса машины установлено:

- уменьшение жесткости пневмоэлемента (при прогибе не более 10+12 %) приводит к уменьшению уровня колебаний корпуса; (оптимальная величина жесткости в расчетах была принята $C_{пг} = 160 \frac{\kappa H}{м}$);
- выбор коэффициента демпфирования необходимо проводить по допускаемому прогибу пневмоэлемента, (оптимальная величина коэффициента демпфирования в расчетах была принята $K_{пг} = 400 \frac{\kappa^2}{с}$).

Установка пневмогусениц взамен металлических обеспечивает снижение уровня колебаний машины при движении через единичную неровность в 1,8 -2,2 раза; при движении по реальному микропрофилю среднеквадратические значения ускорений корпуса снижаются в 1,2-1,7 раза. Большой цикл работ был проведен по исследованию влияния пневматических гусениц на уплотнение почвы, распределение напряжений внутри почвы и как следствие влияние их на урожайность ряда сельскохозяйственных культур [7]. Тягосцепные параметры исследовались как при обработке почвы сельскохозяйственными тракторами, так и на снегоболотоходных машинах в условиях болот и снежной целины.

Проведенные исследования показывают, что и у тракторов Т-70С, Т-54С (ПГ), Т-150 (ПГ) и транспортеров ГАЗ-47, ГАЗ-71 под воздействием движителей зафиксировано измене-

ние плотности почвы на глубину до 400-500 мм (с учетом колеи). Но степень уплотнения под движителями с металлическими и пневматическими гусеницами различна. Общее уплотнение почвы по следам Т-54С (ПГ) и Т-150 (ПГ) меньше, чем по следам Т-70С и Т-150, соответственно на 23,9 и 28,3 %, при этом осадка уплотнения составляет 57-64 % от общей глубины следов. При определении твердости почвы по следам Т-54С (ПГ) и Т-150 (ПГ) установлено, что на глубине до 100 мм она соответственно на 36 и 14 % меньше, чем по следам тракторов Т-70С и Т-150. При вспашке почвы на глубину 100 мм (стерня озимой пшеницы) получено, что сопротивление плугу по следу трактора Т-150 (ПГ) на 15,5 %, а по следу трактора Т-150 – на 24,7 % выше, чем вне следа.

Согласно результатам испытаний, на снегу транспортные средства с пневматическими гусеницами имеют в 1,4-1,8 раза большую силу тяги по сцеплению, чем машины с металлическими гусеницами в тех же условиях. Это объясняется в основном более равномерным распределением нормальных нагрузок по длине опорной поверхности движителя, увеличением активной опорной поверхности гусеницы, большим коэффициентом трения пневматической гусеницы по полотну пути. Имеет значение также то, что касательные реакции от грунтацепов всех траков, лежащих в зоне контакта движителя с полотном пути, располагаются в направлении движения машины (за счет высокой обратной жесткости гусеницы). Но у мелкозвенчатых гусениц с большим прогибом между опорными катками направление реакций от цепов, следуя изгибу гусениц, отклоняются от направления движения машины. Наряду с этим, высокие сцепные характеристики пневмогусеничного движителя (ПГД) объясняются большей самоочищаемостью ПГ благодаря ее эластичности. В движителе с металлическими гусеницами опорная поверхность гусеницы из-за сильного налипания, особенно при температуре воздуха, близкой к нулю, практически забита снегом, и сила тяги по сцеплению определяется трением *снег по снегу* (рис. 16).



Рис. 16. Состояние пневматической и металлической гусениц при движении по снегу при температуре воздуха, близкой к нулевой

Fig. 16. Condition of pneumatic and metal tracks when moving on snow at air temperature near freezing

Основной вид сопротивления при движении гусеничных машин по снежной целине – за счет вертикальной деформации снега. Сравнительные исследования позволили установить, что на снежной целине глубиной 250-750 мм коэффициент сопротивления движению у машины с ПГ в 1,2-1,5 раза ниже, чем с металлическими, за счет того, что глубина колеи первой в 1,5-2 раза меньше колеи второй (рис. 17).

Кроме того, в результате прогиба металлической гусеницы между опорными катками возникает дополнительное сопротивление на перекачивание машины, чего в ПГД практически не наблюдается. В ПГД значительно снижается количество снега, попадающего на беговую дорожку под опорные катки. Пневмогусеничный транспортер способен двигаться по снежной целине глубиной 500-700 мм на всех передачах со скоростями 25-30 км/ч; в то же время с металлическими гусеницами он движется только на первой и второй передачах со

скоростями 10-15 км/ч. При движении пневмогусеничной машины по укатанной заснеженной дороге коэффициент сопротивления движению был выше (за счет гистерезисных потерь) и составил 0,10-0,11, соответственно, для машины с металлическими гусеницами он был равен 0,08. Основные пути снижения коэффициента сопротивления движению пневмогусеничных транспортных средств при движении по твердым дорогам связаны с применением материалов с малыми гистерезисными потерями и конструктивными доработками пневмоэлементов.

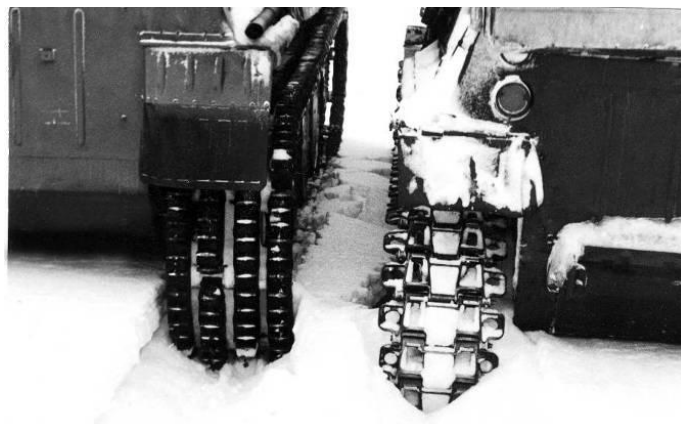


Рис. 17. Колея машин с пневматической и металлической гусеницами на снежной целине

Fig. 17. Track rut left by vehicles with pneumatic and metal tracks on virgin snow

На этом этапе работы по созданию и исследованию пневмогусеничных движителей были решены следующие задачи:

- 1) выяснена принципиальная возможность работы резинокордной оболочки с внутренним избыточным давлением воздуха в качестве тягообразующего и несущего элемента гусеничной цепи;
- 2) разработана технология изготовления, оценена трудоемкость и особенности технологического процесса изготовления пневматических гусениц;
- 3) разработаны новые конструкторские решения наиболее оптимальных образцов пневматических элементов гусеничного движителя;
- 4) проведен сравнительный анализ экономической эффективности и экологической целесообразности пневмогусеничного движителя в сравнении с традиционными гусеничными движителями;
- 5) выявлен и оценен наиболее целесообразный класс пневмогусеничных ТТМ и наиболее эффективные области их применения.

Второе направление работы было посвящено созданию движителя с поперечным расположением пневматических траков относительно тяговой металлической цепи [5]. При этом решались два вопроса:

- 1) повышение проходимости и экологичности серийно выпускаемых машин;
- 2) создание новых машин, наиболее полно отвечающих всем требованиям с учетом эксплуатации их в условиях пахотных земель, болот и снежной целины.

ПГ состоит из поперечно закрепленных пневматических элементов (траков) на серийных либо специально созданных звеньях. Пневматические элементы цилиндрической равновесной формы на опорной поверхности (в поперечном сечении) имеют грунтозацепы, а на участках, сопрягаемых с металлическими гусеницами – детали крепления (болты и гайки). ПГ может быть симметричной относительно тяговой цепи или имеет консольное эластичное уширение во внешнюю сторону машины.

Пневматическими гусеницами с поперечным расположением элементов были оборудованы следующие серийно выпускаемые машины:

- экскаваторы ЭО-5015, ЭО-4121, ЭО-4124 (рис. 18-20);
- лесозаготовительные тракторы: ТДТ-55, ЛП-18Д (рис. 21-22).



Рис. 18. Экскаватор ЭО-5015

Fig. 18. Excavator EO-5015



Рис. 19. Экскаватор ЭО-4124

Fig. 19. Excavator EO-4124



Рис. 20. Пневмогусеничный движитель экскаватора

Fig. 20. Pneumatic track mover of an excavator



Рис. 21. Лесозаготовительный трактор ТДТ-55

Fig. 21. Logging tractor TDT-55



Рис. 22 Валочно-тревочная машины ЛП-18Д

Fig. 22. Felling and skidding machine LP-18D

При этом для серийно выпускаемых экскаваторов преследовалась основная цель – преобразование неболотоходных машин обычного исполнения (более дешевые) в болотоходные. Пневмотраки устанавливаются на серийную металлическую гусеницу с уширением во внешнюю сторону. Рассматривались два варианта пневмогусениц: первый – траки отличались по длине и при установке чередовались: короткий – длинный, образующиеся окна

между длинными траками обеспечивали значительно увеличение тяговых характеристик машины. Это требовало иметь при эксплуатации два типа траков в случае выхода из строя. Во втором варианте на тяжелых экскаваторах пневмотраки были одинаковой длины.

Величина среднего давления на грунт уменьшалась более чем в два раза. Экскаваторы имели возможность уверенно выполнять работы не только на переувлажненных грунтах, но и на болотах первого и частично второго типов. Сравнительные экспериментальные исследования по определению показателей проходимости лесозаготовительных машин на пневматических гусеницах проводились совместно с ЦНИИМЭ. Испытания серийного трактора ТТ-4М и трактора ТТ-4М с ПГД проводились одновременно, далее они были продолжены на трелеровочной бесчокерной машине ЛП-18Д.

По результатам испытаний было установлено, что:

- сопротивление движению ЛП-18Д-ПГД на 26 % ниже по сравнению с ЛП-18Д;
- после десяти проездов сравниваемых машин в холостом режиме движения по переувлажненному лесному грунту колесообразование ЛП-18Д-ПГД в 3,5 раза меньше, чем у ЛП-18Д, при этом повреждения дернового слоя после проездов ЛП-18Д-ПГД наблюдалось незначительно.

При проведении исследований определялось напряженное состояние грунта и колесообразование под движителями на грунтовых участках при различных нагрузочных режимах и скоростях движения машины. На процесс колесообразования главным образом влияют значения максимальных пиковых нормальных давлений (МПНД) движителя машины на грунт, в связи с этим, проведен анализ экспериментальных данных по распределению величины максимальных пиковых нормальных напряжений (МПНН) по глубине грунта под движителями ТТ-4М (табл. 2).

Таблица 2.
Распределение максимальных пиковых нормальных напряжений
по глубине грунта под серийным движителем и ПГД

Table 2.
Distribution of maximum peak normal stresses by soil depth
under a serial and pneumatic track movers

Глубина закладки датчика, м	Вес груза, кН	Максимальные пиковые нормальные напряжения, кПа					
		Серийный движитель			ПГД		
		Передачи					
		1	3	5	1	3	5
0,2	65	136,9	176,0	219,1	83,0	65,1	95,5
	0	117,8	138,8	157,9	98,7	75,7	77,0
0,4	65	72,9	91,6	109,7	55,4	52,6	53,2
	0	79,5	80,6	87,2	57,6	44,4	45,5
0,6	65	43,2	53,2	52,1	32,0	30,2	38,2
	0	53,2	53,2	55,4	36,9	30,7	31,6

Согласно полученным данным, установлено, что с ростом скорости движения в холостом и грузовом режимах у трактора ТТ-4М величина МПНН возрастает в среднем на 10 % с переходом на каждую высшую передачу коробки трансмиссии, а у ТТ-4М-ПГД значения МПНН несколько снижаются. Общей тенденцией для напряженного состояния грунта под движителями машин является уменьшение МПНН по глубине грунта и данное явление согласуется с основными положениями механики грунтов. Сравнительный анализ по величине МПНН в грунтовом массиве от воздействия движителей выявляет значительное преимущество движителя ТТ-4М-ПГД, которые составляют в среднем 45,7 % от значений МПНН ТТ-4М, при этом колесообразование серийной машины составило 20,5 см, а ТТ-4М-ПГД-10,9 см. Замеры нормальных напряжений по глубине грунта на различных испытательных участках определили коэффициент неравномерности распределения МПНН под движителями машин. Применение ПГД на ТТ-4М в 2,5-3 раза снижает коэффициент неравномерности

МПНН, следовательно, и нормальных давлений по длине опорной площади движителя. За счет обратной жесткости пневмоэлементов ПГД передача нагрузки от катка передается на большое количество звеньев гусеницы и этим, снижая воздействие на грунт, уменьшает величину колесообразования в два раза по сравнению с серийным движителем.

Важным параметром профильной проходимости для машин является конструктивная величина клиренса машины. Установка ПГД при прочих упомянутых выше положительных качествах повышает клиренс на 130 мм.



Рис. 23. Трактор ВТ-150 на пневматических гусеницах

Fig. 23. VT-150 tractor on pneumatic tracks

ПГ трактора ВТ-150 (рис. 23) представляет собой гусеничную цепь, состоящую из 44 пневмотраков, соединенных между собой металлическим пальцем диаметром 25 мм (рис. 24). Пневмотрак, в свою очередь, состоит из металлического звена 1 и соединенного с ним пневмоэлемента 2 (рис. 25). Металлическое звено в верхней части имеет конструктивные элементы (беговую дорожку – 3, направляющие гребни – 4 и поверхности зацепления – 5 с ведущим колесом), аналогичные серийному тракту гусеничной цепи трактора ВТ-150, это позволяет установить пневматическую гусеницу на серийную ходовую систему трактора без ее доработки. На нижней поверхности металлического звена сформировано углубление с ребрами, сопрягаемое с присоединительной поверхностью пневмоэлемента. На горизонтальной поверхности звена выполнены 4 отверстия под крепление пневмоэлемента. На рис. 24 изображен продольный разрез пневмотрака.

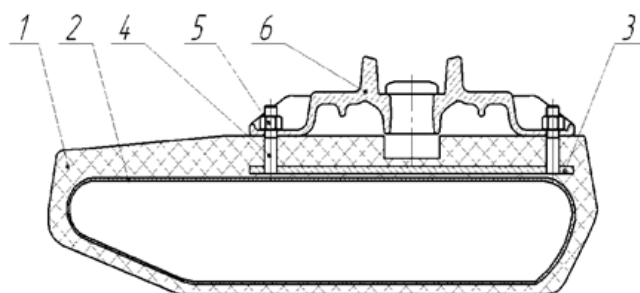


Рис. 24. Гусеница трактора ВТ-150, продольный разрез:

1 – оболочка с каркасом; 2 – пневмокамера; 3 – пластина;
4 – болт; 5 – гайка; 6 – металлический трек

Fig. 24. VT-150 tractor track, longitudinal section:

1 – shell with frame; 2 – air chamber; 3 – plate; 4 – bolt; 5 – nut; 6 – metal track

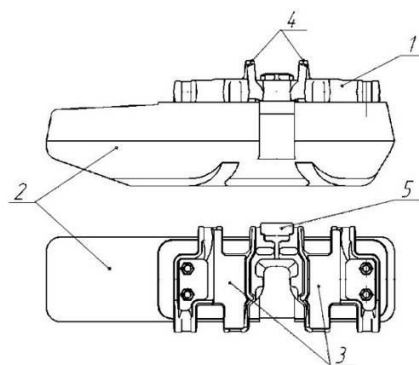


Рис. 25. Гусеница трактора ВТ-150 в сборе

Fig. 25. Complete track assembly for the VT-150 tractor

Пневмоэлемент представляет собой армированную эластичную (резиновую) полую оболочку 1 с каркасом, пневмокамерой 2 и стальной крепежной пластиной 3 с четырьмя шпильками 4. Каркас состоит из трех слоев металлокорда и четырех слоев синтетического корда. Это основа пневмоэлемента, обеспечивающая ему прочность, гибкость, упругость и сохранение формы. Каркас принимает на себя значительную часть нагрузки, которая действует на пневмоэлемент. Пневмокамера 2 состоит из тонкостенной резиновой оболочки и вентили с золотником. Камера в конструкции выполняет двойную функцию. На стадии изготовления (вулканизации) пневмоэлемента она поддерживает технологическое давление внутри пресс-формы; в готовом изделии в корпус золотника вкручивается золотник и устанавливается колпачок для поддержания внутри пневмоэлемента атмосферного давления воздуха. Во время эксплуатации при наезде на него опорным катком давление внутри пневмоэлемента увеличивается. На внешней поверхности пневмоэлемента выполнены грунтозацепы для повышения тягового усилия. Ширина пневмоэлемента на 10 % больше, чем шаг металлического звена. За счет этого при сборке пневмотраков в гусеничную цепь возникает эффект обратной жесткости. На ведущем колесе и ленивце звенья гусеницы укладываются свободно. При попытке прогнуть ее в обратную сторону (нагрузка в зонах между опорными катками при переезде через препятствие), когда пневмоэлементы прижимаются друг к другу, возникают упругие силы, удерживающие гусеницу от такого прогиба. Обратная жесткость гусеницы позволяет более равномерно распределить давление на почву от опорных катков. Это приводит к уменьшению неравномерности распределения давления под гусеницами.

Полевые испытания были проведены в ФГУ «Северо-Кавказская МИС» на тракторе ВТ-150. Программа-методика испытаний на тракторе ВТ-150 предусматривала сравнительные испытания трех типов гусениц:

- 1) серийной металлической гусеницы, с открытыми металлическими шарнирами;
- 2) пневматической гусеницы; пневмоэлементы, закрепленные на металлической гусенице с открытыми металлическими шарнирами;
- 3) резинометаллической (резиноармированной) гусеницы.

Сравнительные испытания проводились с целью: 1) определения тяговых показателей в соответствии с требованиями ГОСТ 30745-2001 «Тракторы сельскохозяйственные. Определение тяговых показателей»; 2) определения параметров воздействия движителей на почву в соответствии с требованиями ГОСТ 26955-86 «Техника сельскохозяйственная, мобильная. Нормы воздействия движителей на почву».

Полученные результаты испытаний на сельхозугодиях в рамках выполненной работы позволили сделать вывод, что применение разработанных пневмогусениц на сельскохозяйственных тракторах в сравнении с колесными движителями обеспечивает:

- 1) повышение тягово-сцепных свойств, значение тягового КПД трактора составило 0,791...0,796, вместо 0,65 для колесного при меньшем (не менее чем в два раза) буксовании;
- 2) снижение величины максимального давления на почву в 3-4 раза;
- 3) повышение проходимости и обеспечение возможности эффективной работы на тяжелых и переувлажненных почвах;
- 4) обеспечение выхода в поле на 5-6 дней раньше в весенний период.

В сравнении с ходовыми системами на металлических гусеницах применение пневмогусениц позволяет:

- 1) обеспечить возможность движения по дорогам с твердым и усовершенствованным покрытием без их разрушения;
- 2) обеспечить возможность выхода в поле на 5-6 дней раньше в весенний период;
- 3) обеспечить повышенный ресурс на почвах с высоким содержанием абразива не менее чем в 1,5 раза;
- 4) снизить вибронегативность на сиденье водителя в 1,4...1,9 раза и максимальный уровень шума в кабине в 2...3 Дб;
- 5) снизить максимальное давление на почву в 2,2...2,4 раза;
- 6) обеспечить снижение пиковых нагрузок на почву под катками трактора в 1,3...1,6 раза;
- 7) обеспечить средний производственный ресурс гусениц трактора не менее 1000 ч или трех лет эксплуатации.

Указанные выше величины ресурса даны на основании опыта эксплуатации пневмогусениц на снегоболотоходах ТТМ 6901 производства ООО НПО «Транспорт». По сравнению с резиноармированной, ПГ имеет лучшую ремонтопригодность. Это обусловлено возможностью замены или ремонта вышедших из строя пневмотраков, а также лучшими условиями для монтажа гусеницы на машину в случае ее сброса. Поэтому для техники, эксплуатируемой в условиях, где вероятен сброс гусеницы (болота, косогоры и др.) предпочтение должно быть отдано пневматической гусенице. ПГ рекомендуется для проведения сельскохозяйственных работ при любых значениях влажности почвы, по сравнению с металлической она обеспечивает снижение максимального давления на почву в 1,4 раза, а также обеспечивает улучшение условий труда оператора по уровням вибрации на рабочем месте в 1,38 раза.

Современные тенденции развития снегоболотоходной техники с применением пневмогусеничного движителя

Новые снегоболотоходные машины семейства ТТМ-6901 оборудованы симметрично расположенными пневматическими траками: ТТМ-6901 базовое шасси, ТТМ-6902Э с экскаваторной установкой «Святовит», ТТМ-6902ПНУ с насосной установкой ПНУ-2, ТТМ-6902ГМ с краноманипуляторной установкой ИФ300С-15, ТТМ-6902АКМ с вакуумной нефтепромысловой цистерной АКН-7,5 ОД, ТТМ-6902ГС с самосвальной установкой, ТТМ-6902ПЖ с пожарным оборудованием для тушения лесных пожаров (рис. 26-32) [9].

Для выравнивания эпюры давления у всех указанных машин, поперечно расположенные пневмоэлементы устанавливаются также с предварительным натягом по боковым поверхностям, обеспечивающим высокую обратную жесткость на верхней и опорной ветвях обвода. Наличие предварительного натяга между элементами в верхней ветви обвода стабилизирует ее поведение при значительно меньшем предварительном натяжении гусеницы.

Эластичные консоли гусеницы при движении по ровному деформируемому полотну пути (болото, снежная целина) отгибаются на 10-12°. За счет эластичности консольные части пневматических элементов при наездах на сосредоточенные единичные препятствия (пни, валуны, кочки, бревна и т.п.) могут отгибаться практически до 90°. После снятия воздействия на трак его первоначальная форма восстанавливается.



Рис. 26. ТТМ-6901 Базовое шасси

Fig. 26. TTM-6901. Basic chassis



Рис 27. ТТМ-6901Э – снегоболотоход с экскаваторной установкой

Fig. 27. TTM-6901E. Snow and swamp-going vehicle with an excavator mount



Рис. 28. ТТМ-6901ПНУ – снегоболотоход с насосной установкой

Fig. 28. TTM-6901PNU. Snow and swamp-going vehicle with a pump unit



Рис. 29. ТТМ -6901ГМ – снегоболотоход с краноманипуляторной установкой

Fig. 29. TTM-6901GM. Snow and swamp-going vehicle with a crane-manipulator unit



Рис. 30. ТТМ-6901ГС – снегоболотоход с самосвальной установкой

Fig. 30. TTM-6901GS. Snow and swamp-going vehicle with dump truck



Рис. 31. ТТМ-6902АКМ с вакуумной нефтепромысловой цистерной АКН-7,5 ОД

Fig. 31. TTM-6902AKM. Snow and swamp-going vehicle with vacuum oilfield tank АКН-7,5 ОД

На конструкции пневматических гусениц с поперечным расположением элементов получено более 10 патентов, в том числе, на технологию изготовления пневмотраков.



Рис. 32. ТТМ-6901ПЖ – снегоболотоход с комплектом пожарного оборудования для тушения лесных пожаров

Fig. 32. TTM-6901PZH. Snow and swamp-going vehicle with firefighting equipment for extinguishing forest fires

Установка пневматических гусениц взамен металлических дает выравнивание эпюры распределения давления по длине опорной поверхности. Распределение давления вдоль опорной поверхности ПГД (рис. 33) так же, как и в движителе с металлическими гусеницами, является несколько неравномерным, но вершины пиковых давлений под катками скруглены, и удельные давления межкатковых участков гусеницы соизмеримы с максимальными пиковыми давлениями под катками. Коэффициент неравномерности эпюры давлений при этом в 1,5-1,9 раза ниже у движителя с пневматическими гусеницами. Максимальная величина коэффициента неравномерности эпюры удельных давлений для шестикатковой машины на пневматических гусеницах при движении по песку $a=1,7$, в тех же условиях с металлическими гусеницами, $a=3,25$.

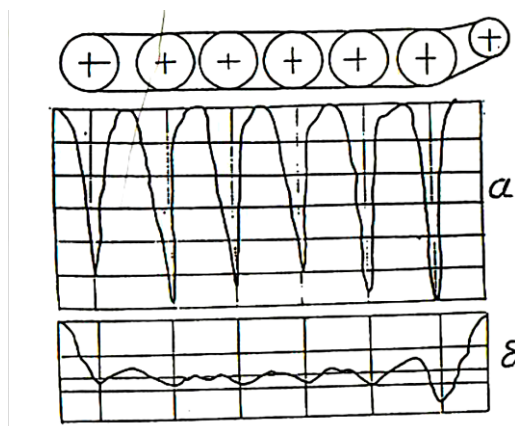


Рис. 33. Распределение давления вдоль опорной поверхности:

a – металлогусеница; б – пневмогусеница

Fig. 33. Pressure distribution along the bearing surface:

a – metal track; b – pneumatic track

Анализ коэффициента полноты использования опорной поверхности и коэффициента неравномерности (а) показывает, что активная длина опорной поверхности пневматической гусеницы в 2-2,3 раза выше, чем металлической гусеницы аналогичной машины, работающей в тех же условиях. Таким образом, ПГ описанной конструкции имеет большую по сравнению с металлической длину активной части опорной поверхности, т.е. обеспечивает более полное использование опорной поверхности гусеничного движителя. Из представленных эпюр распределения удельных давлений следует, что вертикальная нагрузка, воспринимаемая межкатковым участком пневматической гусеницы, значительно больше, чем нагрузка, воспринимаемая тем же участком движителя с металлической гусеницей, что обуславливает-

ся высокой обратной жесткостью пневматической гусеницы, перераспределением вертикальных нагрузок резинокордной оболочкой с внутренним давлением воздуха, копированием ею неровностей полотна пути, высота которых меньше или равна высоте пневмобаллона. Как показали расчетно-теоретические и экспериментальные исследования, а также многолетний опыт эксплуатации ПГД с поперечным расположением пневмотраков рассмотренных конструкций, они пригодны для тяговых и технологических снегоболотоходных и сельскохозяйственных машин, максимальная скорость которых не превышает 30 км/час.

Снегоболотоходные пневмогусеничные плавающие машины семейства ТТМ-6901 с различным технологическим оборудованием широко используются на предприятиях топливно-энергетического комплекса страны при обслуживании магистральных нефтегазопроводов, линий электропередач на Дальнем Востоке, Западной Сибири, полуострове Таймыр, в Республике Коми, а также в Казахстане и республике Беларусь.

Заключение

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования, а также многолетний опыт эксплуатации подтвердили, что применение пневмогусеничных движителей (как с продольным, так и с поперечным расположением пневмоэлементов) позволяет существенно повысить проходимость и экологичность транспортно-технологических машин. Установлено, что пневмогусеницы обеспечивают более равномерное распределение давления на опорную поверхность, снижают пиковые нагрузки на грунт в 1,5-3 раза, уменьшают глубину колеи и степень уплотнения почвы, что особенно важно для сельскохозяйственных угодий, лесных территорий и земель в зоне тундры.

По сравнению с металлическими гусеницами пневмогусеницы демонстрируют лучшие тягово-сцепные свойства (особенно на снегу, болотах и переувлажненных грунтах), снижают вибронагруженность рабочего места оператора в 1,4-1,9 раза и позволяют приступать к полевым работам весной на 5-6 дней раньше. Разработанные конструкции успешно прошли испытания на тракторах, экскаваторах, лесозаготовительных и снегоболотоходных машинах, а их эффективность подтверждена серийным выпуском и эксплуатацией в различных регионах России и странах СНГ.

Таким образом, пневмогусеничные движители являются перспективным направлением развития наземных транспортно-технологических средств и комплексов, обеспечивающим рациональный компромисс между высокой производительностью, сохранением плодородия почв и минимизацией техногенного воздействия на окружающую среду.

Автор выражает благодарность всем участникам проекта «Высокоэластичные гусеничные движители», принимавшим участие в разное время в течение пятидесяти лет в разработке, исследованиях опытных образцов (МВТУ им. Н.Э. Баумана, НАМИ, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, ЦНИИМЭ, ВИМа), серийно выпускаемых пневмогусеничных движителей и машин на них (ООО НПО «Транспорт», а также специалистов занимающихся эксплуатацией машин на пневматических гусеницах (ПАО «Траснефть», ПАО «Газпром», ПАО «Роснефть», ПАО «Россети»).

Библиографический список

1. **Бочаров, Н.Ф.** Транспортные средства на высокоэластичных движителях / Н.Ф. Бочаров, В.И. Гусев, В.М. Семёнов. – М.: Машиностроение, 1974. – 209 с.
2. **Новиков, Ю.П.** К вопросу применения пневматических гусениц на транспортных средствах / Ю.П. Новиков, Н.Б. Веселов // Труды ГПИ им. А.А. Жданова. – 1973. – Т. 29, вып. 17. – С. 37-40.
3. **А.С. № 985869** (1982). Пневмотрак гусеничного транспортного средства / Н.Б. Веселов, С.В. Руквишников, А.М. Растворов, Л.В. Барахтанов. – Заявитель: Горьковский политехнический институт им. А.А. Жданова.
4. **А.С. № 1129115** (1983). Пневмотрак гусеничного транспортного средства / Н.Б. Веселов, В.А. Антонец, Л.В. Барахтанов, Ю.Н. Васькина, Л.И. Вахрушин, А.П. Ермаков, Ю.Д. Седов. – Заявитель: Горьковский политехнический институт им. А.А. Жданова.

5. **Бочаров, Н.Ф.** Новые конструкции высокоэластичных гусеничных движителей и перспективы их применения на сельхозмашинах / Н.Ф. Бочаров, Н.Б. Веселов [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 1985. – С. 12-18.
6. **Веселов, Н.Б.** Конструирование и расчет гусеничных транспортно-технологических машин / Н.Б. Веселов. – Нижний Новгород: Р.И. Бегемот, 2012. – 254 с.
7. **Веселов, Н.Б.** Сравнительный анализ воздействия на почву пневматических и металлических гусениц / Н.Б. Веселов, С.В. Рукавишников // Труды ВИМ. – 1978. – Т. 81. – С. 110-118.
8. **Веселов, Н.Б.** Конструкции и особенности эксплуатации гусеничных транспортно-технологических машин / Н.Б. Веселов. – Нижний Новгород: РИ Бегемот, 2012. – 232 с.
9. **Веселов, Н.Б.** Транспортно-технологические машины / Н.Б. Веселов. – Нижний Новгород: ООО НПО «Транспорт»: Кварц, 2022. – 148 с.

References

1. Bocharov N.F., Gusev V.I., Semenov V.M. Transportnye sredstva na vysokoelastichnykh dvizhitelyakh [Vehicles on highly elastic propulsors]. Moscow: Mashinostroenie; 1974. 209 p. (in Russian).
2. Novikov Yu.P., Veselov N.B. K voprosu primeneniya pnevmaticheskikh gusenits na transportnykh sredstvakh [On the issue of using pneumatic tracks on vehicles]. *Trudy GPI im. A.A. Zhdanova* [Proceedings of Gorky Polytechnic Institute named after A.A. Zhdanov]. 1973;29(17):37-40. (in Russian).
3. Veselov N.B., Rukavishnikov S.V., Rastvorov A.M., Barakhtanov L.V. Avtorskoe svidetel'stvo № 985869 (1982). Pnevmotrak gusenichnogo transportnogo sredstva [Pneumatic track of a tracked vehicle]. Applicant: Gor'kovskiy politekhnicheskiiy institut im. A.A. Zhdanova. (in Russian).
4. Veselov N.B., Antonets V.A., Barakhtanov L.V., Vas'kina Yu.N., Vakhrushin L.I., Ermakov A.P., Sedov Yu.D. Avtorskoe svidetel'stvo № 1129115 (1983). Pnevmotrak gusenichnogo transportnogo sredstva [Pneumatic track of a tracked vehicle]. Applicant: Gor'kovskiy politekhnicheskiiy institut im. A.A. Zhdanova. (in Russian).
5. Bocharov N.F., Veselov N.B., et al. Novye konstruksii vysokoelastichnykh gusenichnykh dvizhitelya i perspektivy ikh primeneniya na sel'khoz mashinakh [New designs of highly elastic tracked propulsors and prospects for their use on agricultural machinery]. *Traktory i sel'khoz mashiny* [Tractors and Agricultural Machinery]. 1985:12-18. (in Russian).
6. Veselov N.B. Konstruirovaniye i raschet gusenichnykh transportno-tekhnologicheskikh mashin [Design and calculation of tracked transport and technological vehicles]. Nizhny Novgorod: R.I. Begemot; 2012. 254 p. (in Russian).
7. Veselov N.B., Rukavishnikov S.V. Sravnitel'nyy analiz vozdeystviya na pochvu pnevmaticheskikh i metallicheskh gusenits [Comparative analysis of the impact of pneumatic and metal tracks on soil]. *Trudy VIM* [Proceedings of All-Union Research Institute of Agricultural Mechanization]. 1978;81:110-118. (in Russian).
8. Veselov N.B. Konstruktsii i osobennosti ekspluatatsii gusenichnykh transportno-tekhnologicheskikh mashin [Designs and operational features of tracked transport and technological vehicles]. Nizhny Novgorod: RN Begemot; 2012. 232 p. (in Russian).
9. Veselov N.B. Transportno-tekhnologicheskie mashiny [Transport and technological vehicles]. Nizhny Novgorod: ООО НПО «Транспорт»: Кварц; 2022. 148 p. (in Russian).

**Дата поступления
в редакцию: 09.11.2025**

**Дата принятия
к публикации: 18.05.2026**

УДК 629.3.018.7

EDN EYXFAX

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРЕХКОМПОНЕНТНОГО МЕТОДА ИСПЫТАНИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОБЛЕМ БЛОКИРОВКИ РАДАР АДАС

Ф.К. Дьяков

ORCID: 0009-0003-3041-9363 e-mail: f.dyakov@madi.ru

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)

Москва, Россия

Анализируется вопрос практического применения трехкомпонентного метода испытаний для исследований уникальных сценариев некорректной работы АДАС в Российской Федерации. Теоретические основы методологии были предложены неофициальной рабочей группой по методам валидации для автоматизированного вождения Всемирного форума для согласования правил в области транспортных средств (WP.29). Оценена сходимость результатов, полученных на основании трех видов экспериментов: имитационных исследований, испытаний на полигоне и испытаний на дорогах общего пользования. Для каждого из них была разработана общая методика проведения экспериментальных заездов, а также дополнения к ней, характерные только для определенного вида испытаний. Практически обоснована возможность использования трехкомпонентного метода для исследования сценариев некорректной работы системы АДАС; показан потенциал применения для исследований случаев некорректной работы АДАС, массово встречающихся на отечественных дорогах. Разработана глобальная методика дорожных испытаний, обоснована невозможность сокращения их объема. Разработана конструкция экранирующей решетки. Создан испытательный модуль в программной среде *Siemens Prescan*, позволяющий имитировать методику испытаний, используемую на дорогах общего пользования и полигоне.

Ключевые слова: АДАС; система адаптивного круиз-контроля (САКК); снежно-грязевые отложения; блокирование радара АДАС; экранирующая решетка; коэффициент атмосферного затухания; трехкомпонентный метод; уникальные сценарии; дороги общего пользования; экспериментальные заезды.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Дьяков, Ф.К. Использование трехкомпонентного метода испытаний для исследования проблем блокировки радара АДАС // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2026. № 3. С. 67-81. EDN EYXFAX

INVESTIGATION OF ADAS RADAR BLOCKING PROBLEM USING A THREE-COMPONENT TEST METHOD

Ph.K. Dyakov

ORCID: 0009-0003-3041-9363 e-mail: f.dyakov@madi.ru

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)

Moscow, Russia

Abstract. The article examines the practical application of a three-component test method for investigating Russian unique advance driver-assistance system (ADAS) malfunction scenarios. The theoretical foundations of the methodology were proposed by the informal working group on validation methods for automated driving of the world forum for harmonization of vehicle regulations (WP.29). The convergence of results obtained from three types of experiments – simulation studies, proving ground tests, and public road tests is evaluated. A common methodology for conducting test driving was developed for each type of experiments, along with additions to the methodology specific to a particular type of test. The feasibility of using the three-component method for studying ADAS malfunction scenarios was practically substantiated and the potential for investigating ADAS malfunction cases that occur frequently on Russian roads was demonstrated. A comprehensive road test methodology was developed. The impossibility of reducing the number of road tests was justified. The design of an aperture blockage grid was developed. A test module was created in the Siemens Prescan software, enabling simulation of the test methodology used on public roads and the proving ground.

Key words: advance driver-assistance system (ADAS); adaptive cruise control (ACC); snow and mud deposits; ADAS radar blocking; aperture blockage grid; atmospheric attenuation coefficient; three-component method; unique test cases; public roads; test driving.

FOR CITATION: Dyakov Ph.K. Investigation of adas radar blocking problem using a three-component test method. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 3. Pp. 67-81. EDN EYXFAX

Введение

В последнее время на дорогах многих стран, в том числе, России, массово эксплуатируются автомобили с электронными системами помощи водителю – *Advanced Driver Assistance Systems* (ADAS) второго уровня по классификации SAE 3016 [1]. Начинают появляться и транспортные средства (ТС) с системами ADAS третьего уровня. Актуален вопрос о соответствии работы подобных систем каким-либо обязательным требованиям. За рубежом ТС с системами ADAS, начиная с первого уровня, обязаны соответствовать требованиям обязательной государственной сертификации. В РФ в настоящее время ситуация иная: Требования Технического Регламента Таможенного Союза – ТР ТС 018/2011 [2] не требуют проведения сертификационных испытаний данных систем, следовательно, ТС может быть выпущено в обращение без их прохождения.

На сессии неформальной рабочей группы по методам валидации для автоматизированного вождения – *Validation Methods for Automated Driving* (VMAD) Всемирного форума для согласования правил в области транспортных средств (WP.29) Европейской экономической комиссии Организации Объединенных Наций (ЕЭК ООН) был одобрен новый метод оценки / испытаний (НМОИ) для автоматизированного вождения – NATM (new assessment / test method) [3]. Во введении к документу сказано, что данный метод относится к ТС, оборудованным автоматизированными системами вождения (ADS), т.е. системами ADAS третьего уровня и выше. Однако совершенно очевидно, что описанные виды испытаний и их взаимодействие может распространяться и на системы более низкого уровня. Целью данного документа является выработка четких рекомендаций по валидации безопасной работы ADS/ADAS таким образом, чтобы предлагаемые испытания были основаны на фактических реальных сценариях эксплуатации ТС. Они должны быть легко воспроизводимы как при имитационном моделировании, так и при полигонных испытаниях.

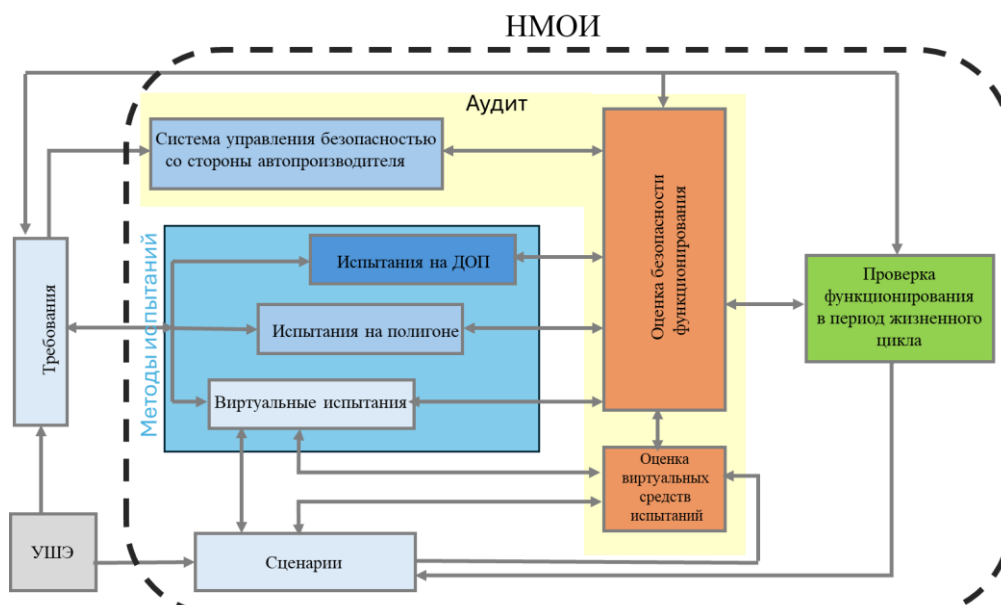


Рис. 1. Блок-схема Нового метода оценки / испытаний для автоматизированного вождения

Fig. 1. Block diagram of the new assessment / test method for automated driving

НМОИ состоит из шести элементов, тесно взаимосвязанных друг с другом (рис. 1). Половину из них составляют методы испытаний: имитационное моделирование, испытания на треке и испытания на дорогах общего пользования. В оставшиеся три элемента входят:

выработка сценариев тестирования, проверка внедрения производителем процессов, необходимых для достижения функциональной и эксплуатационной безопасности, а также мониторинг и передача данных на этапе эксплуатации.

Предметом исследования настоящей работы является блок «Методы испытаний». В него входят: виртуальные или имитационные испытания, проводимые на компьютере с использованием специального программного обеспечения; испытания на полигоне (треке), т.е. на закрытой безопасной территории и испытания на дорогах общего пользования (ДОП), т.е. в реальных условиях эксплуатации. Это и послужило основанием для названия нового метода испытаний – трехкомпонентный. Очевидно, что при многофакторности условий эксплуатации необходимо проводить большое количество испытаний в сжатые сроки. С учетом стремительного распространения и использования систем ADAS различных уровней, одного вида испытаний совершенно недостаточно для подтверждения гарантии безопасности автомобиля в различных вариантах условий эксплуатации. Использование каждого метода в отдельности не дает качественного результата при исследованиях некорректных случаев работы ADAS, следовательно, лишает разработчиков возможности своевременного внедрения действенных контрмер.

Рассмотрим возможность использования трехкомпонентного метода испытаний для исследования российских уникальных случаев некорректной работы ADAS, которые могут привести к возникновению ДТП. В качестве примера рассмотрим случай блокировки радара системы адаптивного круиз контроля (САКК) слоем снежно-грязевых отложений. Данная проблема в данный момент изучается отечественными учеными, в первую очередь, научными коллективами МАДИ и Иркутского Национального Исследовательского Технического Университета (ИрНИТУ) [5-7].

В РФ в зимний период на ДОП широко применяются химические противогололедные материалы (ХПГМ), которые, смешиваясь с выпавшим или идущим снегом, а также растапливая уже образовавшиеся отложения, образуют липкую вязкую смесь, которая загрязняет внешние световые приборы, остекление кабин, зеркала заднего вида и, самое важное в рамках данного исследования – радары системы ADAS. При движении в зимний период при включенной САКК толщина снежно-грязевого слоя увеличивается настолько, что блокирует работу радара: мощности принимаемого сигнала P_c становится недостаточно для преодоления дополнительных помех, и она становится меньше порогового значения $P_{c\ min}$, при котором радар способен распознавать цель. Радар «слепнет», при этом система САКК продолжает работать, пока водитель не получит предупреждение на щитке приборов о нефункционирующей системе. В реальности между этими двумя событиями, как правило, проходит достаточно долгое время, иногда нескольких минут, в течение которых может произойти ДТП. В это время система пытается самодиагностироваться, чтобы подтвердить внутреннюю неисправность. На различных автомобилях данные временные интервалы различны и зависят от множества как внутренних (свойство системы), так и внешних (условия эксплуатации) факторов. На рис. 2 приведены фотографии, сделанные во время испытаний и иллюстрирующие данную ситуацию. С данной проблемой специалисты кафедры Автомобиля МАДИ столкнулись в ходе проведения крупномасштабных испытаний на ДОП РФ.

Применим трехкомпонентный метод испытаний к исследованию данного опасного поведения ADAS и сравним полученные результаты.

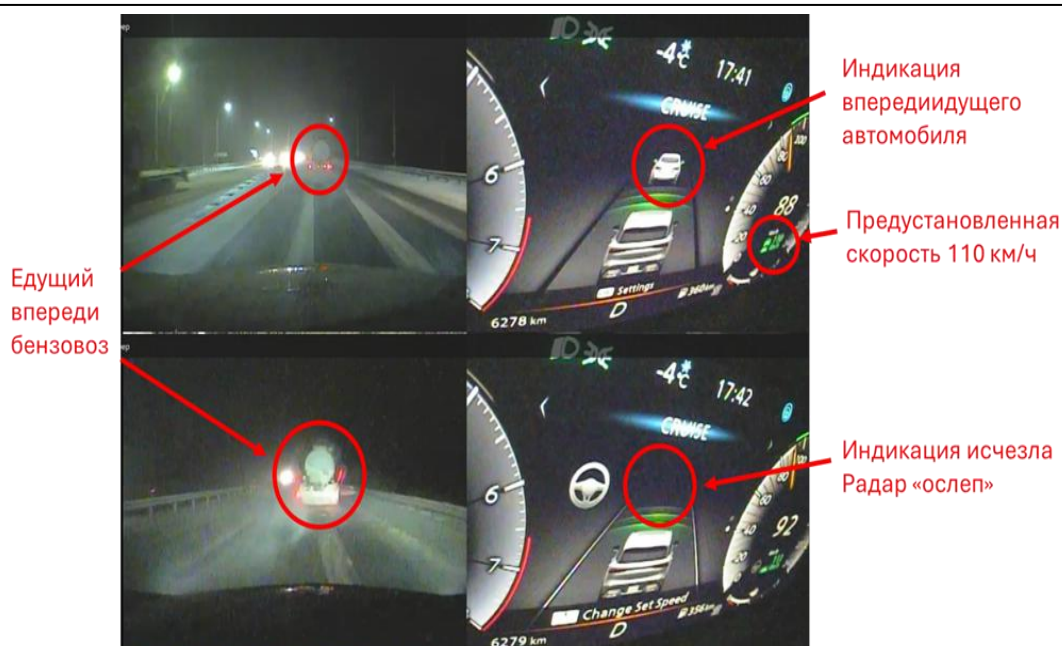


Рис. 2. Пример «ослепления» радара при проведении испытаний автомобиля Nissan Pathfinder на трассе М7 Москва – Нижний Новгород

Fig. 2. Example of radar «blinding» during testing of a Nissan Pathfinder on the M7 Moscow – Nizhny Novgorod highway

Во всех трех случаях испытаний применялась одна и та же методика, и принимало участие два автомобиля: 1 – объект испытаний (ОИ), 2 – ТС-лидер (ТСЛ). Автомобили располагаются друг за другом в одной полосе движения. Скорости во время проведения испытаний: ОИ – постоянная 80 км/ч, установленная САКК; ТСЛ – постоянная 60 км/ч. Схема расположения представлена на рис. 3. Перед началом движения дистанция между автомобилями должна быть больше радиуса действия радара дальнего диапазона ОИ: на практике 250–300 м. Автомобили начинают движение в одном направлении; ОИ начинает движение с некоторой задержкой относительно ТСЛ (примерно 8 сек).

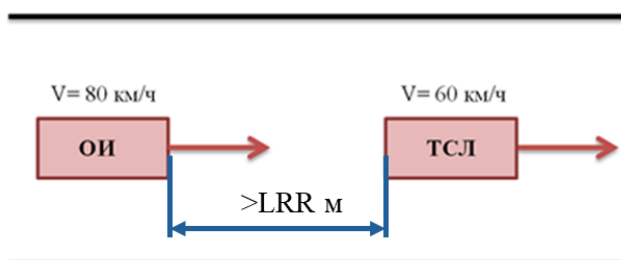


Рис. 3. Схема движения ОИ и ТСЛ

Fig. 3. Motion diagram of the ego vehicle and the leading vehicle

Данная методика предусматривает проведение измерений дистанции уверенного обнаружения («захвата») ТСЛ радаром ADAS, в зависимости от степени затухания электромагнитной волны. Степень затухания в каждом из методов испытаний моделируется по-разному.

Виртуальные испытания в программной среде *Simcenter Prescan*

В настоящее время большое количество научно-исследовательских центров и автопроизводителей для проведения виртуальных испытаний используют программную среду *Simcenter Prescan* [8]. Она является универсальным средством, поскольку базируется на широких возможностях MATLAB/Simulink [9, 10] и позволяет проводить широчайший спектр испытаний систем ADAS в различных виртуальных сценариях на различных виртуальных

автомобилях. Данное программное обеспечение (лицензия МАДИ № 925024) использовалось для исследования процесса влияния погодных факторов на степень загрязнения и работу радара ADAS. В *Prescan* степень затухания электромагнитного излучения радара задается варьированием коэффициента атмосферных затуханий. Данный коэффициент входит в формулу 1, на основании которой программа считает реальную дальность действия радара с учетом атмосферных затуханий:

$$D_{\text{макс п.}} = D_{\text{макс}} e^{-0,115\alpha_3 L} \quad (1)$$

где: $D_{\text{макс}}$ – максимальная дальность действия радара в свободном пространстве, м; $-0,115$ – постоянное числовое значение; α_3 – коэффициент атмосферного затухания, дБ/м; L – максимальная дальность действия радара по техническим характеристикам, м.

Значение самого коэффициента α_3 в программе можно задавать двумя способами. Во-первых, в *Prescan* предусмотрен стандартный набор графиков показывающих, как сильно влияет интенсивность дождя на затухание в зависимости от рабочей частоты радара (рис. 4). Во-вторых, коэффициент можно задать вручную.

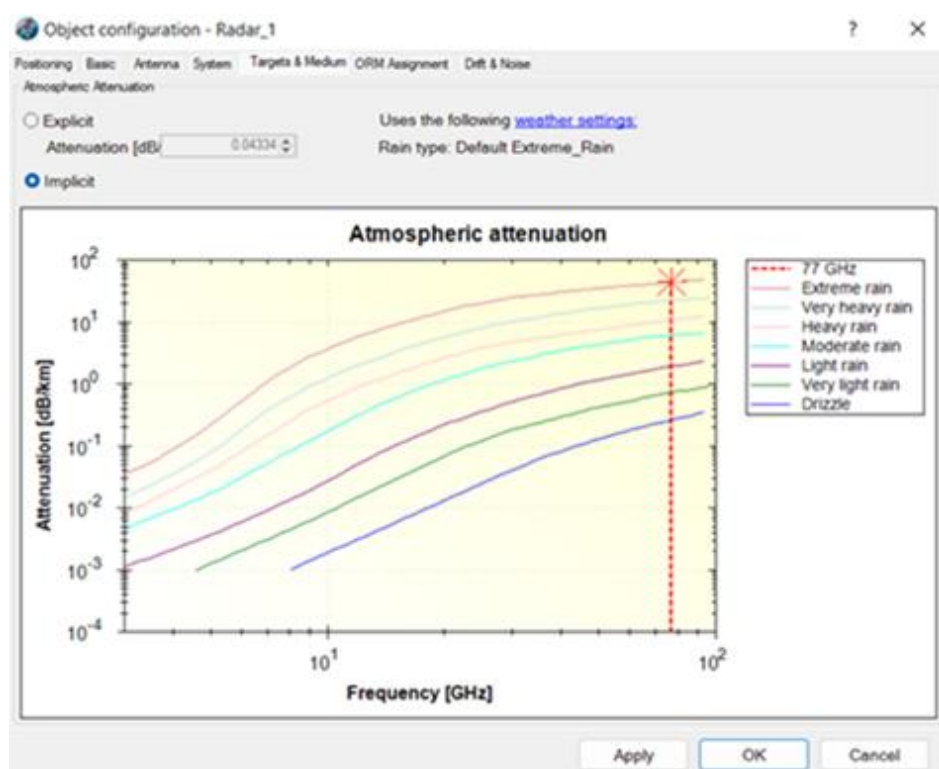


Рис. 4. Использование в *Prescan* опции «Атмосферное затухание» для настройки видимости объектов радаром во вкладке «Цели и средства» для радара дальнего действия (LRR)

Fig. 4. Using the «Atmospheric attenuation» option in PreScan to configure object visibility for the radar in the «Targets and medium» tab for the long range radar (LRR)

Отсутствие других видов осадков в стандартных настройках *Prescan* вполне объяснимо, так как только интенсивность дождя влияет на интенсивность затухания максимальным образом [11]. Другие факторы, увеличивающие степень затухания электромагнитного излучения, разработчики *Siemens* не учли, так как это нетипично для стран с нехолодным климатом. Соответственно, влияние снежно-грязевых отложений на работу радара также учтено не было, хотя последнее оказывает значительно более сильное влияние, чем даже самый интенсивный дождь. Это показывает общую проблему программ для моделирования режимов движения, разработанных в других странах. Ни одна из них полностью не учитывает особенности эксплуатации ТС в России. В связи с этим, при проведении виртуальных испытаний, применение коэффициентов атмосферного затухания было разделено на две группы. До уровня 0,04334 дБ/м, соответствующего определению «Extreme rain» (ливень), в программе

использовались предварительно заданные программой коэффициенты. Каждый из них соответствует определенной интенсивности дождя. Для всех коэффициентов определялась дистанция «захвата». Свыше уровня 0,04334 дБ/м коэффициенты подбирались эмпирическим путем по одинаковой дистанции уверенного определения цели при полигонных испытаниях и испытаниях на ДОП. Например коэффициент, равный 0,09668 дБ/м, соответствует минимальной дистанции «захвата». Дальнейшее повышение коэффициента приводит к тому, что радар становится «слепым» еще до начала заезда, «не видит» ТСЛ вообще, и эксперимент теряет смысл. В реальных условиях это эквивалентно полному покрытию радара металлической фольгой.

Использование предварительно заданных в программе коэффициентов затухания, при их значениях меньше 0,04334 дБ/м, объясняется необходимостью проверки точности соответствия искусственно созданных в программе климатических условий (коэффициентов) реальной ситуации (толщине слоя грязи) на дорогах. Сравнение показало хорошие результаты. Однако разработчикам программы необходимо расширить ряд изначально заданных коэффициентов свыше 0,04334 дБ/м, чтобы их полный диапазон полностью соответствовал полному диапазону толщин слоя грязи на радаре в реальной эксплуатации. В этом случае программа будет полностью моделировать российские условия эксплуатации.

Испытания на полигоне

С одной стороны, с помощью данного способа можно получать более достоверные, по сравнению с имитационными испытаниями, результаты в зависимости от различных реальных эксплуатационных факторов. С другой стороны, он позволяет проводить испытания в более безопасных условиях по сравнению с испытаниями на ДОП.

В контексте прикладной задачи настоящего исследования необходимость полигонных испытаний была обусловлена двумя основными целями:

- 1) поиск материалов или создание устройств, способных заменить естественные снежно-грязевые отложения и легко воспроизводимых в любое время года;
- 2) разработка на данной основе методики исследований, которую можно использовать на полигоне круглогодично и быть независимым от погодных факторов.

Необходимо искусственно создать экран, расположенный перед радаром, который ослабляет энергию электромагнитной волны, проходящей через него, как от излучателя (радар), так и отраженной от препятствия. Рассматривалось два варианта создания искусственного экрана: нанесение слоя гончарной глины на рабочую поверхность и создание специальных экранирующих решеток.

Первый вариант, несмотря на простоту использования и легкость применения, обладает рядом существенных недостатков. Главный из них – невозможность создания равномерного слоя одинаковой толщины на всей поверхности радара, делает его использование неприемлемым.

Второй вариант – создание набора специальных экранирующих решеток – позволяет пошагово увеличивать степень экранирования, а, следовательно, и коэффициент затухания электромагнитного излучения. Решетки изготавливались на базе ацетатной пленки толщиной 150 мкм, практически не экранирующей прохождение электромагнитных волн. На пленку с шагом $H = 10$ мм параллельно друг другу наклеивались полосы различной ширины, выполненные из алюминиевой клейкой ленты. Ширина алюминиевой полосы менялась от 0,4 мм до 10 мм с шагом 0,1 мм. В случае ширины 10 мм решетка превращается в алюминиевый лист и полностью блокирует радар. На рис. 5 представлена схема экранирующей решетки.

Шаг решетки p – это отношение ширины экранирующей полосы h_1 к сумме ширин, экранирующей и пропускающей полос, H .

$$p = \frac{h_1}{h_1 + h_2} = \frac{h_1}{H} \quad (2)$$

Например, в случае если $H = 10$ мм, а ширина алюминиевой полосы 6 мм, шаг решетки будет равен 0,6. Шаг можно также представлять как соотношение процентов. В описанном выше примере 60 % х 40 %, т.е. 60 % общей ширины H занимает экранирующая полоса и соответственно 40 % – пропускающая.

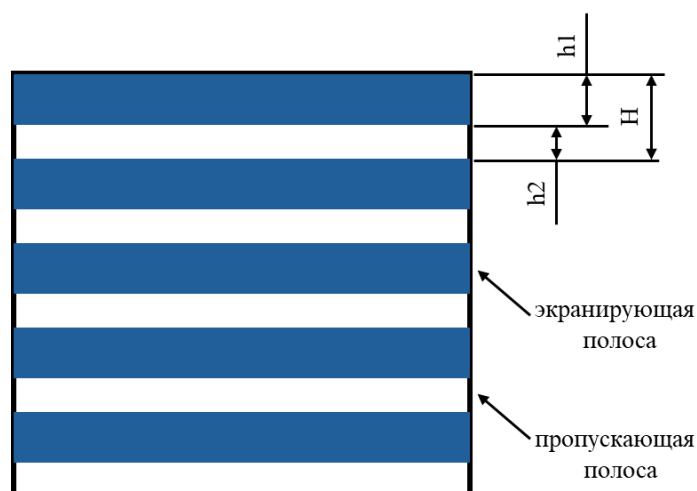


Рис. 5. Схема экранирующей решетки

Fig. 5. Scheme of the aperture blockage grid

Для проведения экспериментальных исследований был изготовлен набор решеток с шириной блокирующей полосы от 4 до 9 мм, с шагом 1 мм. В качестве объекта испытаний выбран автомобиль *Nissan X-Trail*. Основной причиной выбора данного ТС послужила возможность считывания и расшифровки CAN команд между радаром и блоком ADAS. Пример установки экранирующей решетки на ОИ приведен на рис. 6. Решетка устанавливалась таким образом, чтобы экранирующие полосы располагались горизонтально.



Рис. 6. Установка экранирующей решетки на Nissan X-Trail

Fig. 6. Installation of the aperture blockage grid on a Nissan X-Trail

Испытания проводились по представленной в данной работе методике на одном из участков комплекса специальных испытательных дорог Центра испытаний НАМИ в Дмитровском районе Московской области. ТСЛ двигалось с постоянной скоростью 60 км/ч. В системе САКК ОИ устанавливалась скорость 80 км/ч. Перед началом движения дистанция между автомобилями должна превышать радиус действия радара дальнего диапазона. ОИ начинал движение по той же полосе, что и ТСЛ с запаздыванием 8 сек. После «захвата» радаром объекта испытаний ТСЛ, ОИ, постепенно снижая скорость до 60 км/ч, приближался к ТСЛ до расстояния, предварительно заданного в начале эксперимента. Далее оба автомобиля

продолжали двигаться с одинаковой скоростью 60 км/ч и постоянной дистанцией между ними до окончания испытательного участка дороги. На объекте испытаний предусматливалась минимальная дистанция между автомобилями. Основная задача заключалась в определении дистанции уверенного «захвата» радаром объекта ОИ автомобиля, идущего впереди, и оценить, насколько экранирование радара уменьшает эту дистанцию. Запись параметров движения и работы ADAS ОИ осуществлялась специальным диагностическим прибором *Consult III*, использующим CAN-команды и переводящим их в реальные физические величины. Кроме того, для визуализации испытаний, использовался видеорегистратор с двумя камерами. Одна фиксировала обстановку перед ОИ, вторая – информацию на щитке приборов ОИ. Синхронизация видеоизображения и параметрической записи осуществлялась за счет моргания фарами дальнего света. Данный момент одновременно фиксировался и на видеорегистраторе, и в изменениях CAN команд.

При проведении полигонных и дорожных испытаний первоначально была определена дистанция обнаружения в случае абсолютно чистого радара, которая составила 102,2 м. Графики изменения дистанции между автомобилями, скорости ОИ и относительной скорости ОИ и ТСЛ представлены на рис. 7.



Рис. 7. Изменение дистанции между ОИ и ТСЛ, относительной скорости и скорости ОИ в случае чистого радара

Fig. 7 Change in the distance between the ego vehicle and the leading vehicle, relative speed, and ego vehicle speed for a clean radar

До момента уверенного захвата цели на 26-й секунде радар определял различные посторонние предметы, создавая так называемый шум. По достижении расстояния 102,2 м (начало горизонтального участка графика) произошел уверенный захват движущегося впереди ТСЛ. Далее, приблизительно в течение двух секунд, блок управления ADAS анализирует полученную информацию, сравнивает ее с информацией, полученной с видеокамеры, и после этого посылает управляющий сигнал в CAN на включение индикатора на щитке приборов и начало торможения объекта испытаний. К сожалению, по сигналам CAN невозможно определить момент подачи сигнала на включение индикатора. Поэтому данный момент определяется из покадрового просмотра видеозаписи, сделанной с камеры, установленной на щитке приборов; частота видеозаписи 30 кадров/сек. Водитель ОИ в момент появления индикатора

на щитке приборов моргает дальним светом фар, при этом на щитке загорается синий индикатор. Данный момент также фиксируется камерой. Зная момент зажигания фар из CAN, можно покaдрово отсчитать назад момент появления индикатора, подтверждающего «захват» ТСЛ. В случае, представленном на рисунке, данный интервал составил 0,5 с.

Далее в ходе полигонных испытаний ступенчато с шагом 1 мм увеличивалась ширина алюминиевой полосы решетки, т.е. ее экранирующая способность. После этого проводились аналогичные заезды. Как показал опыт, решетки с шагом 0,6 и ниже не вызывают сокращения дистанции «захвата» – 102,2 м. Решетки с шагом 10 мм (ширина алюминиевой полосы) полностью блокируют радар, делая изначально тестовый заезд бессмысленным. Графики, показывающие сокращение дистанции уверенного обнаружения в зависимости от увеличения экранирующей способности решетки, представлены на рис. 8.

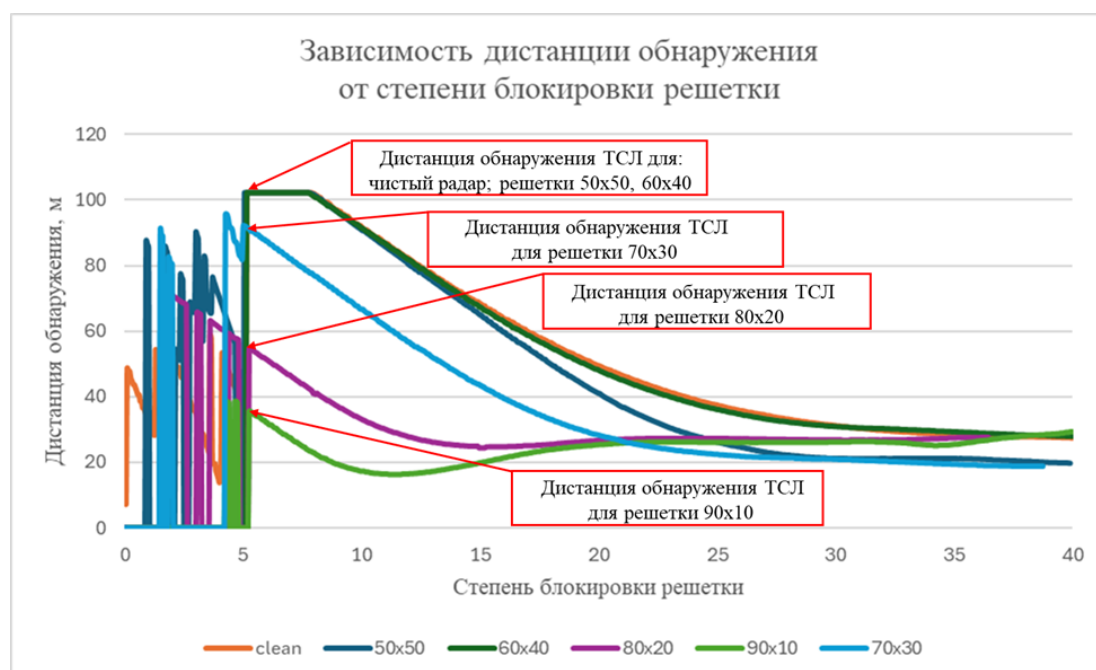


Рис. 8. Зависимость дистанции уверенного обнаружения ТСЛ от степени экранирования решетки

Fig. 8. Dependence of the reliable detection range of the leading vehicle on the degree of grid blockage

Графики, полученные для различных решеток, были наложены друг на друга. Момент уверенного «захвата» цели каждого из них приведен к одному моменту времени – 5 с от начала записи. Это позволяет наглядно сравнить, как менялась дистанция в зависимости от увеличения ширины алюминиевой полосы решетки. Данные левее отметки 5 с – различные шумы. При степени блокирования решетки до 60 % x 40 % дистанция обнаружения не меняется по сравнению с чистым радаром и составляет 102,2 м. Снижение дистанции начинает наблюдаться с решетки 70 % x 30 %. При использовании решеток со степенью 70 % x 30 % и выше после определения цели происходит ее потеря на незначительные промежутки времени. Вне зависимости от степени блокировки решетки, после выравнивания скоростей ОИ и ТСЛ до 60 км/ч автомобили продолжают следовать друг за другом на предустановленной дистанции – 25-27 м до окончания записи.

В ходе эксперимента все решетки устанавливались перед радаром как в горизонтальном положении экранирующих полос, так и в вертикальном; проводилось не менее пяти заездов для каждого положения решетки. Как показала практика, работа радара при горизонтальном положении полос является более стабильной, т.е. дистанция обнаружения изменяется меньше при вертикальном сдвиге решетки, чем при горизонтальном сдвиге решетки с вертикальными экранирующими полосами, при одной и той же степени экранирования. Кроме

того, при вертикальном расположении экранирующей полосы дистанции обнаружения практически в два раза меньше, чем при горизонтальном положении, что при больших толщинах делает проведение эксперимента небезопасным: примерно в половине заездов водитель вынужден применять экстренное торможение для предотвращения столкновения с ТСЛ. Разброс результатов измерений при вертикальном расположении в разы больше, чем при горизонтальном расположении и достигает неприемлемых значений даже при незначительных степенях экранирования. При одной и той же ширине экранирующей полосы при вертикальном ее расположении значительно больше радар значительно чаще теряет цель после ее обнаружения, чем при горизонтальном расположении (рис. 9). Это говорит о том, что результаты испытаний с решеткой при вертикальном расположении экранирующих полос крайне нестабильны и очень чувствительны к даже незначительному (на ширину экранирующей полосы) смещению решетки. Соответственно, создаются большие трудности с воспроизведением стабильных условий проведения эксперимента даже для одного автомобиля и данный вариант совершенно неприемлем для сравнительных испытаний. Следовательно, испытания работы радара следует проводить только при горизонтальном расположении экранирующих полос решетки.

Экспериментальные исследования при других вариантах ориентации экранирующих полос в рамках данной работы не проводились.

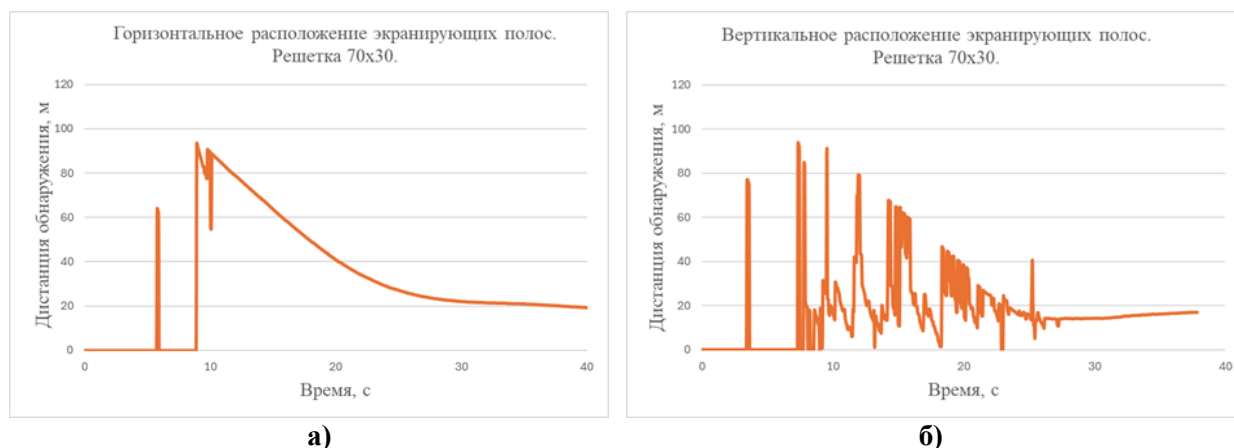


Рис. 9. Сигнал изменения расстояния между ТСЛ и ОИ, установленной решеткой 70x30 при:
 а) горизонтальном расположении экранирующих полос; б) вертикальном расположении

Fig. 9. Signal of the distance variation between the leading vehicle and the ego vehicle with the 70×30 grid installed:

а) horizontal arrangement of blocking strips; б) vertical arrangement

Различное влияние расположения решеток и их смещения на дистанцию обнаружения обусловлено геометрическим расположением передающих и принимающих антенн на антенной плате радара. Матрица антенн на радарах *Continental ARS 404-21 Entry* и *ARS 408-21 Premium Long Range Sensor 77GHz* [12] имеет большую высоту, чем ширину, поэтому перемещения горизонтальной решетки вверх-вниз не перекрывает всех приемных антенн, в то время как при смещении вертикальной решетки вправо-влево блокируется значительно большее количество приемных антенн.

Таким образом, на основании результатов полигонных испытаний доказано, что возможно круглогодичное использование экранирующих решеток для моделирования экранирующего эффекта, вызываемого реальным слоем снежно-грязевых отложений. С помощью данного метода возможно проводить не только испытания одного автомобиля, но и сравнительные испытания различных моделей ТС, оснащенных ADAS. В их ходе можно установить, насколько сильно степень блокировки решетки влияет на дистанцию «захвата» на разных моделях. Данные подобных испытаний можно использовать для сравнения характеристик разных моделей ТС-бенчмаркинга.

Испытания на дорогах общего пользования

Данный вид испытаний является основным в трехкомпонентном подходе к испытаниям. Именно он позволяет выявить реальные сценарии некорректной работы системы ADAS. Кроме того, испытания проводятся в тех же условиях, в которых владельцы автомобилей с ADAS эксплуатируют ТС. Этот вид испытаний позволяет реально оценить границу условий штатной эксплуатации (УШЭ) ADAS и работу системы внутри ее и за ее пределами. Присутствуют и недостатки у данного вида испытаний, к которым можно отнести: трудность воспроизведения одних и тех же условий эксплуатации при оценке работы системы ADAS на проектируемом автомобиле и автомобилях-аналогах; повышенная опасность проведения, связанная с присутствием других участников движения на ДОП в момент проведения эксперимента; высокие материальные, человеческие и временные затраты.

При исследовании сценария блокировки радара слоем снежно-грязевых отложений использовалась та же методика, что и при двух других видах испытаний. Отличием является то, что при этом виде испытаний эффект затухания электромагнитного излучения достигается в основном за счет увеличения толщины слоя снежно-грязевых отложений: чем толще слой, тем сильнее затухание. Как и в случае полигонных испытаний в ходе испытаний на ДОП с помощью регистрирующего оборудования были получены графики, отражающие уменьшение дистанции уверенного обнаружения ТСЛ в зависимости от толщины снежно-грязевых отложений (рис. 10).

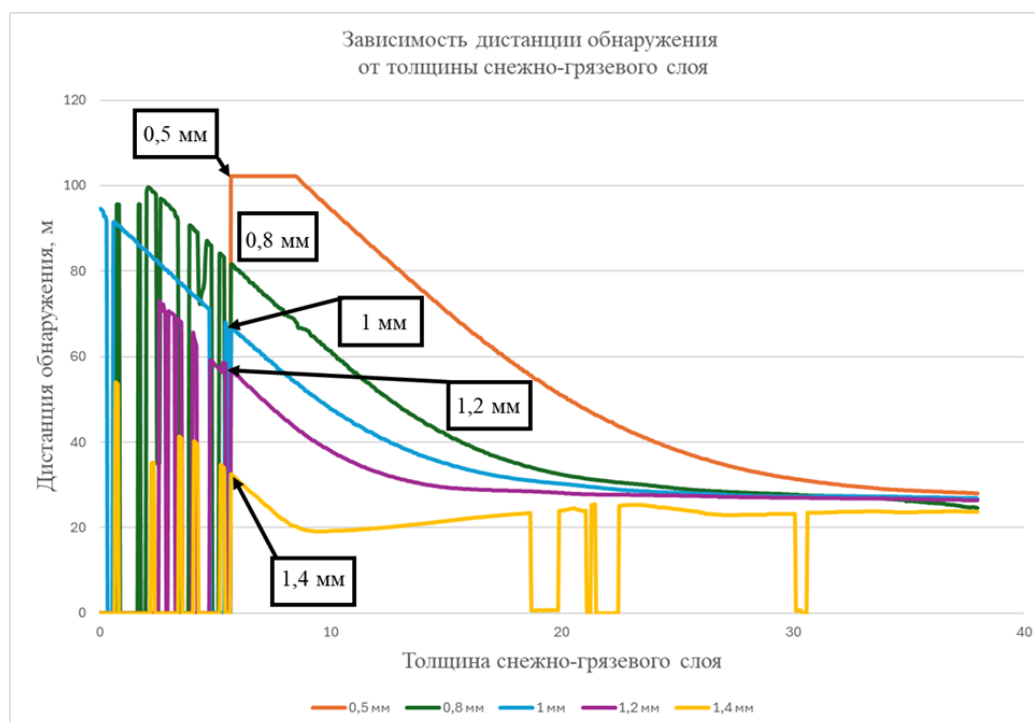


Рис. 10. Зависимость дистанции уверенного обнаружения ТСЛ от толщины снежно-грязевого слоя, покрывающего рабочую поверхность радара

Fig. 10. Dependence of the reliable detection range of the leading vehicle on the thickness of the snow and mud layer covering the radar working surface

Графики качественно носят тот же характер, что и полученные при использовании блокирующей решетки. При толщине слоя меньше 0,5 мм дистанция обнаружения не изменяется по сравнению с чистым радаром и составляет 102,2 м. Снижение дистанции начинает наблюдаться при превышении толщины снежно-грязевого слоя 0,5 мм. При достижении толщины слоя 1,5 мм радар полностью «слепнет» и ОИ перестает определять транспортное средство лидер. При приближении толщин к 1,5 мм очень часто происходит потеря и после-

дующее повторное определение ТСЛ после первоначального «захвата», что говорит о нестабильной работе системы СААК.

Кроме того, в ходе испытаний на дорогах общего пользования проводились большие работы по изучению скорости загрязнения радара в зависимости от различных эксплуатационных факторов и конструктивных особенностей автомобиля. Данные исследования проводились согласно базовой методике, подробно описанной в [4].

Сравнение результатов виртуальных, полигонных испытаний и испытаний на ДОП

В табл. 1 приведены сравнения дистанций «захвата» ТСЛ при имитационных, полигонных испытаниях и испытаниях на дорогах общего пользования.

Таблица 1.

Сравнение дистанций уверенного обнаружения ТСЛ при имитационных, полигонных испытаниях и испытаниях на дорогах общего пользования

Table 1.

Comparison of reliable detection ranges of the leading vehicle in simulation, proving ground, and public road tests

Дороги общего пользования		Полигон. Экранирующая решетка		Моделирование в <i>Prescan</i>	
Толщина загрязняющего слоя, мм	Дистанция обнаружения, м	Степень блокировки решетки, %	Дистанция обнаружения, м	Коэффициент атмосферного затухания, дБ/м	Дистанция обнаружения, м
0,5	102,2	60/40	100,9	0,02195	102,6
0,8	81,6	70/30	87	0,03265	85,3
1	66,5	-	-	0,04334	70,94
1,2	57	80/20	60,9	0,05334	59,7
1,4	32,5	90/10	23,2	0,09668	28,3
1,5	0	100/0	0	0,15234	0

Для измерений в диапазоне, штатно заданных в *Prescan* коэффициентах затухания, разница между значениями, полученными различными способами, составляет в среднем 6,3 %. В случае степени блокировки 80/20 или толщине отложений 1,2 мм – 6,5 %. В случае снежно-грязевого слоя 1,4 мм или решетки 90x10 резко падает стабильность результатов, так как радар почти «слепой» и часто повторно теряет и обнаруживает цель, что вызывает значительный (до 29 %) разброс результатов. Если же оценивать расхождение результатов в целом, то разница не превышает 12 %. Необходимо дополнительно отметить, что при использовании штатно заданных коэффициентов в программе *Prescan* разница между значениями всех трех видов испытаний не превысила 6,5 %.

Более наглядно результаты экспериментальных исследований показаны на графике на рис. 11, где изображены кривые, описывающие уменьшение дистанции «захвата» в зависимости от толщины слоя снежно-грязевых отложений; степени блокировки экранирующей решетки и коэффициента атмосферных затуханий. Все кривые расположены очень близко друг к другу. Для полигонных испытаний отсутствует результат между решетками со степенью блокировки от 70x30 до 80x20, так как в этом диапазоне технически невозможно изготовить решетку с шириной экранирующей полосы от 7 до 8 мм. На представленном графике данный участок обозначен прерывистой линией.

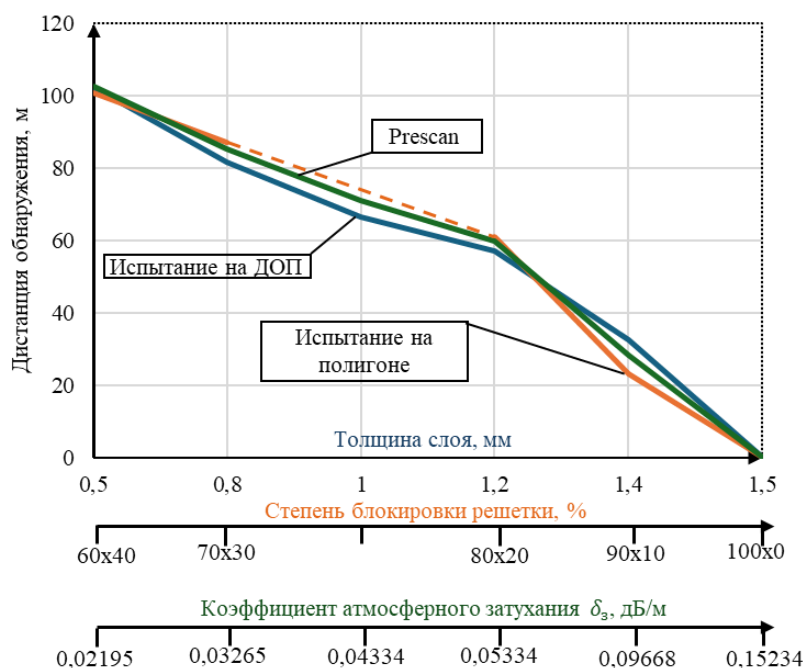


Рис. 11. Уменьшение дистанции уверенного обнаружения ТСЛ в зависимости от толщины слоя снежно-грязевых отложений, степени блокировки решетки и коэффициента атмосферных затуханий

Fig. 11. Decrease in the reliable detection range of the leading vehicle as a function of snow and mud deposit thickness, degree of grid blockage, and atmospheric attenuation coefficient

Выводы

1. Доказана возможность использования трехкомпонентного подхода к проведению испытаний систем ADAS второго уровня.
2. Доказана возможность использования трехкомпонентного метода испытания для исследования уникальных сценариев некорректной работы системы ADAS в РФ.
3. Исключение одного какого-либо вида испытаний из комплексного метода снижает качество проведения испытаний. Кроме того, исключение какого-либо вида испытаний может привести к увеличению материальных и временных затрат на проведение оставшихся и, как следствие, на испытания в целом.
4. Показана хорошая сходимость результатов имитационных, полигонных испытаний и испытаний на дорогах общего пользования.
5. Практически доказана возможность получения эмпирических коэффициентов затухания для применения имитационных испытаний.
6. Необходимо дорабатывать исследовательское программное обеспечение с целью улучшения отображения в нем реальных российских условий эксплуатации. Как альтернатива может быть рассмотрена разработка своих исследовательских программ, ориентированных на локальные условия эксплуатации.
7. Недопустимо сокращение объема испытаний на дорогах общего пользования, как единственного достоверного источника информации о реальных сценариях некорректной работы ADAS в РФ.

Библиографический список

1. **SAE J3016.** Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems. – U.S.A.: SAE, 2021. – 41 p.

2. **Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 018/2011.** О безопасности колесных транспортных средств (с изменениями на 16 февраля 2011 года). – [Б. м.: б. и., 2011].
3. **ECE/TRANS/WP.29/2021/61.** Организация Объединенных Наций. Всемирный форум для согласования правил в области транспортных средств. Новый метод оценки/испытаний для автоматизированного вождения (НМОИ) – Основной документ. – [Б. м.]: ООН, 2021.
4. **Дьяков, Ф.К.** Проблема блокировки радар системы ADAS в реальных зимних условиях эксплуатации на дорогах России. Методика проведения дорожных испытаний / Ф.К. Дьяков, А.Н. Андреев, М.И. Исакова, А.И. Калинин // Вестник Московского Автомобильно-Дорожного Государственного Технического университета (МАДИ). – 2022. – № 4 (71). – С. 18-27.
5. **Dyakov, P.K.** Practical Aspects of Electrical Vehicle Usage on Current Condition / P.K. Dyakov, A.N. Andreev, M.A. Toporkov, M.I. Alexeenkov, E.P. Dyakov // 2024 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED). – Moscow, 2024. – P. 1-4. – DOI: 10.1109/TIRVED63561.2024.10769919.
6. **Ivanov, A.M.** Pollution Practical Research of Adaption Cruise Control System Radar During Winter Usage Condition / A.M. Ivanov, A.N. Andreev, P.K. Dyakov, N.V. Popov, A.I. Kalinin // 2022 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED). – Moscow, 2022. – P. 1-5. – DOI: 10.1109/TIRVED56496.2022.9965517.
7. **Громолова, В.О.** К вопросу о влиянии загрязнения внешних световых приборов химическими противогололедными материалами на безопасность движения автотранспортных средств / В.О. Громолова, А.И. Федотов, В.Г. Зедгенизов, С.М. Гергенов // Вестник СибАДИ. – 2018. – Т. 15, № 1 (59). – С. 55-60.
8. **Simcenter Prescan.** User manual. Version 2019.2.0 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.caxsoft.net/ltxy/CFD/Siemens.Simcenter.PreSCAN.2019.2.0.d.html> (дата обращения: 25.11.2025).
9. **Дьяконов, В.П.** MATLAB 6.5 SP1/7/7 SP1/7 SP2+Simulink 5/6. Инструменты искусственного интеллекта и биоинформатики / В.П. Дьяконов, В.В. Круглов. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2006. – 456 с.
10. **Леоненков, А.В.** Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzy TECH / А.В. Леоненков. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
11. **Канцельсон, В.З.** Основы радиолокации и импульсной техники / В.З. Канцельсон, Н.И. Тимченко, В.В. Волков. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1985. – 334 с.
12. **Liebske, R.** Short Description ARS 404-21 Entry + ARS 408-21 Premium 21 Long Range Radar Sensor 77 GHz Technical Data Version 1.03 en [Электронный ресурс] / R. Liebske. – URL: https://github.com/lf2653/myrepository/blob/master/documentation/Short-Description_2017_07_09-06_ARS404-21%2BARS408-21_en_V1.06.pdf (дата обращения: 25.11.2025).

References

1. SAE J3016. Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems. U.S.A.: SAE; 2021. 41 p.
2. Tekhnicheskij reglament Tamozhennogo soyuza TR TS 018/2011. O bezopasnosti kolesnykh transportnykh sredstv (s izmeneniyami na 16 fevralya 2011 goda) [Technical Regulation of the Customs Union TR CU 018/2011. On safety of wheeled vehicles (as amended on February 16, 2011)]. [place unknown]; 2011. (in Russian).
3. ECE/TRANS/WP.29/2021/61. Organizatsiya Ob"edinennykh Natsiy. Vsemirnyy forum dlya soglasovaniya pravil v oblasti transportnykh sredstv. Novyy metod otsenki/isyptaniy dlya avtomatizirovannogo vozhdeniya (NMOI) – Osnovnoy dokument [United Nations. World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations. New Method of Assessment/Testing for Automated Driving (NMOI) – Framework Document]. [place unknown]: UN; 2021. (in Russian).
4. Dyakov F.K., Andreev A.N., Isakova M.I., Kalinin A.I. Problema blokirovki radara sistemy ADAS v real'nykh zimnikh usloviyakh ekspluatatsii na dorogakh Rossii. Metodika provedeniya dorozhnykh ispytaniy [The problem of ADAS system radar blocking in real winter operating conditions on Russian roads. Methodology of road tests]. Vestnik Moskovskogo Avtomobil'no-Dorozhnogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo universiteta (MADI) [Bulletin of Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)]. 2022;(4):18-27. (in Russian).
5. Dyakov P.K., Andreev A.N., Toporkov M.A., Alexeenkov M.I., Dyakov E.P. Practical Aspects of Electrical Vehicle Usage on Current Condition. In: 2024 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED). Moscow; 2024. p. 1-4. doi: 10.1109/TIRVED63561.2024.10769919.

6. Ivanov A.M., Andreev A.N., Dyakov P.K., Popov N.V., Kalinin A.I. Pollution Practical Research of Adaption Cruise Control System Radar During Winter Usage Condition. In: 2022 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED). Moscow; 2022. p. 1-5. doi: 10.1109/TIRVED56496.2022.9965517.
7. Gromolova V.O., Fedotov A.I., Zedgenizov V.G., Gergenov S.M. K voprosu o vliyaniy zagryazneniya vneshnikh svetovykh priborov khimicheskimi protivogolodnymi materialami na bezopasnost' dvizheniya avtotransportnykh sredstv [On the issue of the influence of contamination of external lighting devices with chemical anti-icing materials on the traffic safety of motor vehicles]. *Vestnik SibADI* [Bulletin of SibADI]. 2018;15(1):55-60. (in Russian).
8. Simcenter Prescan. User manual. Version 2019.2.0. Available from: <https://www.caxsoft.net/ftyxy/CFD/Siemens.Simcenter.PreSCAN.2019.2.0.d.html> [cited 2025 Nov 25].
9. D'yakonov V.P., Kruglov V.V. MATLAB 6.5 SP1/7/7 SP1/7 SP2 + Simulink 5/6. Instrumenty iskusstvennogo intellekta i bioinformatiki [MATLAB 6.5 SP1/7/7 SP1/7 SP2 + Simulink 5/6. Tools of artificial intelligence and bioinformatics]. Moscow: SOLON-PRESS; 2006. 456 p. (in Russian).
10. Leonenkov A.V. Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzy TECH [Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzy TECH environment]. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg; 2005. 736 p. (in Russian).
11. Kantsel'son V.Z., Timchenko N.I., Volkov V.V. Osnovy radiolokatsii i impul'snoy tekhniki [Fundamentals of radar and pulse technology]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1985. 334 p. (in Russian).
12. Liebske R. Short Description ARS 404-21 Entry + ARS 408-21 Premium 21 Long Range Radar Sensor 77 GHz Technical Data Version 1.03 en. Available from: https://github.com/lf2653/myrepository/blob/master/documentation/Short-Description_2017_07_09-06_ARS404-21%2BARs408-21_en_V1.06.pdf [accessed 2025 Nov 25].

**Дата поступления
в редакцию: 03.02.2026**

**Дата принятия
к публикации: 18.07.2026**

УДК 629.3.027.3

EDN СКРHXO

ИЗМЕНЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К УПРАВЛЯЕМОСТИ АВТОМОБИЛЯ КАК ПУТЬ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

С.А. Коростелев

ORCID: 0009-0003-1382-5589 e-mail: korsan73@mail.ru

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
Барнаул, Россия**М.Ю. Молев**

ORCID: 0009-0000-3689-6249 e-mail: molev.michail@yandex.ru

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Нижний Новгород, Россия**М.Г. Черевастов**

ORCID: 0000-0002-0104-4414 e-mail: chermamaxim_1978@mail.ru

ГУ МВД России по Нижегородской области
Нижний Новгород, Россия

Проанализированы изменения требований к управляемости транспортных средств, реализованные в последние годы. Показано, что для повышения безопасности дорожного движения необходимо оценивать не только конструкцию автомобиля, но и ее адаптацию к действиям, в том числе, ошибочным, со стороны водителя. Отмечено, что именно ошибки в позиционировании автомобиля на трассе и в угле поворота управляемых колес, наряду с длительностью переходного процесса, являются определяющими для безопасного выполнения маневра. При выполнении маневра «переставка» предложено уменьшить динамическую чувствительность к управлению транспортного средства для компенсации ошибок неопытных водителей, что актуально в связи с отсутствием нормативно-технических требований.

Ключевые слова: управляемость; безопасность; ошибки в действиях водителей; динамическая чувствительность к управлению.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Коростелев, С.А. Изменение требований к управляемости автомобиля как путь повышения безопасности дорожного движения / С.А. Коростелев, М.Ю. Молев, М.Г. Черевастов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2026. № 3. С. 82-99. EDN СКРHXO

CHANGING VEHICLE HANDLING REQUIREMENTS AS A WAY TO IMPROVE ROAD SAFETY

S.A. Korostelev

ORCID: 0009-0003-1382-5589 e-mail: korsan73@mail.ru

Polzunov Altai State Technical University
Barnaul, Russia**M.Yu. Molev**

ORCID: 0009-0000-3689-6249 e-mail: molev.michail@yandex.ru

Nizhny Novgorod State University n.a. N.I. Lobachevsky
Nizhny Novgorod, Russia

M.G. CherevastovORCID: 0000-0002-0104-4414 e-mail: chermaxim_1978@mail.ru

Ministry of Internal Affairs of Russia in the Nizhny Novgorod Region

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article discusses changes in vehicle handling requirements implemented in recent years. It is shown that in order to improve road safety, it is necessary to evaluate not only the vehicle design, but also its adaptation to driver actions, including erroneous ones. It is noted that errors in vehicle positioning on the road and in the wheels steer angle, along with the duration of the transient process, are decisive for the safe execution of a manoeuvre. Due to the absence of regulatory technical requirements, it is proposed to reduce the dynamic handling sensitivity of the vehicle to compensate for errors made by inexperienced drivers during the lane change manoeuvre.

Key words: handling; safety; driver errors; dynamic handling sensitivity.

FOR CITATION: S.A. Korostelev, M.Yu. Molev and M.G. Cherevastov. Changing vehicle handling requirements as a way to improve road safety. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 3. Pp. 82-99. EDN CKPHXO

Введение

Высокая аварийность – один из основных сдерживающих факторов развития автомобильного транспорта. Так, на 1 млн тонн перевозимого груза по автомобильным дорогам Российской Федерации приходится 2,14 погибших против 0,005 погибших на железнодорожном транспорте и 1,0 погибших на воздушном. На 1 млн перевезенных пассажиров число погибших на автомобильном транспорте составляет 1300 чел. (на железнодорожном транспорте – 0,0045 и 566 на воздушном) [1]. Социальная значимость дорожно-транспортных происшествий (ДТП) выходит далеко за рамки статистики погибших и пострадавших людей, а также количества поврежденных автомобилей. Это один из самых чувствительных индикаторов общего состояния общества, отражающий сложный комплекс проблем – от качества инфраструктуры до уровня правосознания граждан.

Во-первых, ДТП – это колоссальный демографический и репродуктивный удар. В авариях чаще всего гибнут люди молодого и среднего возраста, т.е. наиболее активная и трудоспособная часть населения. Каждая такая потеря — это не только человеческая трагедия, но и разрыв социальных связей, нереализованный потенциал и подрыв экономической стабильности. Во-вторых, аварии создают тяжелую нагрузку на систему здравоохранения и социальные службы. Тысячи людей становятся инвалидами, требуя длительного лечения, реабилитации и пожизненной поддержки со стороны государства и родственников. Это формирует «скрытое бремя» для бюджета и снижает качество жизни целых семей. В-третьих, высокая аварийность формирует устойчивый общественный стресс и недоверие. Когда люди каждый день видят агрессию на дорогах или боятся отпускать ребенка в школу, это разрушает ощущение безопасности и комфорта городской среды. Дорожный травматизм напрямую влияет на доверие к власти и ее способности обеспечивать базовые гарантии безопасности. Наконец, ДТП обнажают социальное неравенство и культурные проблемы. Культура вождения, состояние дорог и качество машин часто коррелируют с уровнем доходов. Аварии по вине пьяных или лихачей – это симптом более глубоких проблем, связанных с низкой ответственностью перед обществом.

Каждый из факторов аварийности требует изучения и анализа, на основе которых должны быть намечены пути снижения как самих ДТП, так и их материальных и социальных последствий.

Разработка эффективных мер снижения аварийности потребовала развития двух взаимосвязанных исследовательских направлений. Первое касается повышения качества подготовки водителей, включая как теоретическую, так и практическую составляющую обучения. Второе связано с адаптацией конструкции транспортных средств к антропометрическим, физиологическим и психофизическим особенностям человека, управляющего автомобилем. Научно обоснованных методов выбора параметров автомобиля, обеспечивающих макси-

мальную совместимость с физиологическими особенностями водителей до настоящего времени не существует, поэтому разработка требований к управляемости транспортных средств, максимально адаптированных к условиям дорожного движения, является актуальной научной задачей.

Материалы и методы

Фундаментальное понятие *управляемости* определяет принципиальную возможность перевода некой системы из одного состояния в другое за конечное время посредством целенаправленного внешнего воздействия. При этом состояние считается управляемым, если существует управляющее воздействие, которое переводит систему из этого состояния в исходное. Способность системы совершить обратный переход из исходного состояния в требуемое описывают понятием *достижимость*. При этом система является полностью достижимой, если из любого состояния можно перейти в любое другое. Эти два понятия эквивалентны для систем с непрерывным временем. Еще одно фундаментальное понятие – *наблюдаемость*. Состояние называют ненаблюдаемым, если выход «свободной» системы, т.е. системы, на которую не действует никакое управляющее воздействие, равняется 0 для любого момента времени, следующего за началом наблюдения. Система является полностью наблюдаемой, если ни одно из ее состояний не является ненаблюдаемым. Однако, несмотря на универсальность подхода Калмана [2], в прикладной области теории управляемого движения колесных машин до сих пор наблюдается значительный разброс, а порой и прямая противоречивость взглядов на трактовку этого понятия. Такая ситуация свидетельствует о высокой актуальности разработки унифицированной методологической системы. Создание подобной системы позволило бы не только устранить существующие неопределенности в подходах к идентификации параметров движения колесной машины как объекта управления, но и выработать единые критерии для объективной оценки ее динамических свойств и характеристик устойчивости.

В инженерной практике для количественной и качественной оценки управляемости обычно прибегают к анализу реакций объекта на тестовые воздействия. С этой целью на вход системы (органы управления) подаются нормированные сигналы – ступенчатое (имитация резкого поворота руля), импульсное или гармоническое воздействие, после чего регистрируются динамические или статические параметры движения. Принципиально важным обстоятельством является то, что в подобных экспериментах водитель исключается из контура управления. Система работает в разомкнутом режиме: после приложения заданного возмущения к рулевому управлению дальнейшее поведение объекта полностью определяется его собственными динамическими характеристиками, инерционными параметрами и воздействием внешней среды. Иными словами, автомобиль совершает неуправляемое движение, траектория которого является следствием исключительно его внутренних свойств как физического тела, а не результатом корректирующих действий человека.

В ходе проведения таких испытаний ключевым регистрируемым параметром часто выступает боковое ускорение. Этот параметр, рассматриваемый в совокупности с курсовым углом и угловой скоростью, служит основой для последующих выводов о динамических свойствах шасси и управляемости. Однако для перехода от замера ускорений к анализу траекторной устойчивости (т.е. к положению объекта в пространстве) возникает необходимость двукратного интегрирования сигнала бокового ускорения. Именно на этом этапе проявляется серьезная методологическая проблема. Каждая операция интегрирования привносит в решение неопределенные константы (начальные условия). В результате при интегрировании по времени даже незначительные погрешности измерений или ненулевые начальные условия приводят к тому, что расчетное положение объекта (координата) стремится к бесконечности или дрейфует во времени. С точки зрения теории автоматического регулирования, это поведение является прямым признаком того, что «изолированное» движение объекта (без обратной связи) по траектории неустойчиво.

Развивая этот тезис, можно прийти к выводу, что неуправляемый колесный объект (автомобиль с зафиксированным рулевым управлением после подачи импульса) ведет себя как астатическое звено второго порядка. Такая система обладает интегрирующими свойствами: будучи выведенной из равновесия, она не стремится вернуться к исходной траектории или занять новое стабильное положение, а продолжает накапливать отклонение. Свойство управляемости в полном смысле этого слова (по Калману) такой объект обретает лишь тогда, когда замыкается контур управления. Роль замыкающего звена выполняет водитель (или автоматический регулятор), который в реальном времени наблюдает за выходными координатами (положением машины на дороге, скоростью, ускорениями) и, сопоставляя их с желаемой траекторией, формирует корректирующие воздействия на руль.

При отсутствии водителя система теряет способность к наблюдению за собственными выходными сигналами, определяющими ее состояние. В терминах теории систем это означает, что система становится ненаблюдаемой. Потеря наблюдаемости влечет за собой и потерю управляемости в глобальном смысле: невозможно сформировать такую функцию управления (закон поворота руля), которая гарантированно перевела бы объект из любого начального положения в любое конечное состояние, поскольку текущее состояние системы неизвестно или не определено. Следует подчеркнуть, что классическое определение *управляемости*, данное Калманом еще в 1961 г. [3], неразрывно связано с понятием *наблюдаемости*. Эта фундаментальная диада остается универсальным инструментом при анализе движения объектов любой природы – от летательных аппаратов до колесных машин, что подчеркивает необходимость рассмотрения системы «водитель – автомобиль – среда» как единого целого.

Таким образом, для определения параметров управляемости необходимо учитывать не только реакцию транспортного средства на управляющее воздействие, но и оценку точности позиционирования его в пространстве, осуществляемую водителем или системой слежения беспилотного транспортного средства, а также его реакцию на корректирующее воздействие. Несмотря на то, что в общем виде данная концепция оценки управляемости наземных транспортных средств разрабатывалась в работах Н.Т. Катанаева [4], С.А. Осташевского [5] и многих других [6], в теории управления движением транспортных средств данный подход не получил широкого распространения. В общем виде различие в подходах к оценке управляемости автомобилей проиллюстрировано на рис. 1-3.

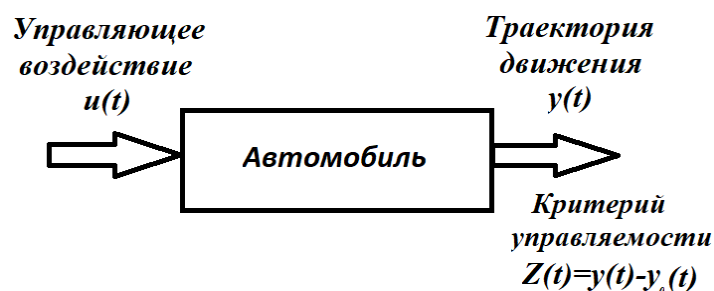


Рис. 1. Алгоритм оценки управляемости автомобиля без обратной связи, примененный при испытаниях на соответствие Глобальным техническим правилам № 8 («движение по усеченной синусоиде»)

Fig. 1. Algorithm for evaluating vehicle handling without feedback, applied during tests for compliance with UN Global technical regulation No. 8 (Sine with Dwell manoeuvre)

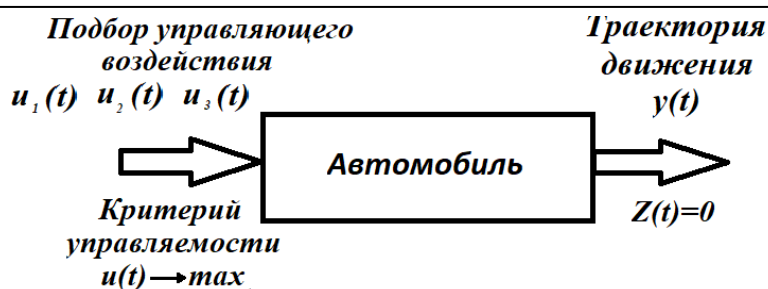


Рис. 2. Алгоритм оценки управляемости автомобиля без обратной связи, примененный при испытаниях на соответствие ГОСТ 31507-2012 «Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытаний» («переставка»)

Fig. 2. Algorithm for evaluating vehicle handling without feedback, applied during tests for compliance with GOST 31507-2012. Road vehicles. Handling and stability. Technical requirements. Test methods (lane change manoeuvre)

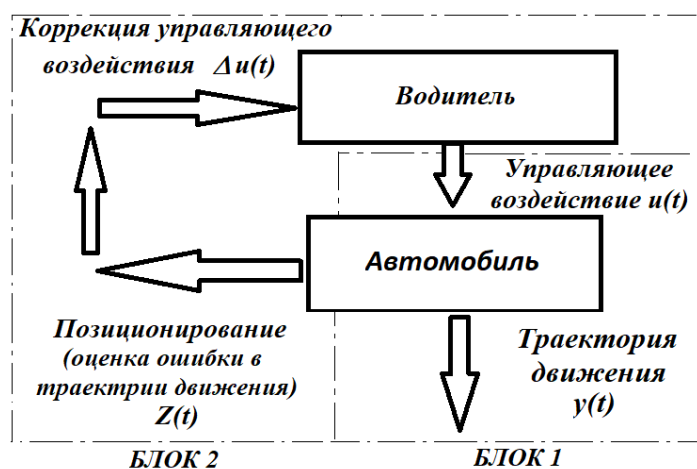


Рис. 3. Предлагаемый алгоритм оценки управляемости автомобиля с обратной связью, где БЛОК 1 представляет собой существующий комплекс мероприятий по оценке управляемости транспортных средств, а БЛОК 2 – дополнительный комплекс мероприятий

Fig. 3. Proposed algorithm for evaluating vehicle handling with feedback, where Block 1 represents the existing set of vehicle handling evaluation measures, and Block 2 represents an additional set of measures

Для анализа качества работы управления необходимо иметь математическое описание исследуемого процесса, а именно – изменение во времени координат системы, под которыми понимаются все переменные величины, характеризующие состояние системы в процессе ее функционирования. Параметры изменения координат (в том числе, скорости и ускорения их изменения) принято называть динамикой системы. Поскольку любая система управления состоит из множества взаимосвязанных функциональных элементов, работающих совместно, для получения математического описания всей системы вначале требуется составить математические описания каждого из этих элементов в отдельности. В свою очередь, математическое описание отдельного элемента устанавливает динамическую связь между его текущими значениями: входной величиной $x(t)$ и выходной величиной $y(t)$ в каждый рассматриваемый момент времени.

Описывая желаемую траекторию движения в виде зависимости $y_0(t)$, а реализуемую – как $y(t)$, которая является следствием управляющего воздействия $u(t)$, где время t принадлежит интервалу $0 < t \leq \infty$:

$$y(t) \equiv f(Z(t), u(t))$$

Если время протекания рассматриваемого процесса будет стремиться к бесконечности, то координаты, характеризующие состояние системы управления, примут некоторые постоянные значения. При этом как скорости их изменения, так и ускорения будут стремиться к 0. Такой процесс носит название статического, который характеризуется следующими установившимися показателями как: $x(\infty)=x_0=\text{const}$; $y(\infty)=y_0=\text{const}$. Для движения по заданной траектории необходимо сформировать управляющие воздействия u как сумму программного и позиционного управления $u = u^{\text{П}}(t) + \Delta u(Z(t))$, где $Z(t)$ оценка отклонений $Z(t) = y(t) - y_0$, полученная с помощью алгоритма оценивания, позволяющего обработать информацию $z(t) = Z(t) - Z^{\text{П}}$, записанную в линеаризованном виде: $z(t) = Hx + \xi(t)$, где матрица $H(t)$ определяется из известной программной траектории движения $y^{\text{П}}(t)$. При этом линеаризация уравнения обычно трактуется как замена фактической траектории движения на производную в точке установившегося режима $\Delta y(t) = k \Delta x(t)$.

Для текущих координат будет справедлива следующая запись уравнения движения:

$$\begin{aligned} y(t) &= y_0 + \Delta y(t); \\ x(t) &= x_0 + \Delta x(t); \end{aligned}$$

где Δy , Δx , – отклонения координат y , x , от своих установившихся значений.

Тогда уравнения динамики системы в общем виде могут быть записаны как:

$$F(\ddot{y}, \dot{y}, y) = G(\dot{x}, x, u)$$

Для статических условий:

$$F(y_0) = G(x_0, u_0)$$

Для выполнения линеаризации, уравнение управления системы для статических условий раскладывают в ряд Тейлора по степеням отклонений элементов от их установившихся значений:

$$F(y_0) + \left(\frac{\partial F}{\partial \ddot{y}} \right)_0 \Delta \ddot{y} + \left(\frac{\partial F}{\partial \dot{y}} \right)_0 \Delta \dot{y} + \left(\frac{\partial F}{\partial y} \right)_0 \Delta y = G(x_0, u_0) + \left(\frac{\partial G}{\partial \dot{x}} \right)_0 \Delta \dot{x} + \left(\frac{\partial G}{\partial x} \right)_0 \Delta x + \left(\frac{\partial G}{\partial u} \right)_0 \Delta u + \dots$$

После, вычитая из последнего уравнения уравнение статики, без учета последующих членов разложения, имеющие малые действительные значения, получим линеаризованное дифференциальное уравнение динамики системы управления:

$$\left(\frac{\partial F}{\partial \ddot{y}} \right)_0 \Delta \ddot{y} + \left(\frac{\partial F}{\partial \dot{y}} \right)_0 \Delta \dot{y} + \left(\frac{\partial F}{\partial y} \right)_0 \Delta y = \left(\frac{\partial G}{\partial \dot{x}} \right)_0 \Delta \dot{x} + \left(\frac{\partial G}{\partial x} \right)_0 \Delta x + \left(\frac{\partial G}{\partial u} \right)_0 \Delta u$$

Необходимо отметить, что при помощи данного метода могут быть линеаризованы такие системы, производные всех элементов, которых в рассматриваемом диапазоне непрерывны и однозначны.

Применив к полученному дифференциальному уравнению преобразование Лапласа, получим:

$$D(s)Y(s) = N(s) X(s) + M(s) U(s)$$

где s – собственно оператор Лапласа; $Y(s)$, $X(s)$, $U(s)$ – изображения по Лапласу выходной и входной величин элемента и внешнего воздействия; n , m , k показатели степени полиномов от оператора Лапласа s :

$$D(s) = \sum_{i=0}^n a_i s^{n-i}; \quad N(s) = \sum_{i=0}^m b_i s^{m-i}; \quad U(s) = \sum_{i=0}^k c_i s^{k-i};$$

После ввода следующих обозначений:

$$W_x(s) = \frac{N(s)}{D(s)} \quad u \quad W_u(s) = \frac{M(s)}{D(s)}$$

Тогда алгебраическое отношение функций времени по Лапласу можно записать в виде:

$$Y(s) = W_x(s) X(s) + W_u(s) U(s),$$

где отношения $W_x(s)$ и $W_u(s)$ представляют собой передаточные функции процесса управления (рис. 4).

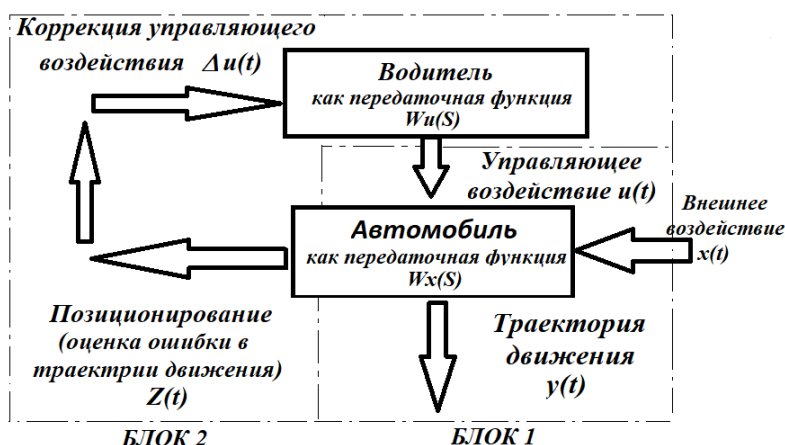


Рис. 4. Скорректированный алгоритм оценки управляемости автомобиля с обратной связью

Fig. 4. Adjusted algorithm for evaluating vehicle handling with feedback

В обобщенном виде все возможные типы внешних воздействий на систему управления автомобилем, для которых определяются параметры реакции транспортного средства, описываются с помощью набора элементарных математических функций. В классической теории автоматического управления в качестве таких функций, на которые может быть разложено произвольное возмущение, используются [7]:

- 1) *единичная импульсная функция* (обозначаемая как $\delta(t)$), которая описывает идеализированное воздействие бесконечно малой длительности и бесконечно большой амплитуды, но с конечным интегралом (площадью), равным единице.
- 2) *единичная ступенчатая функция* (обозначается как $1(t)$), характеризующую мгновенное переключение воздействия с нулевого уровня на постоянное единичное значение, остающееся неизменным при $t \geq 0$.
- 3) *гармоническая функция* (обозначается как $X_0 \cdot \sin(\omega t)$), которая представляет собой периодическое синусоидальное колебание с заданной амплитудой X_0 и угловой частотой ω .

В графическом виде данные функции представлены на рис. 5.

Функциональная связь между выходным и входным сигналом определяется при помощи частотной передаточной функции $W(j\omega)$, которая представляет собой отношение выходного и входного сигналов при разных частотах управляющего воздействия:

$$W(j, \omega) = \frac{X(j, \omega)}{Y(j, \omega)}$$

или, вводя в данную зависимость оператор Лапласа s , с учетом того, что $s=j\omega$:

$$W(j, \omega) = W(s) \Big|_{s=j\omega}$$

Согласно [7], частотная передаточная функция может быть представлена в виде:

$$W(j, \omega) = A(\omega)e^{j\psi(\omega)} = U(\omega) + jV(\omega),$$

где $A(\omega)$ – передаточное отношение между входным и выходным сигналом на разных частотах управления $A(\omega) = X_0(\omega)/Y_0(\omega)$ (для одной частоты, рис. 5в); $\psi(\omega)$ – фазовый сдвиг входного и выходного сигнала на частоте ω (для одной частоты, рис. 5в); $U(\omega)$ и $V(\omega)$ вещественная и мнимая составляющие передаточной функции, для которых справедливы следующие соотношения:

$$A(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)} \quad \text{и} \quad \psi(\omega) = \arctg \frac{V(\omega)}{U(\omega)}$$

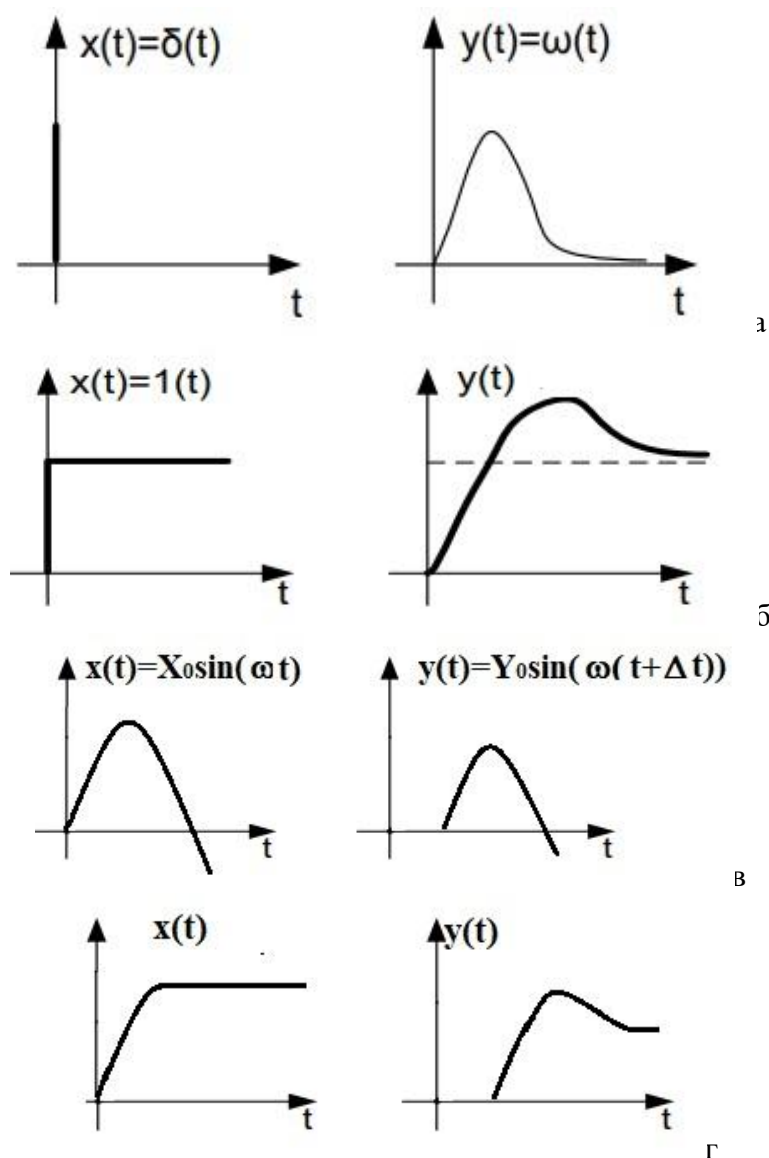


Рис. 5. Примеры взаимосвязи входных и выходных сигналов:

а – для единичной импульсной функции; б – для единичной ступенчатой функции; в – для гармонической функции; г – для комбинации гармонической и ступенчатой функций

Fig. 5. Examples of the relationship between input and output signals:

а – for a unit impulse function; б – for a unit step function; в – for a harmonic function; г – for a combination of harmonic and step functions

Приведенные зависимости являются характеристиками систем управления транспортных средств. Кроме обобщенных зависимостей, приведенных выше, также различают амплитудно-частотную характеристику, которая показывает, как изменяется амплитуда выходного сигнала при изменении частоты управляющих воздействий и фазовую частотную характеристику, которая показывает, как изменяются фазовые между входным и выходным сигналом при различных частотах управляющего воздействия.

Для упрощенного случая управления передним колесом велосипеда (без учета сил инерции и деформации шины), при выполнении условия $y(t)=x(t)$ значения передаточной функции $W(s)$ будет равняться 1; а амплитудно-фазово-частотные функции примут вид: $W(j;\omega)=1$; $A(\omega)=1$; $\psi(\omega)=0$. При наличии передаточного числа в рулевом механизме приведенные зависимости примут вид: $y(t)=kx(t)$ значения передаточной функции $W(s)$ будет равняться k ; а амплитудно-фазово-частотные функции примут вид: $W(j;\omega)=k$; $A(\omega)=k$; $\psi(\omega)=0$. При наличии в цепи управления инерционности первого порядка, когда связь

между входным и выходным сигналами описывается зависимостью: $(T+1)y(t)=kx(t)$, где T – параметр, характеризующий инерционность системы, называемый еще длительностью переходного процесса, значения амплитудно-фазово-частотных функций примут вид: $W(j;\omega)=1/(T\omega+1)$; $A(\omega)=1/(T^2\omega^2+1)^{1/2}$; $\psi(\omega)=-\arctg T\omega$.

В рассматриваемой системе время реакции водителя и время запаздывания системы автоматического управления может быть учтено при помощи следующих функциональных зависимостей:

$$y(t)=x(t-\tau); W(j;\omega)=e^{-j\omega\tau}; A(\omega)=1; \psi(\omega)=-\omega\tau$$

Координаты $x_i(t)$ описывают первый (нижний) уровень управления, координаты $y^{\Pi}(t)$ – второй уровень управления. Таким образом, рассматриваемая замкнутая управляемая динамическая система имеет двухуровневое управление, при этом нижний уровень решает задачу стабилизации уравнений в отклонениях от программного движения. Данный подход к оценке управляемости транспортных средств подразумевает наличие двух критериев. Во-первых, управляемость оценивается по степени отклонения траектории движения при заданном управляющем воздействии (программном управлении), во-вторых, управляемость оценивается по степени изменения управляющего воздействия, необходимого для движения по заданной траектории (или позиционному управлению). Данный подход к оценке управляемости рассматривается в классической теории управления. Отсутствие такого подхода в теории движения наземных транспортных средств приводит к созданию аварийно-опасных конструкций, не учитывающих поведенческие особенности водителя, в частности возможность наличия в его действиях ошибок позиционирования и управления.

Таким образом, с учетом наличия отклонений при выполнении маневров, обусловленных как психологическими, так и техническими причинами, уравнение управляемого движения примет вид: $y(t) = f(Z(t), u(t), \Delta u(t))$, где $Z(t)$ – ошибка в позиционировании автомобиля, связанная с техническими особенностями автомобиля и психологическом состоянии водителя (или функционировании системы обратной связи беспилотного автомобиля), а $\Delta u(t)$ – корректирующее воздействие со стороны оператора (или системы управления беспилотного автомобиля).

На основании изложенного следует, что одним из основных параметров, от которого зависит качество работы системы управления, является точность позиционирования автомобиля на дороге. Данный параметр является определяющим для выбора конструкции рулевого управления. Отсутствие учета данной величины определял только нижнюю границу значения передаточного отношения рулевого механизма, которая, согласно [8], должна быть не меньше $20/L$, (где L – длина колесной базы автомобиля). При этом научно обоснованная верхняя граница данной величины до сих пор не установлена.

Результаты

Для решения поставленной задачи рассмотрим объезд внезапно возникшего препятствия с точки зрения теории управления. Оценить существующий и предлагаемый подход к оценке управляемости транспортных средств можно с использованием параметров выполнения упражнения «переставка», для обычных автомобилей описанное в работе [9], а для беспилотных – в работе [10]. Управляющее воздействие для данного маневра можно записать в виде гармонической функции вида $u(t) = X_0 \sin(\omega t)$. В графическом виде изменение управляющего воздействия при объезде препятствия, а также изменение траектории движения приведены на рис. 6-8.

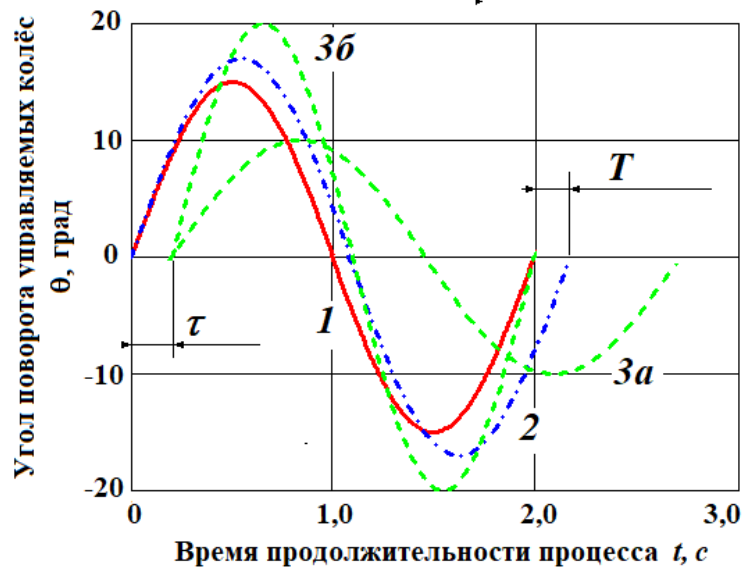


Рис. 6. Изменение угла поворота управляемых колес автомобиля при выполнении маневра «переставка»:

1 – без корректирующего воздействия со стороны оператора ($u(t)$); 2 – с корректирующим воздействием со стороны оператора ($u(t) + \Delta u(t)$) для коррекции длительности переходного процесса T ; 3а – с корректирующим воздействием со стороны оператора ($u(t) + \Delta u(t)$) для коррекции времени реакции водителя или системы τ за счет увеличения времени управляющего воздействия; 3б – с корректирующим воздействием со стороны оператора ($u(t) + \Delta u(t)$) для коррекции времени реакции водителя или оператора τ за счет увеличения времени управляющего воздействия значения передаточной функции k

Fig. 6. Change in the wheels steer angle during the lane change manoeuvre:

1 – without corrective action from the driver ($u(t)$); 2 – with corrective action from the driver ($u(t) + \Delta u(t)$) to correct the transient process duration T ; 3a – with corrective action from the driver ($u(t) + \Delta u(t)$) to correct the driver or system response time τ by increasing the control action duration; 3b – with corrective action from the driver ($u(t) + \Delta u(t)$) to correct the driver or system response time τ by increasing the control action duration and the transfer function coefficient k

Требования к точности позиционирования беспилотных транспортных средств $Z(t)$ описаны в работе [10], согласно которой погрешность отклонения восстановленной траектории от истинной не должна превышать 2 % от пройденного расстояния. При этом погрешность определения координат в горизонтальной плоскости не должно превышать 0,1 м, погрешность определения горизонтальной составляющей скорости, движения не должно быть больше 0,02 м/с; погрешность определения горизонтальной составляющей ускорения не должно быть больше 0,1 м/с, а погрешность определения угловой ориентации – 0,5 град. В предварительном национальном стандарте [11] рекомендуется применение еще более точных параметров позиционирования – погрешность определения координат в горизонтальной плоскости – не менее 0,05 м, а угловое отклонение – не более 0,1 град. Задача обнаружения границ дороги является нетривиальной, так как из-за движения автомобиля расстояние от транспортного средства до границы обочины постоянно изменяется.

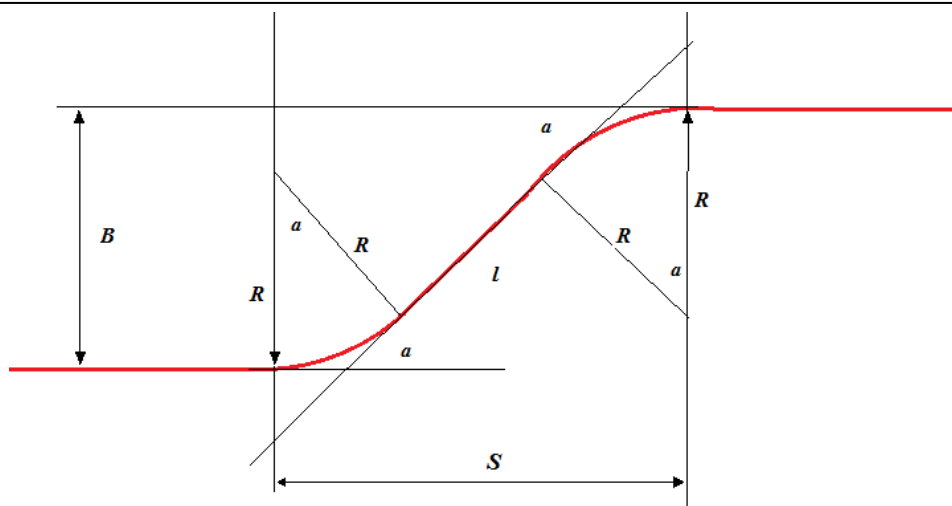


Рис. 7. Идеализированная траектория движения автомобиля при выполнении маневра «переставка»:

S – длина участка, на котором автомобиль должен перестроиться; B – величина бокового смещения транспортного средства при перестроении в м; R – радиус кривизны траектории при движении с поворотом управляемых колес в м; α – максимальный угол отклонения автомобиля от прямолинейного движения при движении с поворотом управляемых колес, в рад; l – длина участка траектории по которому автомобиль движется без поворота управляемых колес (длительность переходного процесса [10])

Fig. 7. Idealized trajectory of the vehicle during the lane change manoeuvre

S – distance over which the vehicle must change lanes; B – lateral displacement of the vehicle during the lane change, in m; R – radius of curvature of the trajectory when moving with steered wheels turned, in m; α – maximum angular deviation of the vehicle from straight-line motion when moving with steered wheels turned, in rad; l – length of the trajectory segment along which the vehicle moves without steering the wheels (transient process duration [10])

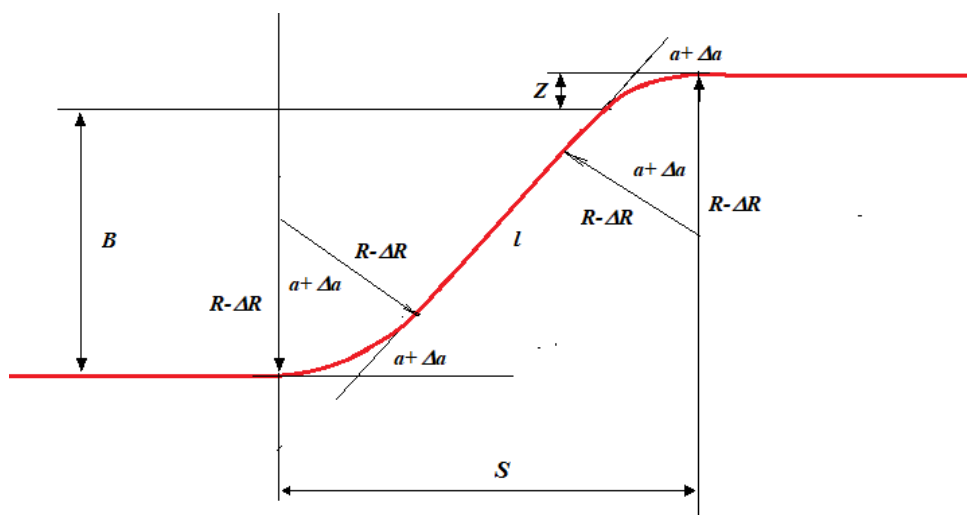


Рис. 8. Изменение траектории движения автомобиля при выполнении маневра «переставка» под действием корректирующих действий водителя:

Z – отклонение, связанное с неточностью позиционирования;
 $\Delta\alpha$ – отклонение угла траектории; ΔR – суммарное изменение радиуса кривизны траектории

Fig. 8. Change in the vehicle trajectory during the lane change manoeuvre under the driver's corrective actions:

Z – deviation related to positioning inaccuracy;
 $\Delta\alpha$ – trajectory angle deviation; ΔR – total change in the radius of curvature of the trajectory

Геометрические соотношения, объясняющие работу алгоритмов системы управления беспилотного автомобиля, представлены на рис. 9.

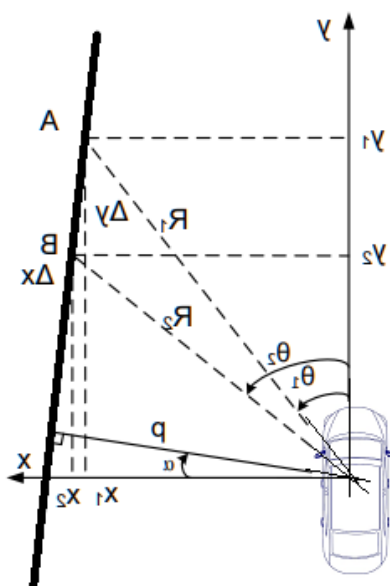


Рис. 9. Принципиальная схема к алгоритму позиционирования автомобиля на проезжей части
Fig. 9. Schematic diagram of the vehicle positioning algorithm on the roadway

При решении задачи позиционирования автомобиля на дороге измерительный луч, ширина которого стремится к 0, последовательно занимает положение, характеризуемое углами $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n$. Каждое положение луча характеризуется временем запаздывания сигнала, отраженного от границы обочины. Линия границы обочины или полосы движения аппроксимируется прямой линией, которая характеризуется уравнением: $x \cos \alpha + y \sin \alpha - p = 0$, где p – искомое расстояние до обочины, равное: $R_1 \sin(\theta_1 - \alpha)$ или $R_2 \sin(\theta_1 - \alpha)$ или $R \sin(\theta) \approx R\theta$. Относительная ошибка такого исчисления может быть получена при решении уравнения: $\Delta p/p = \Delta R/R + \Delta \theta/\theta$, где $\Delta R/R$ – относительная погрешность измерения расстояния до границы полосы движения, а $\Delta \theta/\theta$ – относительная погрешность измерения угловых величин. Сравнивая погрешности измерения данных величин [12], можно сделать вывод, что определяющим показателем в рассматриваемом соотношении является погрешность в измерении углов, которая может достигать 22 %, в то время как погрешность измерения длины не превышает 6 %, т.е. $\Delta p/p \approx \Delta \theta/\theta$, что для полосы движения шириной 3-5 м дает погрешность позиционирования, равную 0,6-1,0 м.

Требования к водителям по точности позиционирования автомобиля на дороге установлены в Приложении № 8 Административного регламента Министерства внутренних дел Российской Федерации (утвержден приказом МВД России от 20.02.2021 № 80). Этот документ направлен на регулирование предоставления государственной услуги по приему экзаменов на право управления транспортными средствами и выдаче водительских удостоверений. Согласно этому документу, к числу ошибок, при которых водитель не допускается к управлению, относятся, в частности, неточная остановка относительно линии «стоп». Ошибка выражается в заезде за указанную линию или, напротив, в остановке на расстоянии более 1 м до нее – причем как при движении передним ходом, так и при движении задним ходом. Кроме того, к аналогичным нарушениям отнесено пересечение границы условного коридора движения, ширина которого определяется исходя из габаритной ширины транспортного средства плюс боковой интервал, равный 1 м. Фактически можно считать, что водитель должен обеспечивать позиционирование своего автомобиля с погрешностью не более одного метра относительно заданных ориентиров. Кроме того, при выполнении маневра «маневрирование» водитель должен проходить коридор с изменением направления движения, ширина

которого должна составлять две длины автомобиля + 1 м. С учетом того, что в данный коридор должен вписаться автомобиль некоторой ширины, максимальное боковое смещения автомобиля не должно превышать общую ширину коридора за исключением его ширины. Для автомобиля длиной 5 м и шириной 1,5 м, данная величина составит 8,5 м. При этом длина выполнения маневра должна равняться 5 м. Угол поворота автомобиля при данном маневре должен составлять $\alpha = \arctg B/S$ [13]. Как уже было сказано выше, длина выполнения маневра S будет равняться 5 м, а величина смещения в поперечном направлении от 5 м для движения по идеальной траектории до 8,5 м при движении с максимальным отклонением. Тогда угол отклонения от прямолинейной траектории составит $\arctg 5/5$ или 0,785 рад для оптимального выполнения маневра до $\arctg(8,5/5)$ или 1,03 рад для предельно допустимой траектории. То есть угловая точность позиционирования автомобиля на дороге не должна превышать 0,254 рад или 15° , что соответствует требованиям, предъявляемым к беспилотным транспортным средствам. При этом фактическая точность позиционирования как у беспилотных автомобилей [13], так и у водителей как минимум в два раза выше установленных предельно-допустимых значений.

Следует отметить, что полученные данные справедливы для статического позиционирования. При позиционировании в динамическом режиме автомобиль за время реакции системы успевает отклониться на некоторое расстояние, которое в теории движения автомобиля определяется как [14]:

$$Z(t) = 1,4LV/1000 \text{ или } Z(t) = Z_{CT}(t \rightarrow \infty) + (V - 40)/100$$

При движении по криволинейной траектории точность позиционирования на дороге определяется как:

$$Z_k(t) = (1,4L + 5)V/1000 = Z(t) + V/200$$

Тогда точность углового позиционирования будет определяться как:

$$\Delta\theta(t) = \arctg \frac{V}{200L} \approx \frac{V}{200L},$$

где L – длина колесной базы автомобиля, а 100 и 200 – переводные коэффициенты, имеющие размерность м*ч/км.

Ошибки позиционирования приводят к уменьшению ширины коридора движения, в результате чего в приведенных зависимостях значение B , должно быть заменено на величину $B_0 - Z(t) = B_0 - Z_{CT} - L \sin \theta - (V - 40)/100 - V/200$.

При рассмотрении комплексной системы оценки управления автомобилем необходимо определить, какие именно корректирующие воздействия $\Delta u(t)$ на отклонения в движении автомобиля применяются на практике. Изменение угла поворота автомобиля можно наглядно представить, как разницу между оптимальным углом наклона траектории в центре участка дороги перед выполнением маневра «переставка». Полученная зависимость может быть получена при решении следующего уравнения:

$$V = \sqrt{aR} = \sqrt{a \frac{S - l \cos \alpha}{2 \sin \alpha}}$$

$$\Delta V = \frac{V}{V_{опт}} \sqrt{\frac{R}{R_{MAX}}} = \sqrt{\frac{\sin \alpha_{опт}}{\sin \alpha} \frac{S - l \cos \alpha}{S - l \cos \alpha_{опт}}}$$

где:

$$\alpha = x \pm \arccos\left(\frac{1}{\Psi}\right) = \arccos \frac{\left(1 - \frac{B_0 - Z_{CT} - L \sin \theta - (3V - 80)/200}{2R}\right)}{\Psi} \pm \arccos\left(\frac{1}{\Psi}\right) = \arcsin \frac{S}{2R\Psi} \pm \arccos\left(\frac{1}{\Psi}\right);$$

где

$$\Psi = \sqrt{\left(\frac{S}{2R}\right)^2 + \left(1 - \frac{B_0 - Z_{CT} - L \sin \theta - (3V - 80)/200}{2R}\right)^2}$$

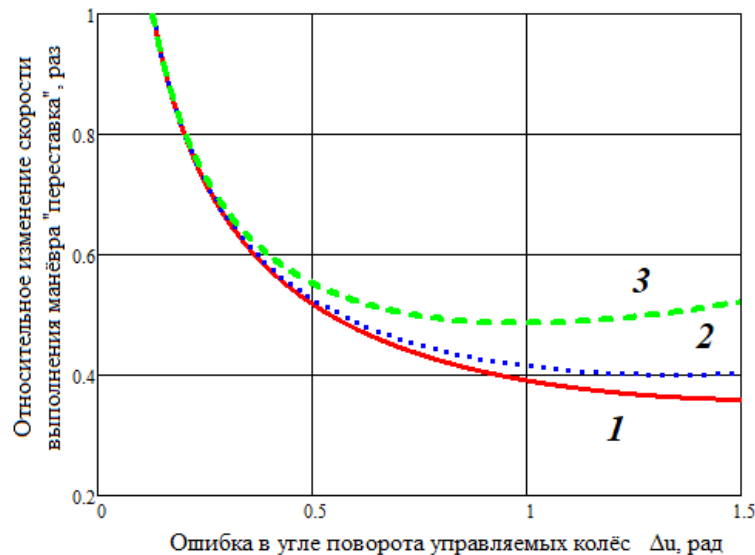


Рис. 10. Взаимосвязь между уменьшением скорости выполнения маневра «переставка» и ошибкой водителя в угле поворота управляемых колес для случая, когда длительность переходного процесса равна:
 1 – 0 с; 2 – 0,2 с; 3 – 0,5 с

Fig. 10. Relationship between the reduction in the speed of the lane change manoeuvre and the driver's error in the wheels steer angle for the case where the transient process duration is:
 1 – 0 s; 2 – 0.2 s; 3 – 0.5 s

С учетом того, что ошибка в угле поворота управляемых колес (как это было описано выше) состоит из статической (0,1-0,254 рад) и динамической ($V/200L$) составляющей, изменение относительной скорости прохождения поворота будет меняться в диапазоне от 0,1 до 0,35 рад, что свидетельствует о стационарности влияния ошибки в угле поворота управляемых колес на динамику выполнения маневра «переставка» и практически полном отсутствии влияния длительности переходного процесса на данный параметр. Для дальнейших расчетов можно принять, что учет точности позиционирования автомобиля на дороге снижает скорость выполнения маневра «переставка» от 0 до 30 %.

На скорость выполнения маневра гораздо большее влияние оказывает время реакции водителя или системы управления беспилотным автомобилем на отклонение от заданной траектории τ . В [14] длительность данного процесса, описанная как «выбор водителем скорости движения по условиям видимости элементов дороги в направлении движения» рекомендуют выбирать равной 0,3 с. По данным, приведенным в работе [15], при скорости выполнения маневра «переставка» со скоростью 70 км/ч безопасное время задержки сигнала составляет 0,3 с, 40 км/ч – 0,7 с, а 10 км/ч – 0,9 с. На момент написания работы беспилотный автомобиль выполнял маневр «переставка» со скоростью 11 км/ч (что соответствует времени задержки сигнала 0,9 с). В настоящее время скорость выполнения данного маневра увеличилась до 40 км/ч (время задержки сигнала 0,7 с). С другой стороны, исследование изменения времени реакции водителя в реальных условиях эксплуатации [16] показывают, что время реакции водителей от возраста может изменяться в три раза, также время реакции может меняться от условий освещенности. В конце смены работы водителя, за счет накопления усталости время реакции водителя может изменяться на 15-20 % [17]. Поэтому временной диапазон запаздывания реакции на управляющее воздействие в диапазоне от 0,3 до 0,7 с применяемый для определения параметров управляемости является обоснованным.

Для выполнения маневра «переставка», как было отмечено выше, автомобиль должен вписаться в коридор, имеющий ширину, равную B , которая с учетом времени реакции системы примет вид:

$$B_0 - Z(t) = B_0 - Z_{CT} - L \sin \theta - (0,015V + 0,4) - 2\tau V (\cos(\alpha_{опт} + \Delta u) - \cos \alpha_{опт})$$

Коэффициент 2 показывает, что при выполнении маневра «переставка» водитель должен оценивать угловое положение автомобиля дважды: после поворота автомобиля направо и после его возвращения к движению в первоначальном направлении.

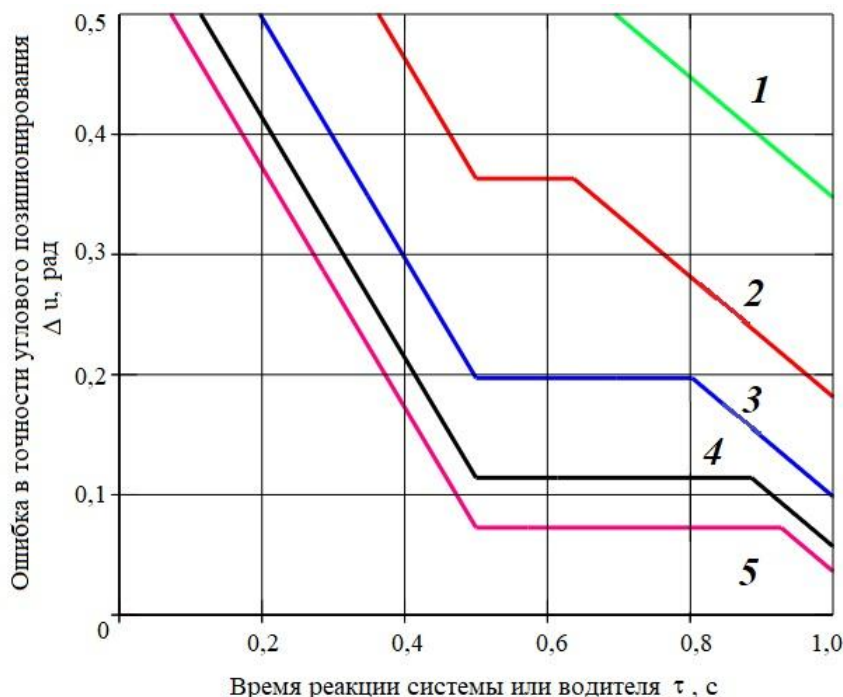


Рис. 11. Допускаемые соотношения между временем реакции системы τ на ошибку позиционирования Δu , для обеспечения выполнения маневра «переставка» со скоростью:
 1 – 10 км/ч; 2 – 20 км/ч; 3 – 40 км/ч; 4 – 80 км/ч; 5 – 160 км/ч

Fig. 11. Permissible relationships between the system response time τ to the positioning error Δu to ensure execution of the lane change manoeuvre at a speed:
 1 – 10 km/h; 2 – 20 km/h; 3 – 40 km/h; 4 – 80 km/h; 5 – 160 km/h

Для определения рационального передаточного отношения рулевого механизма заменим величину $\alpha_{\text{опт}}$ на $K\alpha$. тогда зависимость скорости выполнения маневра «переставка» от данного параметра примет вид, показанный на рис. 12.

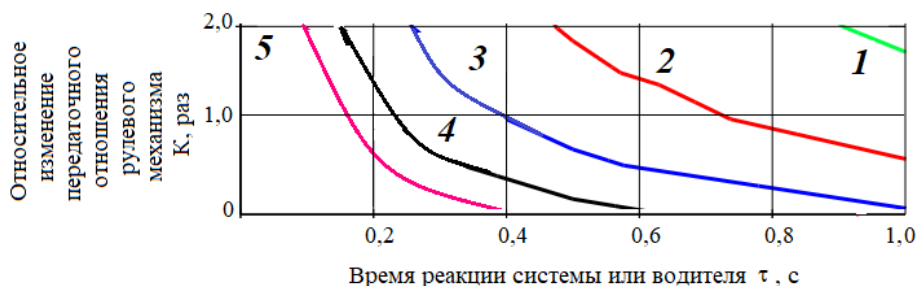


Рис. 12. Допускаемые соотношения между временем реакции системы τ на ошибку позиционирования Δu , равную 0,3 рад, и коэффициентом изменения передаточного отношения рулевого механизма K , для обеспечения выполнения маневра «переставка» со скоростью:
 1 – 10 км/ч; 2 – 20 км/ч; 3 – 40 км/ч; 4 – 80 км/ч; 5 – 160 км/ч

Fig. 12. Permissible relationships between the system response time τ to the positioning error $\Delta u = 0.3$ rad and the coefficient of variation of the steering ratio K to ensure execution of the lane change manoeuvre at a speed:
 1 – 10 km/h; 2 – 20 km/h; 3 – 40 km/h; 4 – 80 km/h; 5 – 160 km/h

Полученные данные однозначно свидетельствуют о том, что существуют условия при которых исследуемый автомобиль технически не сможет выполнить маневр «переставка», так как для его выполнения угол $\alpha_{\text{отт}}$, как и коэффициент изменения передаточного отношения рулевого механизма K , должны иметь значения, отличные от 0. Таким образом, при времени реакции системы большей, чем 0,6 с (при точности позиционирования 0,3 рад), прохождение рассматриваемого маневра со скоростью большей, чем 80 км/ч, является невозможным событием. Прохождение исследуемого маневра со скоростью 40 км/ч является возможным при времени реакции системы меньшей, чем 1,0 с.

Выводы и обсуждение

Полученные данные явно свидетельствуют о том, что определяющим показателем в управлении автомобилем являются ошибки водителя. Однозначно также, что чем более опытный водитель выполняет маневр «переставка», т.е. чем выше точность позиционирования транспортного средства на дороге и меньше время реакции на изменение состояния системы, тем более безопасным становится автомобиль. Поскольку в современных условиях требования к скорости выполнения маневра «переставка» отсутствуют, и допуск транспортных средств в эксплуатацию на данном параметре не основывается, постольку повышения поворачиваемости автомобиля до значений, при которых опытные водители могут выполнить маневр «переставка», не требуется. Соответственно, имеется возможность выпускать автомобили с меньшей скоростью поворота. Это может компенсировать ошибки неопытных водителей при выполнении контраварийного маневра. Работ по определению количественных показателей управляемости, обеспечивающих минимальную аварийность автомобиля в эксплуатации, практически не проводилось.

Библиографический список

1. Российский статистический ежегодник. 2025: Стат. сб. / Росстат. – М., 2025. – 621 с.
2. **Ширяев, В.И.** К задаче оценивания ошибок измерений в системах управления при неполной информации / В.И. Ширяев, Д.В. Хаданович // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2018. – Т. 18, № 4. – С. 25-40.
3. **Раецкая, Е.В.** Полная условная управляемость и полная наблюдаемость линейных систем: специальность 01.01.02 «Дифференциальные уравнения, динамические системы и оптимальное управление»: диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Раецкая Елена Владимировна. – Воронеж, 2004. – 149 с.
4. **Катанаев, Н.Т.** Системные и несистемные оценки управляемости автомобиля / Н.Т. Катанаев, А.В. Лепешкин // Известия МГТУ МАМИ. – 2015. – Т. 1, № 1(23). – С. 112-116.
5. **Осташевский, С.А.** Определение понятий «управляемость автомобилей» и «вождение машины» в системе «водитель – автомобиль – дорога» // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2013. – № 61-62. – С. 300-305.
6. **Шадрин, С.С.** Методика расчетной оценки управляемости и устойчивости автомобиля на основе результатов полигонных испытаний. дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук по специальности 05.05.03. – М.: МАДИ 2009. 132с.
7. Теория автоматического управления: конспект лекций для студентов направления подготовки 151900 – Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств / сост. Н.Г. Рассказчиков; Владим. гос. ун-т., 2012. – 261с.
8. **Осташевский, С.А.** Исследование способности системы «автомобиль – водитель – дорога» к объезду неожиданного препятствия // Научные труды Винницкого национального технического университета. – 2014. – № 2. – С. 7.
9. **Молев, Ю.И.** Аналитическое сравнение показателей управляемости автомобилей при выполнении маневров «Переставка» и «Движение по усеченной траектории» / Ю.И. Молев, М.Г. Череватов, С.В. Лазаревич, А.В. Ерофеева // Воронежский научно-технический Вестник. – 2025. – Т. 1, № 1(51). – С. 114-124.

10. **Чикрин, Д.Е.** Разработка высокоточной спутниковой локально-инерциальной системы навигации для беспилотного управления транспортными средствами / Д.Е. Чикрин, П.А. Савинков, П.А. Кокунин, Р.И. Шагиев // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2020. – Т. 63, № 12. – С. 1094-1102.
11. ПНСТ 825-2023 Интеллектуальные транспортные системы. Динамическая цифровая карта дорожного движения. Точность данных для формирования динамической цифровой карты дорожного движения для целей движения высокоавтоматизированных транспортных средств.
12. **Шнайдер, В.Б.** Радиолокационная система обеспечения безопасности движения наземных транспортных средств: специальность 05.12.14 «Радиолокация и радионавигация»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Москва, 2014. – 22 с.
13. Разработка автомобильной системы определения и удержания в полосе движения / Д.М. Порубов, Д.В. Зезюлин, Д.Ю. Тюгин [и др.] // Транспортные системы. – 2018. – № 2(8). – С. 25-29.
14. Судебная дорожно-транспортная экспертиза. Ю.Б. Суворов. Изд. «Экзамен». М., 2003.
15. **Ендачёв, Д.В.** Прогнозирование характеристик криволинейного движения беспилотного автомобиля дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук по специальности 05.05.03. – М.: НАМИ, 2016. 185 с.
16. **Евтюков, С.А.** Дорожно-транспортные происшествия: Расследование. Реконструкция. Экспертиза. / С.А. Евтюков, Я.В. Васильев – СПб: Изд-во ДНК, 2008. – 392 с.
17. **Юрецки Р.** Методы тестирования и время реакции водителей / Р. Юрецки, Т. Станчик // Eksploatacja i Niezawodnosc – Техническое обслуживание и надежность. – 2011. – № 3. – С. 84-91.
18. **Бахмутский, М.М.** Зависимость управляемости автопоезда от передаточного числа механизма поворота прицепа / М.М. Бахмутский, Л.Л. Гинцбург // Труды НАМИ. Выпуск № 129. Управляемость автомобилей и автопоездов. Рулевой привод. – М.: Изд-во НАМИ, 1971. – С. 36-42.

References

1. Rossiyskiy statistichyeskiy yezhegodnik. 2025: Stat. sb. [Russian Statistical Yearbook. 2025: Statistical Collection]. Moscow: Rosstat; 2025. 621 p. (in Russian).
2. Shiryaev V.I., Khadanovich D.V. K zadache otsenivaniya oshibok izmereniy v sistemakh upravleniya pri nepolnoy informatsii [On the problem of estimating measurement errors in control systems under incomplete information]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Komp'yuternyye tekhnologii, upravleniye, radioelektronika* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer Technologies, Control, Radio Electronics]. 2018;18(4):25-40. (in Russian).
3. Raetskaya E.V. Polnaya uslovnaya upravlyaemost' i polnaya nablyudaemost' lineynykh sistem [Complete conditional controllability and complete observability of linear systems]. PhD thesis. Voronezh; 2004. 149 p. (in Russian).
4. Katanaev N.T., Lepeshkin A.V. Sistemnye i nesistemnye otsenki upravlyaemosti avtomobilya [System and non-system assessments of vehicle controllability]. *Izvestiya MGTU MAMI* [Proceedings of MSTU MAMI]. 2015;1(1(23)):112-116. (in Russian).
5. Ostashevsky S.A. Opredelenie ponyatiy «upravlyaemost' avtomobiley» i «vozhdenie mashiny» v sisteme «voditel' – avtomobil' – doroga» [Definition of the concepts of «vehicle controllability» and «driving» in the «driver – vehicle – road» system]. *Vestnik Khar'kovskogo natsional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta* [Bulletin of the Kharkiv National Automobile and Highway University]. 2013;(61-62):300-305. (in Russian).
6. Shadrin S.S. Metodika raschetnoy otsenki upravlyaemosti i ustoychivosti avtomobilya na osnove rezul'tatov poligonnykh ispytaniy [Methodology for computational assessment of vehicle controllability and stability based on proving ground test results]. PhD thesis. Moscow: MADI; 2009. 132 p. (in Russian).
7. Rasskazchikov N.G., compiler. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: konspekt lektsiy dlya studentov napravleniya podgotovki 151900 – Konstruktorsko-tekhnologicheskoye obespecheniye mashinostroitel'nykh proizvodstv [Automatic Control Theory: lecture notes for students of the training direction 151900 – Design and Technological Support of Mechanical Engineering Productions]. Vladimir: Vladimir State University; 2012. 261 p. (in Russian).
8. Ostashevsky S.A. Issledovaniye sposobnosti sistemy «avtomobil' – voditel' – doroga» k ob"yezdu neozhidannogo prepyatstviya [Study of the ability of the «vehicle – driver – road» system to avoid an unexpected obstacle]. *Nauchnyye trudy Vinnitskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta* [Scientific Works of Vinnytsia National Technical University]. 2014;(2):7. (in Russian).

9. Molev Y.I., Cherevastov M.G., Lazarevich S.V., Erofeeva A.V. Analiticheskoye sravneniye pokazateley upravlyaemosti avtomobiley pri vypolnenii manevrov «Perestavka» i «Dvizheniye po usechennoy trayektorii» [Analytical comparison of vehicle controllability indicators when performing "Lane Change" and «Movement along a truncated trajectory» maneuvers]. *Voronezhskiy nauchno-tekhnicheskiy Vestnik* [Voronezh Scientific and Technical Bulletin]. 2025;1(51):114-124. (in Russian).
10. Chikrin D.E., Savinkov P.A., Kokunin P.A., Shagiev R.I. Razrabotka vysokotochnoy sputnikovoy lokal'no-inertsial'noy sistemy navigatsii dlya bespilotnogo upravleniya transportnymi sredstvami [Development of a high-precision satellite local-inertial navigation system for unmanned vehicle control]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroyeniye* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Instrument Engineering]. 2020;63(12):1094-1102. (in Russian).
11. PNST 825-2023 Intellekтуал'nyye transportnyye sistemy. Dinamicheskaya tsifrovaya karta dorozhnogo dvizheniya. Tochnost' dannykh dlya formirovaniya dinamicheskoy tsifrovoy karty dorozhnogo dvizheniya dlya tseley dvizheniya vysokoavtomatizirovannykh transportnykh sredstv [Intelligent Transport Systems. Dynamic digital road traffic map. Data accuracy for the formation of a dynamic digital road traffic map for the purpose of movement of highly automated vehicles]. (in Russian).
12. Shnaider V.B. Radiolokatsionnaya sistema obespecheniya bezopasnosti dvizheniya nazemnykh transportnykh sredstv [Radar system for ensuring traffic safety of ground vehicles]. Abstract of PhD thesis. Moscow; 2014. 22 p. (in Russian).
13. Porubov D.M., Zezyulin D.V., Tyugin D.Y., et al. Razrabotka avtomobil'noy sistemy opredeleniya i uderzhaniya v polose dvizheniya [Development of an automotive lane detection and keeping system]. *Transportnyye sistemy* [Transport Systems]. 2018;(2(8)):25-29. (in Russian).
14. Suvorov Y.B. Sudebnaya dorozhno-transportnaya ekspertiza [Forensic road traffic accident investigation]. Moscow: Ekzamen; 2003. (in Russian).
15. Endachev D.V. Prognozirovaniye kharakteristik krivolineynogo dvizheniya bespilotnogo avtomobilya [Forecasting of curvilinear motion characteristics of an unmanned vehicle]. PhD thesis. Moscow: NAMI; 2016. 185 p. (in Russian).
16. Evtyukov S.A., Vasiliev Y.V. Dorozhno-transportnyye proisshestviya: Rassledovaniye. Rekonstruktsiya. Ekspertiza [Road traffic accidents: Investigation. Reconstruction. Expertise]. Saint Petersburg: DNK; 2008. 392 p. (in Russian).
17. Yuretski R., Stanczyk T. Metody testirovaniya i vremya reaktsii voditeley [Testing methods and driver reaction time]. *Eksploatacja i Niezawodnosc – Tekhnicheskoye obsluzhivaniye i nadezhnost'* [Maintenance and Reliability]. 2011;(3):84-91. (in Russian).
18. Bakhmutsky M.M., Gintsburg L.L. Zavisimost' upravlyaemosti avtopoyezda ot peredatochnogo chisla mekhanizma povorota pri-tsepa [Dependence of the controllability of a road train on the gear ratio of the trailer turning mechanism]. *Trudy NAMI. Vypusk № 129. Upravlyaemost' avtomobiley i avtopoyezdov. Rulevoy privod* [Proceedings of NAMI. Issue No. 129. Controllability of Vehicles and Road Trains. Steering Gear]. Moscow: NAMI; 1971. p. 36-42. (in Russian).

**Дата поступления
в редакцию: 19.01.2026**

**Дата принятия
к публикации: 15.07.2026**

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ И ПОВЫШЕНИЯ ПОДВИЖНОСТИ НАЗЕМНЫХ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НА ОСНОВЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА

Л.Н. Мазунова

ORCID: 0009-0003-3262-8348 e-mail: matematixx@mail.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Рассмотрена методика оценки комплексного свойства подвижности наземных транспортно-технологических средств, учитывающая многокритериальность данного понятия и его зависимость от совокупности конструктивных, режимных и эксплуатационных параметров. Интегральный показатель подвижности вычисляется на основе аддитивной свертки взвешенных нормированных групповых критериев. Разработана методика, позволяющая получить единый численный интегральный показатель подвижности Наземных транспортно-технологических средств и комплексов и оценить степень влияния частных критериев на его величину. Предложенный подход обеспечивает возможность анализа влияния отдельных конструктивных параметров на итоговый уровень подвижности машины на этапе проектирования. Проведена апробация методики на примере колесного снегоболотохода «Байкал» ЗТМ 30081-11, в результате которой определены направления его модернизации, обеспечивающие повышение качества. Предлагаемый инструментарий может быть использован в системах автоматизированного проектирования для управления качеством выпускаемой продукции.

Ключевые слова: подвижность по мобильности; интегральный показатель подвижности; оценка качества ТТМ; колесный снегоболотоход.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мазунова, Л.Н. Разработка методики оценки и повышения подвижности наземных транспортно-технологических средств на основе многокритериальной оценки качества // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2026. № 3. С. 100-116. EDN LWSVGO

DEVELOPMENT OF TECHNIQUE FOR ASSESSING AND IMPROVING THE MOBILITY OF LAND TECHNOLOGICAL VEHICLES BASED ON MULTICRITERIAL QUALITY ASSESSMENT

L.N. Mazunova

ORCID: 0009-0003-3262-8348 e-mail: matematixx@mail.ru

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article discusses a methodology for assessing the complex property of mobility of land technological vehicles, which takes into account the multi-criteria of this concept and its dependence on a set of constructive, operational, and performance parameters. The integral mobility indicator is calculated based on the additive convolution of weighted normed group criteria. The developed methodology allows obtaining a single numerical integral mobility indicator for land technological vehicles and assessing the degree of influence of individual criteria on the value of this indicator. This approach provides an opportunity to analyze the impact of individual design parameters on the overall mobility level of the machine during the design phase. The methodology was tested on the example of the Baikal ZTM 30081-11 wheeled snow and swamp-going vehicle, which resulted in the identification of areas for its modernization to improve its quality. The proposed toolkit can be used in automated design systems to manage the product quality.

Key words mobility by mobility; mobility indicator; vehicle quality assessment; wheeled snow and swamp-going vehicles.

FOR CITATION: Mazunova L.N. Development of technique for assessing and improving the mobility of land technological vehicles based on multicriterial quality assessment. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 3. Pp. 100-116. EDN LWSVGO

Актуальность проблемы научной оценки подвижности наземных транспортно-технологических средств и комплексов (НТТСиК) обусловлена комплексом технологических, экономических и рыночных вызовов. Это не узкоинженерная задача, а стратегический фактор конкурентоспособности как производителей, так и конечных эксплуатантов спецтехники. Существует несколько ключевых аспектов, раскрывающих значимость проблемы.

Современные транспортно-технологические машины (ТТМ) – сложные киберфизические системы, где механика, гидравлика, электроника и системы управления тесно взаимосвязаны. Изменение одного параметра (например, установка гибридной силовой установки) комплексно влияет на массу, развесовку, динамику и, следовательно, на подвижность. Интуитивный или ускорасчетный подход не способен предсказать поведение такой сложной системы в условиях неопределенности (бездорожье, экстремальные температуры). Требуется цифровой двойник подвижности, позволяющий проводить виртуальные испытания на этапе эскизного проекта. В этом заключается технологический императив задачи.

Основные затраты на создание новой техники закладываются на этапе проектирования. Ошибки, обнаруженные на стадии испытаний или эксплуатации, ведут к колоссальным убыткам. Они складываются из прямых и косвенных издержек: доработка конструкции, переделка оснастки, повторные испытания; упущенная выгода из-за срыва сроков выхода на рынок, репутационные потери. Научно обоснованная оценка подвижности минимизирует затраты, переводя поиск оптимальных решений в цифровую среду, где цена ошибки на порядки ниже. Универсальная методика оценки подвижности НТТСиК становится инструментом технико-коммерческого диалога, позволяя формулировать техническое задание на языке объективных критериев и предоставлять заказчику не просто паспортные данные, а сертификат пригодности под его конкретные сценарии. Проектирование ТТМ высокой проходимости традиционно опиралось на уникальный опыт инженеров-ветеранов. Неформализованный характер этого опыта создает риски для отрасли. Создание научной методики – это формализация и оцифровка экспертного знания, создание «цифрового наставника» для нового поколения конструкторов, что обеспечивает преемственность и накопление знаний на уровне предприятия и отрасли.

Таким образом, актуальность проблемы выходит далеко за рамки инженерной оптимизации. Это ключевое условие для повышения технологического суверенитета в области специального машиностроения; резкого сокращения затрат и сроков создания новой конкурентоспособной техники; перехода от продажи «железа» к продаже «гарантированных транспортно-технологических возможностей». Разработка и внедрение универсальной, математически строгой методики оценки и прогнозирования подвижности НТТСиК – это необходимый шаг для перехода отечественного машиностроения на новый уровень системной инженерии, где качество и эффективность закладываются цифровыми инструментами на самой ранней стадии жизненного цикла изделия.

Проведено исследование работ, посвященных оценке качества сложных технических изделий [1]. В 1970-х гг. были разработаны отраслевые инструкции для оценки легковых автомобилей, которые в дальнейшем легли в основу работ таких ученых, как М.А. Григорьев, В.А. Долецкий, Х.А. Фасхиев и др., занимавшихся вопросами качества и конкурентоспособности автотранспорта. Для оценки качества технических объектов также применяется коэффициент желательности, вычисляемый с помощью функции Харрингтона. Ключевой проблемой при построении интегральных показателей остается определение объективных весовых коэффициентов. Широко используемый метод анализа иерархий Т. Саати, хотя и является надежным, но не позволяет полностью исключить субъективность. В качестве альтернативы В.М. Постников и С.Б. Спиридонов предложили подходы, основанные на арифметической и геометрической прогрессиях, позволяющие рассчитывать весовые соотношения критериев с помощью простых аналитических выражений. Оценочные показатели, основанные на эффективности, применялись в работах Н.Ф. Бабкова, Я.И. Бронштейна, Г.Б. Безбородова, М.Г. Беккера, В.И. Гребенщикова, В.Ф. Платонова, Дж. Вонга, Ю. Мацкерле и др. Д.В. Зезю-

лин исследовал проходимость машин в зимних условиях, тесно связывая ее с понятием эффективности их движения [2]. Изучением конкурентоспособности и подвижности НТТСиК занимались ученые, чьи подходы можно разделить на две группы. Представители первого подхода связывают подвижность с конкретными техническими параметрами (Е.Е. Баженов, И.О. Донато, В.Н. Наумов, Е.Б. Сарач, Н.В. Чернышев). Вторая группа исследователей дает более комплексную, эксплуатационную интерпретацию этого понятия (В.И. Котляренко, В.В. Ларин, В. А. Горелов) [3]. При решении задач, посвященных оценке качества ТТМ и ТТК, В.В. Беляковым в соавторстве с М.Е. Бушуевой, У.Ш. Вахидовым, К.О. Гончаровым, Д.В. Зезюлиным, В.Е. Колотилиным, Г.О. Котиевым, В.С. Макаровым, В.Н. Наумовым и др. предлагается обоснованное применение понятия подвижности как интегрального эксплуатационного свойства НТТСиК; предложена система критериев, которая позволяет получить численное значение интегрального показателя подвижности на основе методов многокритериальной оптимизации; составлена концептуальная схема иерархии задач управления транспортно-технологических машин [4-5]. Для практических задач проектирования, оценки и выбора техники наиболее продуктивен системный подход, представленный школой В.В. Белякова, позволяющий преобразовать понятие «подвижность» из качественной категории в количественную, представив ее как измеримый показатель, лежащий в основе оценки качества НТТСиК [6-7].

Современные методы оценки качества автотракторной техники все еще обладают рядом существенных недостатков, которые ограничивают их практическую полезность и эффективность. Основная проблема заключается в их фрагментарности и отсутствии системного подхода. Техника часто оценивается по ограниченному набору изолированных параметров. Такой метод не позволяет получить целостное представление о качестве, так как игнорирует взаимосвязь и взаимовлияние различных характеристик, а также слабо адаптируется к реальным, меняющимся условиям эксплуатации – типу грунта, рельефу, сезону и конкретной технологической задаче. Ключевым методологическим изъяном является высокая степень субъективности, особенно на этапе определения важности разных критериев при свертке. В результате оценка качества часто остается сложным теоретическим аппаратом, который не доведен до уровня простых и практичных решений для инженеров, проектировщиков и экспертов. Преодоление этих недостатков видится в развитии комплексных, адаптивных методик, основанных на принципах системного анализа и многокритериальной оптимизации. Подход, при котором разрозненные параметры сворачиваются в обобщенный показатель, ориентированный на итоговую эффективность или конкурентоспособность в заданных условиях, позволяет преобразовать абстрактное понятие «качества» в конкретный, измеримый инструмент для принятия научно обоснованных инженерных и коммерческих решений.

Подвижность – одно из важнейших свойств, характеризующих ТТС. В работах профессора В.В. Белякова термин «подвижность» определяется как множество свойств, сведенных в единое интегральное эксплуатационное свойство транспортно-технологических машин [8-11]. В настоящем исследовании решается задача технического характера, поэтому с точки зрения подвижности малозначимыми являются экономические, экологические, эргономические, эстетические показатели и показатели безопасности. Следовательно, показатель подвижности автотракторной техники стоит на более высокой ступени иерархической лестницы, описывающей свойства НТТСиК. Таким образом, разработку методики интегральной оценки качества ТТМ фактически можно свести к методике оценки их подвижности.

Согласно концепции, т.е. трактовке подвижности автотракторной техники, иерархия оценочных свойств может содержать три уровня оценочных критериев (рис. 1), нижний из которых вычисляется на основании эксплуатационных, конструкционных, режимных измерителей (q_e , q_k , q_p) машины. Таким образом, с помощью декомпозиции интегрального свойства на групповые и эмпирические критерии оценочный показатель представлен в виде упорядоченного графа. Создана единая иерархическая структура свойств, характеристик показателей и параметров, которая позволяет разработать многокритериальную систему оценки качества транспортно-технологических средств и комплексов в смысле их подвижности.



Рис. 1. Иерархическая структура интегрального показателя подвижности F

Fig. 1. Hierarchical structure of integral index of mobility F

Поскольку структура интегрального показателя подвижности содержит два уровня (групповые и эмпирические, или частные, критерии), параметры конструкции наземного транспортно-технологического комплекса образуют двумерный массив эмпирических показателей $\{Q_{ij}\}$, где i – номер группы, j – порядковый номер частного критерия в группе. После объединения частных критериев в групповые $\{Q_i\}$ проводится их нормировка $\{\tilde{Q}_i\}$, т.е. приведение к шкале $[0, 1]$. Критерии подвижности и формирование групповых критериев в интегральный показатель подвижности подробно описаны на предыдущих этапах исследования [12]. В данной работе для каждой единицы вездеходной техники были рассмотрены 23 измерителя, 20 эмпирических и 7 групповых критериев (табл. 1).

В качестве способа объединения частных критериев при вычислении интегрального показателя подвижности применялась взвешенная аддитивная свертка, где w_i – весовые коэффициенты групповых критериев. Она подразумевает под собой построение скалярной функции F , являющейся обобщенным критерием подвижности

$$F = \sum_{i=1}^I w_i \cdot \tilde{Q}_i$$

В соответствии с классификацией ТТМ по назначению (рис. 2) назначаются весовые коэффициенты групповых параметров. Получение весовых коэффициентов методом анализа иерархий и на основе формул арифметической прогрессии дают схожие результаты (рис. 3). В рамках настоящего исследования рассматривается случай эксплуатации вездеходных колесных машин в режимах перевозок людей и грузов. Методика вычисления интегрального показателя подвижности допускает пополнение системы классификации режимов работы, а также дополнение структуры интегрального показателя вербальными (неколичественными) показателями [13-14].

Таблица 1.
Соответствие между измерителями и критериями подвижности

Table 1.
Correlation between mobility meters and criteria

Измеритель		Критерий		Направление оптимизации частного критерия
q ₁	Рабочий объем, л	Q ₁₁	Рабочий объем, л	max
q ₂	Мощность, л.с	Q ₁₂	Мощность, л.с	max
q ₃	Максимальный момент, Н·м	Q ₁₃	Максимальный момент, Н·м	max
q ₄	Максимальная скорость движения на дороге, км/ч	Q ₁₄	Максимальная скорость движения по шоссе, км/ч	max
q ₅	Максимальная скорость движения на плаву, км/ч	Q ₁₅	Максимальная скорость движения на плаву, км/ч	max
		$Q_{16}=(q_{15}+q_{16})*g*q_{22}$	Тяговая сила, Н	max
		$Q_{17}=(q_{15}+q_{16})*g*q_{23}$	Сила сопротивления движению, Н	min
q ₆	Колея, мм	Q ₂₁	Колея, мм	max
q ₇	Дорожный просвет, мм	Q ₂₂	Дорожный просвет, мм	max
q ₈	База, мм	Q ₂₃	База, мм	min
q ₉	Угол подъема (с полной нагрузкой), град	Q ₂₄	Угол подъема (с полной нагрузкой), град	max
q ₁₀	Количество колес, шт	Q ₂₅	Количество колес, шт	max
q ₁₁	Давление воздуха в шине, атм	Q ₃₁	Давление воздуха в шине, атм	min
		$Q_{32}=\frac{(q_{15}+q_{16})*100}{\frac{1}{3}*q_{10}*q_{19}*q_{20}}$	Давление движителя на грунт, кг/см ²	min
q ₁₂	Глубина преодолеваемого брода, м	Q ₄₁	Глубина преодолеваемого брода, м	max
		$Q_{51}=\sqrt{q_{17}^2 + q_{18}^2}$	Диагональ машины, мм	min
q ₁₃	Минимальный радиус поворота (по колее наружного переднего колеса), м	Q ₆₁	Минимальный радиус поворота (по колее наружного переднего колеса), м	min
		$Q_{62}=q_8/q_6$	Соотношение колеи и колесной базы	min
q ₁₄	Боковой крен (без нагрузки), град	Q ₇₁	Боковой крен (без нагрузки), град	max
q ₁₅	Снаряженная масса без груза, кг			
q ₁₆	Грузоподъемность, кг			
q ₁₇	Длина машины, мм			
q ₁₈	Ширина машины, мм			
q ₁₉	Наружный диаметр шины, мм			
q ₂₀	Ширина профиля шины, мм			
q ₂₁	Высота машины, мм	Q ₇₂	Высота машины, мм	min
q ₂₂	Обобщенная функция сцепления движителя с поверхностью движения, Φ _φ			
q ₂₃	Обобщенная функция сопротивления движению, Φ _f			

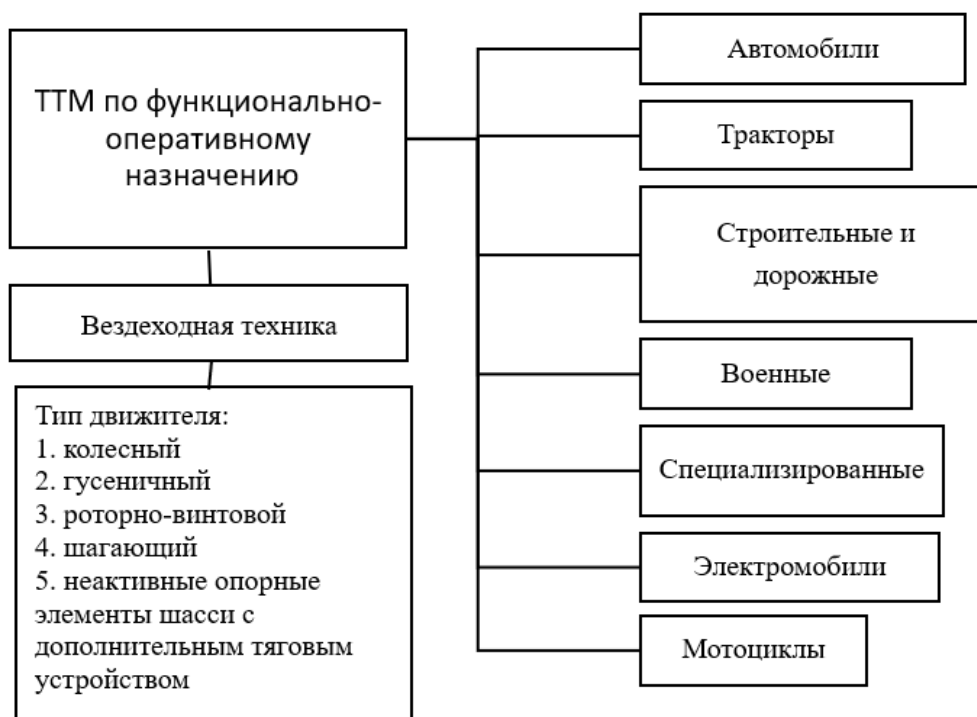


Рис. 2. Классификация ТТМ по функционально-оперативному назначению

Fig. 2. Classification of TTM by functional and operational purpose



Рис. 3. Весовые коэффициенты групповых критериев для оценки подвижности вездеходной техники

Fig. 3. Weight coefficients of group criteria for assessing the mobility of all-terrain vehicles

В среде *Matlab Simulink* построен и реализован алгоритм, позволяющий вычислить интегральный показатель подвижности, объединяющий частные и групповые критерии с учетом весомости их вклада. Полученные значения интегрального показателя можно интерпретировать по представленной шкале (табл. 2).

Таблица 2.

Шкала для интерпретации величины интегрального показателя подвижности

Table 2.

Scale for interpreting the value of the integral mobility index

Значение интегрального показателя подвижности	Пригодность ТММ для выполнения поставленной задачи
0,80 – 1,00	Образец отлично адаптирован к условиям
0,60 – 0,79	Хорошая пригодность
0,40 – 0,59	Удовлетворительная пригодность
0,20 – 0,39	Слабая пригодность, требует модернизации
0,00 – 0,19	Непригоден для данных условий

На базе алгоритма построены экспресс-методика (рис. 4), которая позволяют сравнивать между собой несколько образцов автотракторной техники с учетом их назначения и условий эксплуатации, выстраивать их в ранжированный ряд. Исходными данными для экспресс-оценки являются условия эксплуатации, режим работы и характеристики машины ($q_b = \text{const}$, $q_p = \text{const}$, $q_k = \text{var}$).

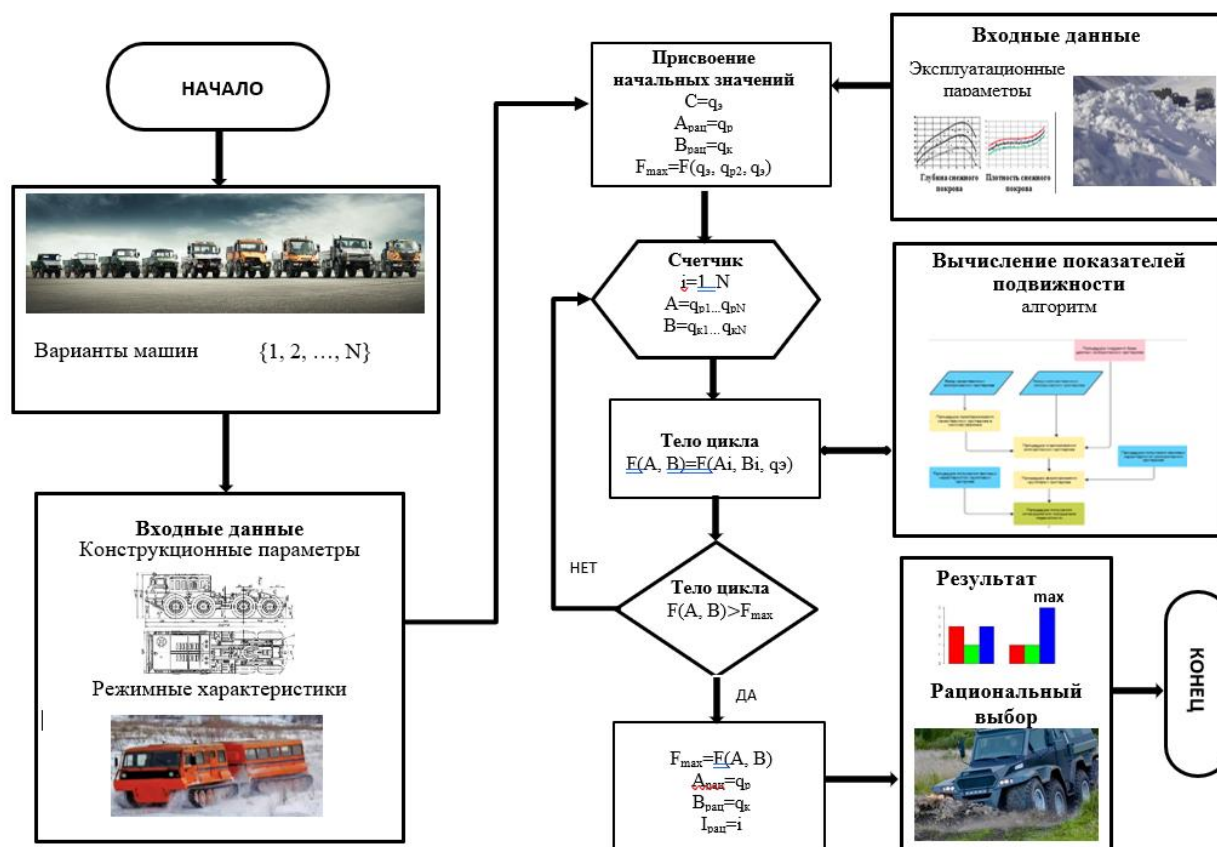


Рис. 4. Экспресс-методика оценки ТММ для выполнения поставленной задачи

Fig. 4. Express method to assess TMM ability to achieve the task

В соответствии с представленной выше шкалой и на основании вычисленных интегральных показателей подвижности снегоболотоходов при движении по твердой поверхности (рис. 5), можно сделать следующие выводы [15]. Рассматриваемая совокупность ТММ имеет интегральный показатель более 0,4, что свидетельствует об удовлетворительной подвижности в заданных условиях движения. Хорошей пригодностью для выполнения поставленной задачи среди представленных вездеходов обладают «Шерп Макс», «Атон Импульс Викинг-2992» и «Шаман», их интегральный показатель больше 0,6.

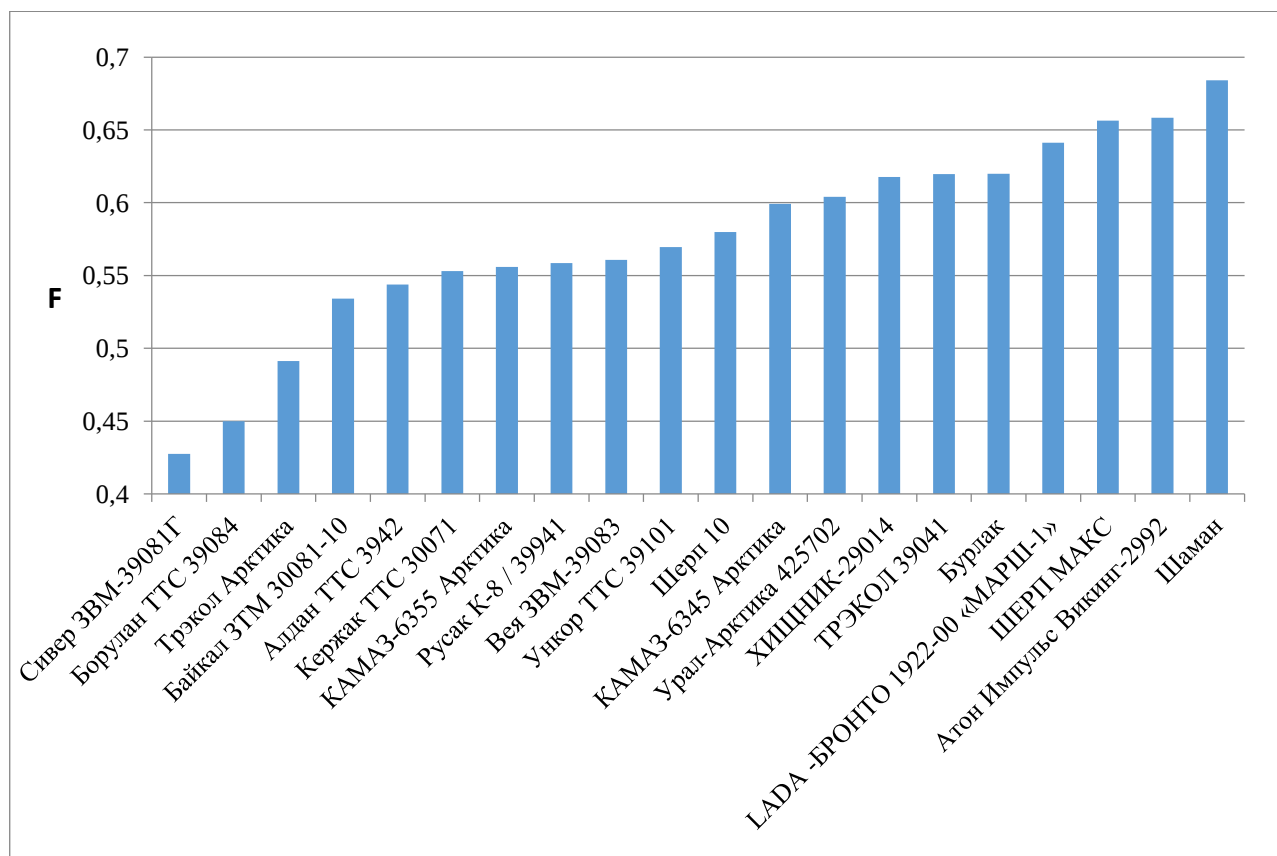


Рис. 5. Ранжирование колесных вездеходов по интегральному показателю подвижности

Fig. 5. Ranking wheeled all-terrain vehicles by integral mobility score

Экспресс-методика выбора снегоболотохода на основе интегрального показателя подвижности нужна для быстрой и объективной оценки, какая именно машина будет максимально эффективна в конкретных условиях эксплуатации (рис. 6). В отличие от простого сравнения характеристик, интегральный показатель позволяет количественно оценить и сравнить разные модели по единому критерию – их реальной способности выполнять поставленную задачу в заданных условиях эксплуатации ($q_p = \text{const}$, $q_b = \text{var}$, $q_k = \text{var}$). К преимуществам представленных экспресс-методик можно отнести скорость и простоту, они не требуют сложных расчетов.

В рассматриваемой группе колесных вездеходов с формулой 6х6 (рис. 7) снегоболотоход «Кержак, ТТС 30076» (№ 21) имеет самый высокий показатель подвижности не зависимо от плотности опорной поверхности. На слабых грунтах «Байкал ЗТМ 30081-10» (№ 22) обладает слабой подвижностью, однако с увеличением плотности поверхности движения подвижность вырастает и на снегах более высокой плотности его интегральный показатель подвижности превышает показатель для «Вея ЗВМ-39083» (№ 23).

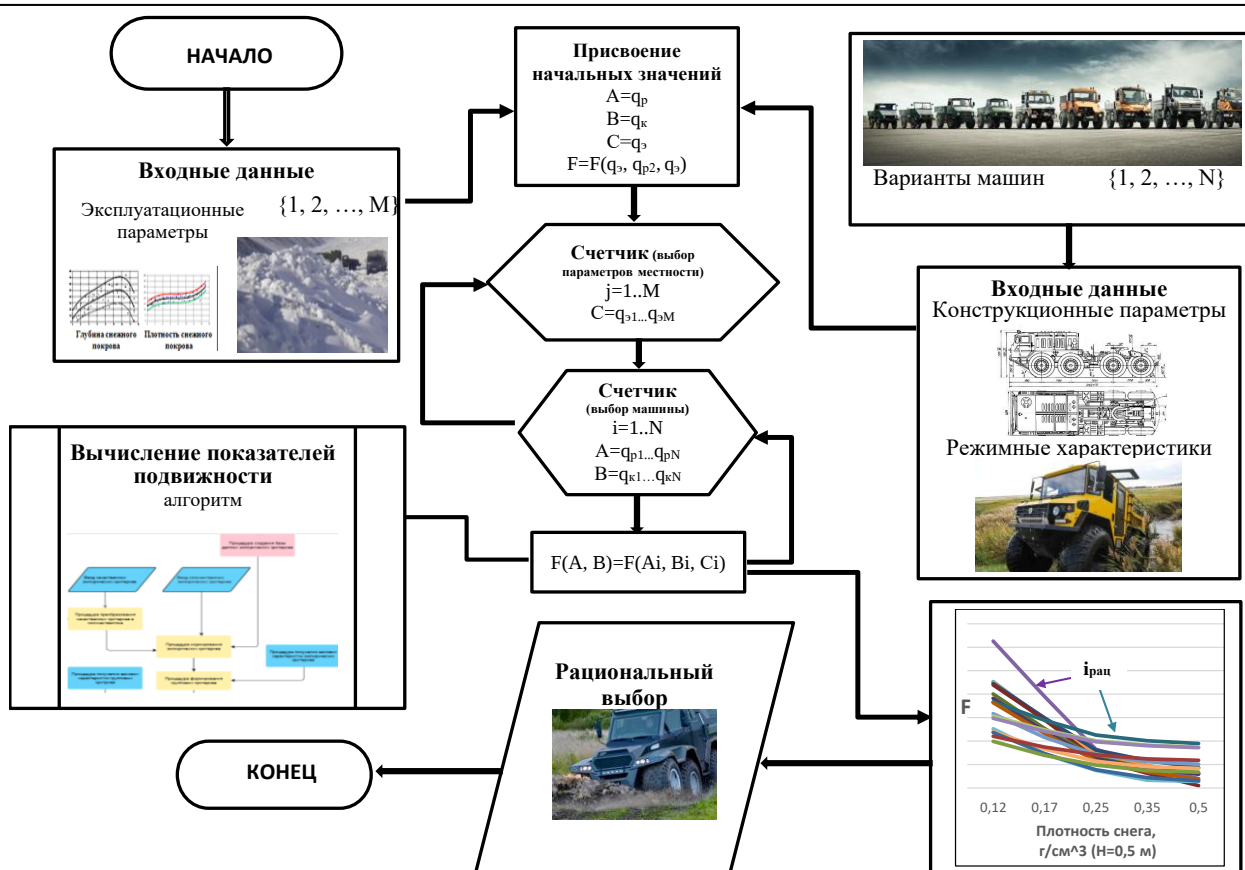


Рис. 6. Экспресс-методика рационального выбора ТТМ в зависимости от условий эксплуатации

Fig. 6. Express method of rational choice of TTM depending on operating conditions

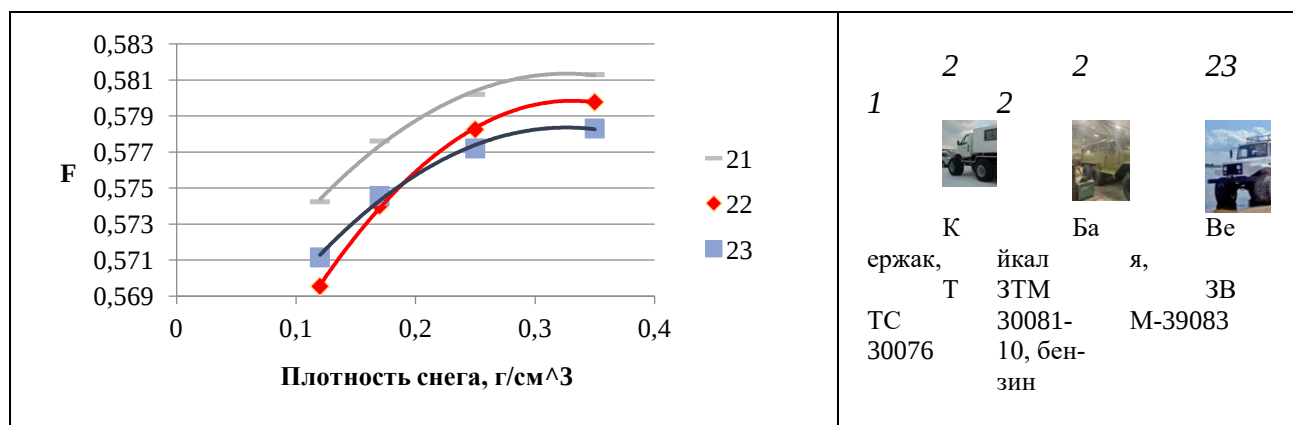


Рис. 7. Изменение интегрального показателя подвижности вездеходов 6х6 № 21-23 в зависимости от плотности поверхности движения

Fig. 7. Change in the integral mobility indicator of 6x6 all-terrain vehicles No. 21-23, depending on the density of the driving surface

Заключительный и главный этап методики – выработка рекомендаций по повышению подвижности на стадии проектирования или модернизации [16]. Интегральный показатель подвижности – это не просто итоговая оценка, он может служить базой для вычисления одной из ключевых диагностических характеристик – *эффективности подвижности* по частному или групповому критерию (табл. 3). Эти характеристики раскрывают внутреннюю структуру качества машины.

Таблица 3.
Характеристика показателей эффективности по подвижности
Table 3.
Performance characteristic by mobility

Оценка эффективности	Формула	Применимость
по групповому критерию	$\mathcal{Q}_{qi} = \frac{\tilde{Q}_i}{F}$	для всех групповых критериев
по частному критерию	$\mathcal{Q}_{qij} = \frac{\tilde{Q}_{ij}}{F}$	для всех частных критериев
по оценочному показателю	$\mathcal{Q}_{qi} = \frac{\tilde{q}_i}{F}$	для показателей, оптимизируемых только на максимум или на минимум

Анализ характера изменения показателей эффективности подвижности по частным показателям и критериям их связи с интегральным показателем проводился на всей совокупности рассматриваемых единиц вездеходной техники с различной колесной формулой, а также внутри каждой отдельных групп с определенной колесной формулой

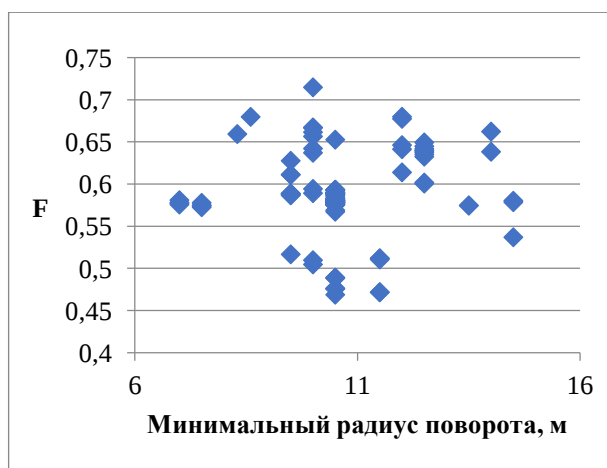


Рис. 8 (а)

Изменение интегрального показателя подвижности F в зависимости от минимального радиуса поворота

Fig. 8(a). Change of integral index of mobility F depending on minimum turning radius s

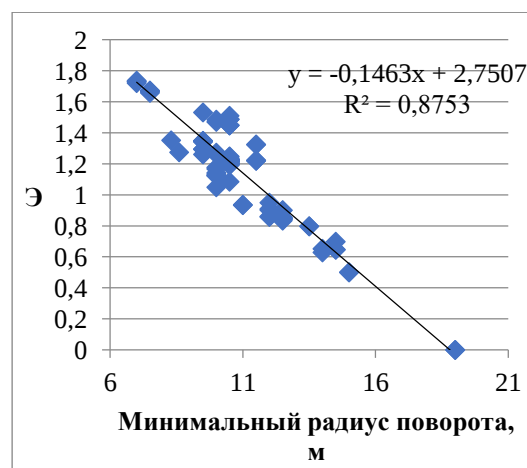


Рис. 8 (b)

Изменение показателя эффективности по частному критерию E в зависимости от минимального радиуса поворота

Fig. 8(b). Change in the efficiency of private criterion E depending on minimum turning radius

В исследовании рассчитывалась эффективность по всем показателям. В данной работе в качестве примера представлены графики изменения интегрального показателя подвижности и эффективности подвижности по частному критерию, минимальному радиусу поворота, в зависимости от минимального радиуса поворота транспортного средства. Установлено, что отсутствует зависимость интегрального показателя подвижности от величины минимального радиуса поворота, однако показатель эффективности подвижности по частному критерию (рис. 8) имеет тесную обратную связь с величиной минимального радиуса поворота. С уменьшением минимального радиуса поворота, а, следовательно, с улучшением управляемости, эффективность подвижности по этому частному критерию возрастает, следовательно, возрастает вклад этого частного критерия в интегральный показатель подвижности. Это коррелирует с тем фактом, что наиболее эффективно будут использоваться машины с меньшим значением минимального радиуса поворота.

Эффективность подвижности по частным и групповым критериям отражает долю участия этих критериев в величине интегрального показателя подвижности. Ориентируясь на него, можно указать критерии, за счет которых возможно увеличение подвижности ТТМ. Чем выше показатель эффективности, тем наиболее обоснованным является тот факт, что данный критерий является сильной стороной машины, т.е. этот параметр уже близок к своему пределу, дальнейшее улучшение будет давать минимальный прирост интегрального показателя подвижности.

Таблица 4.
Матрица балльной оценки эффективности
по частным показателям подвижности
(шкала 1-7, где 1 – лучшая оценка в группе, 7 – худшая)

Table 4.
Scorecard of the individual mobility performance rating
(scale 1-7, where 1 is the best in the group, 7 is the worst)

Частный критерий подвижности	Колесная формула 8x8						
	№26	№27	№28	№29	№30	№31	№32
							
	Ша- ман 8x8	Звезда Т24 шины Звезда	Звезда Т24 шины Мамонт	КАМАЗ- 6355 Арктика	Русак К-8 / 39941	Алдан 8x8	Трэкол Аркти- ка
Рабочий объем, л	7	5	4	1	6	2	3
Мощность, л.с	7	3	2	1	5	4	6
Максимальный момент, Нм	6	4	3	1	7	5	2
Максимальная скорость движения, км/ч: по шоссе	3	2	1	4	5	7	6
Максимальная скорость движения, км/ч: на плаву	3	2	1	6	7	5	4
Колея, мм	6	3	2	5	4	1	7
Дорожный просвет, мм	7	3	2	1	5	6	4
База, мм	4	6	5	7	3	1	2
Подъем, град	2	5	5	1	5	4	3
Давление воздуха в шине, атм	6	5	4	7	1	3	2
Глубина преодолеваемого брода, м	3	2	1	5	7	6	4
Минимальный радиус поворота, м.	2	7	6	4	1	5	3
Боковой крен, град	1	3	2	4	5	6	6
Длина, мм	2	6	5	7	3	1	4
Ширина, мм	4	7	6	3	5	2	1
Высота, мм	2	6	5	7	3	1	4
Наружный диаметр шины, мм	7	2	3	1	4	6	5
Ширина профиля шины, мм	7	1	5	3	6	4	2

Проведена комплексная оценка эффективности подвижности ТТМ по частным критериям в виде матрицы балльных оценок, выделены самые низкие оценки в группе по каждому

частному критерию (табл. 4). Снегоболотоходы расположены в порядке убывания значений интегрального показателя подвижности.

В категории колесных вездеходов 8х8 наибольшей подвижностью обладает «Шаман». Оценки эффективности подвижности по частным критериям указывают недостаточный вклад в подвижность по режимным критериям (рабочий объем 3 л, мощность 146 л с, максимальный крутящий момент 350 Н·м). Из этого следует один из сценариев повышения подвижности за счет замены двигателя *Iveco F1C, 3.0 TD* на более мощный. Низкая эффективность показателей профильной проходимости (колея 1950 мм, дорожный просвет 450 мм) указывают на возможность увеличения подвижности за счет изменения этих конструктивных параметров. Низкая эффективность подвижности по показателям опорной проходимости – диаметру и ширине профиля шины (1200 мм и 600 мм соответственно) – говорит еще об одном варианте повышения подвижности – замене существующих шин низкого давления на шины большего размера. Наименьший интегральный показатель подвижности в рассматриваемой совокупности имеет снегоболотоход «Трэкол Арктика». Матрица оценок содержит низкие значения эффективности подвижности по частным критериям: колея, боковой крен. Увеличение этих показателей с большой долей вероятности повысит подвижность ТС.

Расположение снегоболотоходов в порядке убывания интегрального показателя дает общую иерархию их универсальной подвижности. Однако сопутствующая матрица балльных оценок по частным критериям раскрывает внутреннюю структуру этого результата, выявляя как сбалансированные универсальные конструкции, так и специализированные машины-лидеры по отдельным параметрам. Практическое применение данных выводов в проектировании и модернизации НТТСиК может сводиться к построению профиля эффективностей – диаграммы показателей эффективности подвижности по всем критериям, который дает ментальную визуальную картину: где пики (сильные стороны), а где провалы (слабые звенья). Для обоснованного выбора изменений конструкции с целью повышения подвижности необходим одновременный учет как общего интегрального показателя подвижности, так и профиля ее показателей эффективности подвижности по частным критериям в соответствии с планируемыми условиями эксплуатации.

С учетом вышеизложенного разработана методика повышения подвижности НТТСиК, позволяющая проводить мероприятия, повышающие работоспособность автотракторной техники с максимальной адаптивностью к условиям эксплуатации и техническому состоянию самой машины (рис. 9). Представленная методика является не просто оценочной, а проектно-оптимизационной. Она предоставляет инженеру формализованный итеративный инструмент для диагностики текущего состояния машины, научно обоснованного выбора приоритетов модернизации, прогнозной оценки эффективности планируемых изменений.

Практическое применение методики повышения подвижности рассмотрено на примере модели снегоболотохода «Байкал», разработанного на ООО «ТрансМаш». На этапе разработки конструкции подвижность вездехода оценивалась величиной интегрального показателя, равной 0,4702, что свидетельствовало об удовлетворительной пригодности ТТМ для выполнения поставленной задачи в заданных условиях эксплуатации (движение по твердой поверхности). Однако данный показатель был ниже среднего по группе вездеходов с колесной формулой 6х6, поэтому с целью повышения конкурентоспособности продукции на рынке колесных вездеходов была поставлена задача об увеличении подвижности снегоболотохода. Согласно представленной методике, необходимо выяснить, за счет каких изменений в конструкции это возможно.

На основании профиля эффективности (рис. 10) можно сделать вывод, что низкая эффективность тягово-скоростных свойств и характеристик шин является прямым указанием на то, что именно они – слабые места машины, ограничивающие подвижность. Кроме того, подвижность можно повысить за счет увеличения колеи и максимальной величины бокового крена.

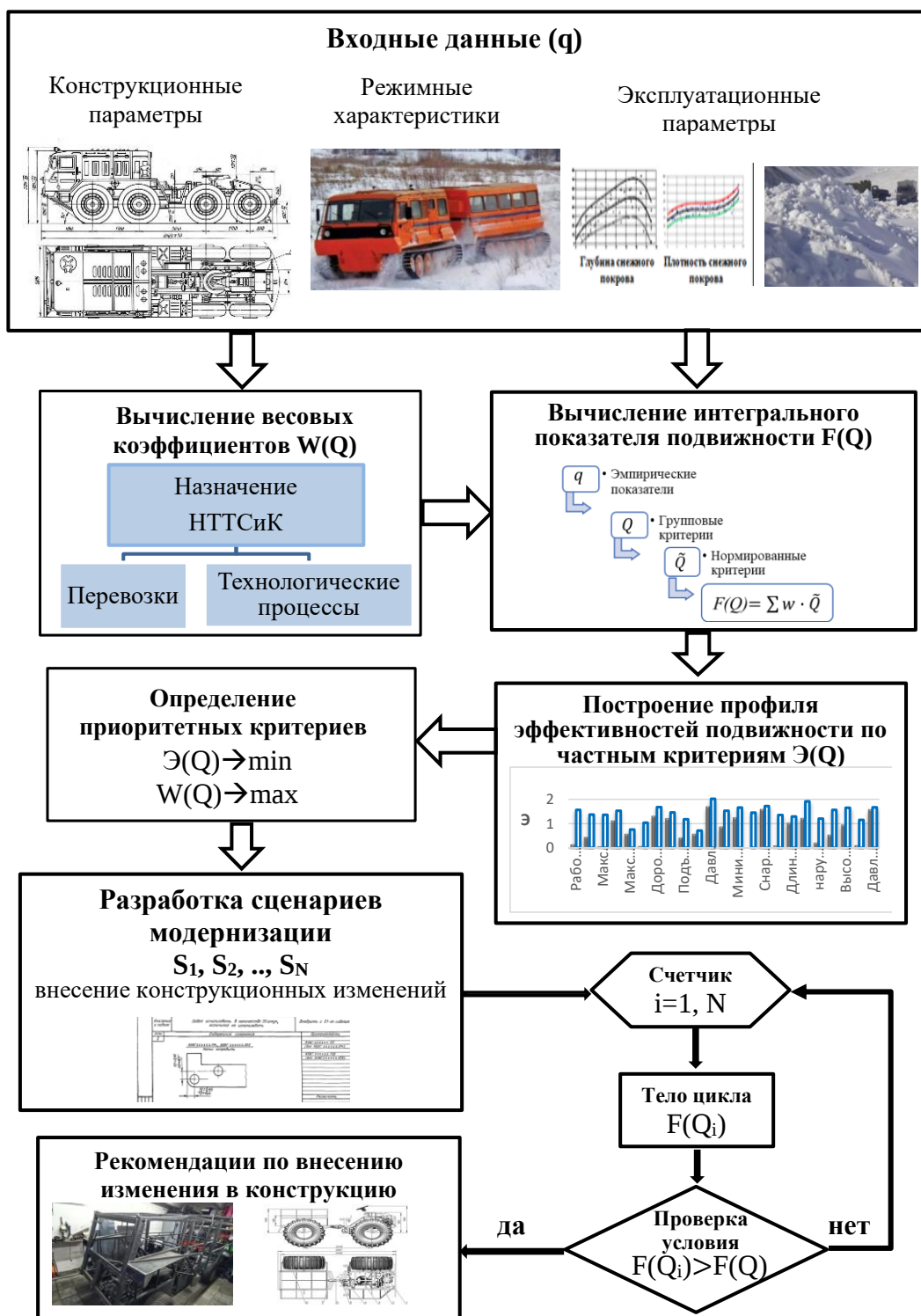


Рис. 9. Методика повышения интегрального показателя подвижности НТТСиК

Fig. 9. Methodology for increasing the integral index of mobility of land technological vehicles and complexes

Возможные стратегии модернизации должна быть нацелена на радикальное улучшение именно двигателя и шин: увеличиваем нормированные значения критериев с низкой эффективностью (двигатель, шины), стараясь при этом минимально ухудшить критерии с высокой эффективностью (габариты, масса).

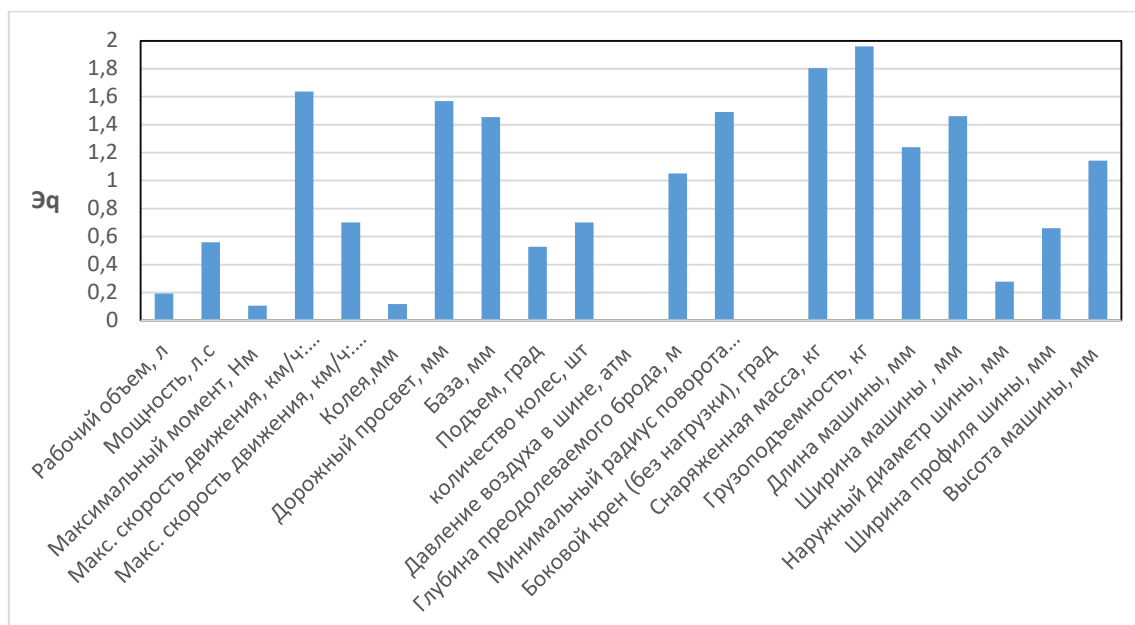


Рис. 10. Профиль эффективности подвижности по частным критериям для снегоболотохода «Байкал» на этапе разработки

Fig. 10. Mobility efficiency profile by private criteria for snow and swamp-going vehicle «Baikal» at the development stage

Рассматривалось несколько сценариев модернизации, в каждом случае проводилась оценка подвижности (табл. 5). Сценарий S_1 : снижение полной снаряженной массы на 1000 кг (достигается путем замены материала кузова на алюминиевый). Сценарий S_2 : замена двигателя на ЗМЗ 40522.10 – четырехцилиндровый из семейства бензиновых инжекторных ОАО «ЗМЗ» (объем – 2,4 л, степень сжатия – 9,3, ном. мощность при частоте вращения коленвала мин, квт (л.с) 111,8(152) 5200, мин. уд. расход топлива г/кВт (г/лсч) 269,3 (198). Сценарий S_3 : установка шин низкого давления «Avtoros Salamandra» с характеристиками: четыре слоя корда, наружный диаметр 1450 мм, ширина профиля 650 мм.

Таблица 5.
Сценарии модернизации снегоболотохода «Байкал»

Table 5.
Scenario of modernization of snow and swamp-going vehicle «Baikal»

Сценарий модернизации	Исходный вариант	S_1	S_1+S_2	$S_1+S_2+S_3$
Вносимые изменения	-	снижение полной массы	замена двигателя	замена шин
F	0,4702	0,4708	0,4756	0,5692

Таким образом, комплексные вносимые изменения в конструкцию позволили увеличить интегральный показатель подвижности на 20 %. В результате модернизации опытного образца на ООО «ТрансМаш» был выпущен снегоболотоход «Байкал» модель ЗТМ 30081-11. В рамках исследования была построена полная унифицированная иерархическая структура интегрального показателя подвижности, которая обладает свойством универсальности и может применяться для оценки любых ТТМ. С использованием методов многокритериальной оценки качества разработан алгоритм вычисления интегрального показателя подвижности путем свертки взвешенного векторного критерия. Кроме того, для корректного описания свойства подвижности и выбора весовых коэффициентов предложена классификация транспортных средств по функциональному назначению, учитывающая режимы работы. Важной особенностью разработанной методики является возможность дополнения иерархии свойств НТТСИк вербальными (качественными) показателями. В качестве практической де-

монстрации были получены количественные оценки эффективности энергетической установки, что доказывает гибкость метода при работе с трудно формализуемыми характеристиками. Апробация подхода проведена на примере ранжирования ТТМ по уровню подвижности. Сравнение расчетных данных с экспертными оценками не выявило существенных расхождений, что подтверждает валидность модели.

Разработанная методика обеспечивает переход от экспертно-эмпирических к научно обоснованным, количественным процедурам прогнозирования подвижности на этапе проектирования и оптимизации конструктивных решений для целенаправленного повышения интегрального показателя. С помощью показателей эффективности подвижности по частным критериям методика позволяет установить, какие из них в наибольшей степени влияют на прирост подвижности. Результаты исследовательской работы были внедрены в производство. На мощностях ООО «ТрансМаш» был выпущен опытный образец, освоенный затем в серии снегоболотоход «Байкал», модель ЗТМ 30081-11. Новая модель сочетает в себе высокую грузоподъемность, улучшенную динамику и уникальную проходимость, обеспеченную шинами сверхнизкого давления, что позволяет эффективно эксплуатировать машину в условиях заболоченной местности, снежной целины и мелководья.

Библиографический список

1. **Мазунова, Л.Н.** Обзор подходов к оценке качества и подвижности автотракторной техники, основанных на методах многокритериальной оценки качества / Л.Н. Мазунова, В.В. Беляков, Л.Н. Ерофеева [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2023. – Т. 21. № 3. – С. 170-179.
2. **Зезюлин, Д.В.** Разработка методики выбора конструкционных параметров двигателей, обеспечивающих эффективность движения колесных машин по снегу: автореферат дисс... канд. техн. наук / Зезюлин Денис Владимирович. – Нижний Новгород, 2013. – 17 с. – EDN QIGUZJ.
3. **Беляков, В.В.** Критерии оценки качества транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, А. М. Беляев, П. О. Береснев [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2016. – № 4(115). – С. 128-168. – EDN XWRMCX.
4. **Беляков, В.В.** Оценка подвижности транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, Е.Ю. Голышев // НГТУ, Н.Новгород, 2002 Деп. в ВИНТИ 10.01.02. № 28-В 2002
5. **Беляков, В.В.** Оценка подвижности транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, М.Е. Бушуева, Е.Ю. Голышев // Проблемы качества и эксплуатации автотракторных средств: материалы II международной научно-технической конференции (21-23 мая 2002 г.) / ПГАСА. – Пенза, 2002. – Ч. 1. – С. 23-31.
6. **Беляков, В.В.** Оценка подвижности транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, М.Е. Бушуева, Е.Ю. Голышев // Колесные машины: сб. тр. / МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М., 2003. – С. 29-30.
7. **Беляков, В.В.** Подвижность и конкурентоспособность транспортно-технологических машин // Известия Академии инженерных наук РФ им. акад. А.М. Прохорова. Транспортно-технологические машины и комплексы. – 2003. – Т. 5. – С. 3-25.
8. **Беляков, В.В.** Оценка подвижности транспортно-технологических систем // «АВТО-НН-2000» (27-29 июня 2000 г): материалы международной научно-технической конференции / НГТУ. – Н. Новгород, 2000. – С. 339-357.
9. **Беляков, В.В.** Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, А.М. Беляев, М.Е. Бушуева // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – № 3 (100). – С. 145-174.
10. **Беляков, В.В.** Решение задачи оценки подвижности автотракторной техники с помощью многокритериальной оптимизации / В.В. Беляков, М.Е. Бушуева, В.И. Сагунов // «Информационные системы и технологии» (ИСТ-2001): тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции посвященной 65-летию факультета информационных систем и технологий НГТУ Н. Новгород 20 апреля 2001 г. / НГТУ. – Н. Новгород, 2001. – С. 167-168.
11. **Беляков, В.В.** Многокритериальная оптимизация в задачах подвижности, конкурентоспособности автотракторной техники и диагностики сложных технических систем / В.В. Беляков, М.Е. Бушуева, В.И. Сагунов / НГТУ. – Н. Новгород, 2001. – 271 с.

12. **Мазунова, Л.Н.** Разработка методики вычисления показателя подвижности по мобильности легковых автомобилей, основанной на применении многокритериальной оптимизации / Л.Н. Мазунова, М.А. Дубкова [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2021. – № 2(133). – С. 102-112.
13. **Мазунова, Л.Н.** Сравнительный анализ методов многокритериальной оценки конкурентоспособности и подвижности автотракторной техники с учетом весовой значимости характеристик / Л.Н. Мазунова, В.В. Беляков, В.С. Макаров [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2022. – № 1(136). – С. 125-136. – DOI 10.46960/1816-210X_2022_1_125.
14. **Мазунова, Л.Н.** Преобразование качественных характеристик автотранспортных средств в количественные показатели с применением метода анализа иерархий / Л.Н. Мазунова, В.В. Беляков, В.С. Макаров [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2023. – № 1(140). – С. 97-106. – DOI 10.46960/1816-210X_2023_1_97. – EDN JOIWB1.
15. **Мазунова, Л.Н.** Применение методики вычисления интегрального показателя подвижности с целью повышения качества наземных транспортно-технологических средств на этапе проектирования / Л.Н. Мазунова, В.В. Беляков, Л.Н. Ерофеева [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. – Т. 23. № 2. – С. 166-175.
16. **Мазунова, Л.Н.** Методика вычисления интегрального показателя подвижности колесных вездеходов на основе метода многокритериальной оптимизации / Л.Н. Мазунова, В.В. Беляков, Л.Н. Ерофеева [и др.] // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2022. – № 3. – С. 211-222.

References

1. Mazunova L.N., Belyakov V.V., Erofeeva L.N., et al. Obzor podkhodov k otsenke kachestva i podvizhnosti avtotraktornoy tekhniki, osnovannykh na metodakh mnogokriterial'noy otsenki kachestva [Review of approaches to assessing the quality and mobility of automotive and tractor equipment based on multi-criteria quality assessment methods]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023;21(3):170-179. (in Russian).
2. Zezyulin D.V. Razrabotka metodiki vybora konstruksionnykh parametrov dvizhiteley, obespechivayushchikh effektivnost' dvizheniya kolesnykh mashin po snegu [Development of a methodology for selecting design parameters of propulsors ensuring the efficiency of wheeled vehicles motion on snow]. Abstract of PhD thesis. Nizhny Novgorod; 2013. 17 p. EDN QIGUZZ. (in Russian).
3. Belyakov V.V., Belyaev A.M., Beresnev P.O., et al. Kriterii otsenki kachestva transportno-tekhnologicheskikh mashin [Criteria for assessing the quality of transport-technological machines]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of NNSTU n.a. R.E. Alekseev]. 2016;(4(115)):128-168. EDN XWRMCX. (in Russian).
4. Belyakov V.V., Golyshev E.Y. Otsenka podvizhnosti transportno-tekhnologicheskikh mashin [Assessment of mobility of transport-technological machines]. Dep. in VINITI 10.01.02. No. 28-V 2002. Nizhny Novgorod: NSTU; 2002. (in Russian).
5. Belyakov V.V., Bushueva M.E., Golyshev E.Y. Otsenka podvizhnosti transportno-tekhnologicheskikh mashin [Assessment of mobility of transport-technological machines]. In: *Materialy II mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Problemy kachestva i ekspluatatsii avtotraktornykh sredstv"* (21-23 maya 2002 g.) [Proceedings of the II International Scientific and Technical Conference "Problems of Quality and Operation of Automotive and Tractor Vehicles" (May 21-23, 2002)]. Penza: PGASA; 2002. Part 1. p. 23-31. (in Russian).
6. Belyakov V.V., Bushueva M.E., Golyshev E.Y. Otsenka podvizhnosti transportno-tekhnologicheskikh mashin [Assessment of mobility of transport-technological machines]. In: *Kolesnyye mashiny: sb. tr.* [Wheeled Vehicles: collected papers]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University; 2003. p. 29-30. (in Russian).
7. Belyakov V.V. Podvizhnost' i konkurentosposobnost' transportno-tekhnologicheskikh mashin [Mobility and competitiveness of transport-technological machines]. In: Gulyaev Y.V., editor. *Izvestiya Akademii inzhenernykh nauk RF im. akad. A.M. Prokhorova. Transportno-tekhnologicheskiye mashiny i komplekсы* [Proceedings of the Russian Academy of Engineering Sciences n.a. acad. A.M. Prokhorov. Transport-technological machines and complexes]. Moscow – Nizhny Novgorod: NSTU; 2003. Vol. 5. p. 3-25. (in Russian).

8. Belyakov V.V. Otsenka podvizhnosti transportno-tekhnologicheskikh sistem [Assessment of mobility of transport-technological systems]. In: Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "AVTO-NN-2000" (27-29 iyunya 2000 g.) [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "AVTO-NN-2000" (June 27-29, 2000)]. Nizhny Novgorod: NSTU; 2000. p. 339-357. (in Russian).
9. Belyakov V.V., Belyaev A.M., Bushueva M.E. Kontseptsiya podvizhnosti nazemnykh transportno-tekhnologicheskikh mashin [The concept of mobility of ground transport-technological machines]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of NNSTU n.a. R.E. Alekseev]. 2013;(3(100)):145-174. (in Russian).
10. Belyakov V.V., Bushueva M.E., Sagunov V.I. Resheniye zadachi otsenki podvizhnosti avtotraktornoy tekhniki s pomoshch'yu mnogokriterial'noy optimizatsii [Solving the problem of assessing the mobility of automotive and tractor equipment using multi-criteria optimization]. In: Tezisy dokladov Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Informatsionnyye sistemy i tekhnologii» (IST-2001), posvyashchennoy 65-letiyu fakul'teta informatsionnykh sistem i tekhnologiy NGTU (N. Novgorod, 20 aprelya 2001 g.) [Abstracts of the All-Russian Scientific and Technical Conference «Information Systems and Technologies» (IST-2001), dedicated to the 65th anniversary of the Faculty of Information Systems and Technologies of NSTU (Nizhny Novgorod, April 20, 2001)]. Nizhny Novgorod: NSTU; 2001. p. 167-168. (in Russian).
11. Belyakov V.V., Bushueva M.E., Sagunov V.I. Mnogokriterial'naya optimizatsiya v zadachakh podvizhnosti, konkurentosposobnosti avtotraktornoy tekhniki i diagnostiki slozhnykh tekhnicheskikh sistem: ucheb. posobiye [Multi-criteria optimization in problems of mobility, competitiveness of automotive and tractor equipment and diagnostics of complex technical systems: textbook]. Nizhny Novgorod: NSTU; 2001. 271 p. (in Russian).
12. Mazunova L.N., Dubkova M.A., Belyakov V.V., et al. Razrabotka metodiki vychisleniya pokazatelya podvizhnosti po mobil'nosti legkovykh avtomobiley, osnovannoy na primenenii mnogokriterial'noy optimizatsii [Development of a methodology for calculating the mobility indicator of passenger cars based on the application of multi-criteria optimization]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of NNSTU n.a. R.E. Alekseev]. 2021;(2(133)):102-112. (in Russian).
13. Mazunova L.N., Belyakov V.V., Makarov V.S., et al. Sravnitel'nyy analiz metodov mnogokriterial'noy otsenki konkurentosposobnosti i podvizhnosti avtotraktornoy tekhniki s uchetom vesovoy znachimosti kharakteristik [Comparative analysis of multi-criteria assessment methods for competitiveness and mobility of automotive and tractor equipment taking into account the weight significance of characteristics]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of NNSTU n.a. R.E. Alekseev]. 2022;(1(136)):125-136. doi: 10.46960/1816-210X_2022_1_125. (in Russian).
14. Mazunova L.N., Belyakov V.V., Makarov V.S., et al. Preobrazovaniye kachestvennykh kharakteristik avtotransportnykh sredstv v kolichestvennyye pokazateli s primeneniye metoda analiza iyerarkhiy [Transformation of qualitative characteristics of vehicles into quantitative indicators using the analytic hierarchy process]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of NNSTU n.a. R.E. Alekseev]. 2023;(1(140)):97-106. doi: 10.46960/1816-210X_2023_1_97. EDN JOIWBI. (in Russian).
15. Mazunova L.N., Belyakov V.V., Erofeeva L.N., et al. Primneniye metodiki vychisleniya integral'nogo pokazatelya podvizhnosti s tselyu povysheniya kachestva nazemnykh transportno-tekhnologicheskikh sredstv na etape proyektirovaniya [Application of the methodology for calculating the integral mobility indicator to improve the quality of ground transport-technological means at the design stage]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025;23(2):166-175. (in Russian).
16. Mazunova L.N., Belyakov V.V., Erofeeva L.N., et al. Metodika vychisleniya integral'nogo pokazatelya podvizhnosti kolesnykh vezdekhodov na osnove metoda mnogokriterial'noy optimizatsii [Methodology for calculating the integral mobility indicator of wheeled all-terrain vehicles based on the multi-criteria optimization method]. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta* [Scientific and Technical Bulletin of Bryansk State University]. 2022;(3):211-222. (in Russian).

**Дата поступления
в редакцию: 12.03.2026**

**Дата принятия
к публикации: 10.07.2026**

УДК 629.3.018.7

EDN VSSETK

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ В ГУСЕНИЧНОМ ДВИЖИТЕЛЕ

И.О. НаказнойORCID: 0009-0009-8357-6024 e-mail: igornakaznoy@mail.ruВсероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова
Москва, Россия**В.Н. Наумов**ORCID: 0000-0001-5172-0364 e-mail: naumovvn@bmstu.ruМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия

Предложена, теоретически обоснована и реализована усовершенствованная методика экспериментального определения потерь в ходовой части методом выбега. Основное отличие от существующих аналогов состоит в определении выбега для различных скоростей при движении машины по недеформируемому основанию. Преимущество заключается в отсутствии необходимости установки дополнительно измерительного оборудования на машину. Экспериментальные данные получены для более широкого диапазона скоростей по сравнению с ранее известными. Полученные результаты позволяют выдвинуть предположение о распространении на гусеницы с параллельным резинометаллическим шарниром закона удельных потерь, ранее применявшегося для гусениц с последовательным шарниром. Применение разработанного метода, в теоретической основе которого лежит принцип Даламбера, позволяет определить потери в ходовой части гусеничных машин. Подтверждена гипотеза о квадратичном виде зависимости потерь в ходовой части от скорости движения для гусеничного движителя с параллельным резинометаллическим шарниром. Собранные данные позволяют экстраполировать данную зависимость на более высокие значения скорости. Применение разработанного метода определения потерь в ходовой части гусеничных машин позволит проводить испытания без применения специальных измерительных устройств и стендов. Полученные экспериментальные данные позволяют задавать значения потребной мощности силовой установки и трансмиссии для перспективных быстроходных гусеничных машин.

Ключевые слова: гусеничная машина; потери в ходовой части; выбег; принцип Даламбера; параллельный резинометаллический шарнир; усовершенствованная методика; сопротивление движению; силы сопротивления движению; удельные потери; гусеничный движитель.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Наказной, И.О. Экспериментальное определение потерь в гусеничном движителе / И.О. Наказной, В.Н. Наумов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2026. № 3. С. 117-125. EDN VSSETK

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF LOSSES IN TRACKED PROPULSION

I.O. NakaznoyORCID: 0009-0009-8357-6024 e-mail: igornakaznoy@mail.ruDukhov Automatics Research Institute
Moscow, Russia**V.N. Naumov**ORCID: 0000-0001-5172-0364 e-mail: naumovvn@bmstu.ruBauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

Abstract. The article proposes, theoretically substantiates and implements an improved method for the experimental determination of undercarriage losses by the coasting method. The main difference from the existing methods is to determine the coasting distance for various speeds when the vehicle moves on a non-deformable surface. The ad-

vantage of the proposed method is that there is no need to install additional measuring equipment on the vehicle. Experimental data were obtained for a wider range of speeds compared to previously known data. The results obtained allow advancing the assumption that the law of specific losses previously applied to tracks with a series hinge can be extended to tracks with a parallel rubber-metal hinge. The developed method is based on d'Alembert's principle. Its application allows to determine losses of tracked vehicles. The conducted studies confirm the hypothesis of a quadratic dependence of undercarriage losses on the speed of movement for a tracked propulsion system with a parallel rubber-metal hinge. The collected data make it possible to extrapolate this dependence to higher speed values. The application of the developed method for determining undercarriage losses of tracked vehicles will allow testing without the use of special measuring devices and test benches. The experimental data obtained make it possible to set the required power values of the power source and transmission for promising high-speed tracked vehicles.

Key words: tracked vehicle; undercarriage losses; coasting; d'Alembert's principle; parallel rubber-metal hinge; advanced technique; motion resistance; motion resistance forces; specific losses; tracked propulsion.

FOR CITATION: Nakaznoy I.O., Naumov V.N. Experimental determination of losses in tracked propulsion. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 3. Pp. 117-125. EDN VSSETK

Введение

В ходе выполнения проектировочных и поверочных расчетов подвижности гусеничных машин, в том числе, прогнозирования быстроходности, оценки ее влияния на защищенность, расчета потребной мощности двигателя, построения тяговых, разгонных, тормозных характеристик, прочностных расчетов и др., необходимо знать удельные потери в ходовой части. Их часто называют потерями в гусеничном движителе, включая потери в системе подпрессоривания, и обозначают $f_{г.д.}$ [1-2]. Вычисление искомых потерь расчетным путем затруднено вследствие сложности гусеничного движителя и машины в целом как механической системы. Поэтому на практике пользуются зависимостями, полученными экспериментальным путем [3-7]. Однако эмпирическое определение потерь тоже вызывает определенные сложности из-за проблематичности отделения внутренних потерь в ходовой части от внешних сопротивлений, особенно сопротивления грунта. Одним из таких способов является измерение на стенде, в результате которого определяются т.н. потери холостого хода [8]. Получаемые таким образом характеристики являются неполными, поскольку не учитывают все составляющие потерь. Более адекватным является определение потерь на машине, движущейся в реальных условиях. Этот способ сопровождается техническими трудностями установки измерительной аппаратуры и снятия сигнала с датчиков. На ряде машин конструкция бортового редуктора несколько облегчает задачу монтажа измерительной аппаратуры. В этом случае потери определяются по моментам, измеряемым, как правило, на ведомом валу бортового редуктора, что тоже сопровождается издержками, например, необходимостью установки датчиков на валу, организацией токосъема с вращающихся частей, последующей обработкой полученных осциллограмм.

В связи с этим, предложена и реализована усовершенствованная методика экспериментального определения потерь в ходовой части быстроходных гусеничных машин методом выбега с движением по недеформируемому основанию. Суть методики состоит в измерении длины пути, пройденной машиной накатом (далее – выбег) на разных начальных скоростях при движении по недеформируемому основанию.

Преимущества такого подхода заключаются в отсутствии необходимости проведения монтажно-демонтажных работ по установке, подключению и калибровке на машине экспериментального оборудования, простоте отделения внешних потерь от внутренних потерь в ходовой части, упрощенном получении и обработке экспериментальных данных. Подобные действия проводятся при испытаниях колесных машин [9]. Однако конструкция и динамика гусеничных машин накладывает свои особенности. В частности, для колесных машин эта методика используется при определении КПД силовой цепи шасси от коленчатого вала двигателя до контакта шины с дорогой и, как правило, для одного значения скорости. Предлагались такие способы и для гусеничных тракторов [10], однако все они носили характер гипотезы, общего замысла и не имели практической реализации. Можно предположить, что дан-

ный подход имеет и недостатки. Это связано с тем, что режим движения накатом будет отличаться от тягового режима, а также от режима движения по деформируемым основаниям, в частности, по абразивным грунтам типа песок, по глинистым грунтам и т.д., вследствие попадания в элементы соединений ходовой части мелких частиц, способных оказывать как эффект повышения сопротивления, так и наоборот, его снижение за счет «смазывающего» эффекта. Соответственно, возникает необходимость апробации предлагаемого метода.

Важно также, что существующие эмпирические зависимости получены на скорости движения до 50 км/ч для машин с гусеницами с открытым металлическим шарниром и для гусениц с резинометаллическим шарниром последовательного типа, и не все объекты испытаний оснащены поддерживающими катками. Вместе с тем, в силу ряда преимуществ на современных быстроходных машинах все чаще применяются гусеницы с параллельным шарниром [11]. Поэтому получение экспериментальных данных для быстроходных гусеничных машин с параллельным типом резинометаллического шарнира гусениц вызывает практический и теоретический интерес. Анализ полученных экспериментальных данных и установление закономерностей потерь в гусеничном движителе для различных скоростей, в том числе, превышающих 50 км/ч, становятся особенно важными при прогнозировании быстроходности машин повышенной удельной мощности и при исследовании влияния динамики машин на их защищенность.

Описание условий, последовательности и результатов проведения эксперимента

Для проведения эксперимента был выбран прямой участок разбитой на стыках бетонной дороги, на которую в некоторых местах наложено асфальтовое покрытие (рис. 1). Уклон дороги составил менее 0,25 % (перепад высот на участке длиной 500 м менее 2 м).



Рис. 1. Фрагмент участка дороги

Fig. 1. Fragment of a road section

Объектом испытаний выбрана быстроходная технически исправная гусеничная машина массой 44,5 т. Машина оснащена поддерживающими катками, гусеницей с параллельным шарниром, асфальтоходные подушки отсутствуют, беговая дорожка необрезиненная, опорные катки с наружной амортизацией (рис. 2).



Рис. 2. Гусеница и опорный каток испытываемого объекта

Fig. 2. Track and road wheel of the test object

Машина разгонялась до назначенной скорости, которую механик-водитель контролировал по спидометру. Затем от установленной отметки он выполнял торможение накатом посредством отключения двигателя и трансмиссии от ведущих колес путем выжима педали сцепления или включением нейтральной передачи. Далее измерялся полученный тормозной путь до полной остановки машины (выбег). Опыты проводились на скоростях от 10 до 60 км/ч с шагом 10 км/ч; каждый повторялся от двух до четырех раз в зависимости от сходимости результатов. Полученные экспериментальным путем значения выбега сведены в табл. 1.

Таблица 1.
Результаты эксперимента

Table 1.
Experimental results

Скорость, км/ч	Тормозной путь, м			Среднее значение, м	СКО*	Дисперсия	G_p (расчетные значения критерия Кохрена)
	Опыт №1	Опыт №2	Опыт №3				
10	30,5	36,1	42,4	36,3	6,0	35,4	0,060
20	43,6	45,0	46,0	44,9	1,2	1,5	0,002
30	94,0	109,3	87,7	97,0	11,1	123,4	0,208
40	213,7	229,7	209,6	217,7	10,6	112,8	0,190
50	296,7	325,7	329,1	317,2	17,8	317,1	0,535
60	445,5	443,0	446	444,8	1,6	2,6	0,004
Сумма дисперсий						592,7	

*Среднеквадратичное отклонение

Для рассматриваемого случая, при числе параллельных наблюдений $\gamma=3$ и для всех опытов одинаковом, для оценки воспроизводимости опытов можно использовать критерий Кохрена [12]:

$$G_p \leq G_m,$$

где G_m – табличное значение критерия Кохрена; G_p – расчетное значение, определяемое по формуле:

$$G_p = \frac{S_j^2}{\sum_j S_j^2},$$

где S_j^2 – дисперсия j-го опыта; $\sum_j S_j^2$ – сумма дисперсий всех опытов.

Количество степеней свободы $f=\gamma-1=2$. Тогда значение критерия Кохрена $G_T=0,768$ (табл. 2).

Таблица 2.
Значения критерия Кохрена

Table 2.
Values of the Cochran's criterion

Значение критерия Кохрена при доверительной вероятности $P=0,95$							
Число степеней свободы							
1	2	3	4	5	6	7	8
0,907	0,768	0,684	0,629	0,590	0,560	0,637	0,518

Условие $G_m \leq G_p$ выполняется для всех опытов. Следовательно, они удовлетворяют требованию воспроизводимости. Полученная экспериментальная зависимость графически примет вид, показанный на рис. 3.

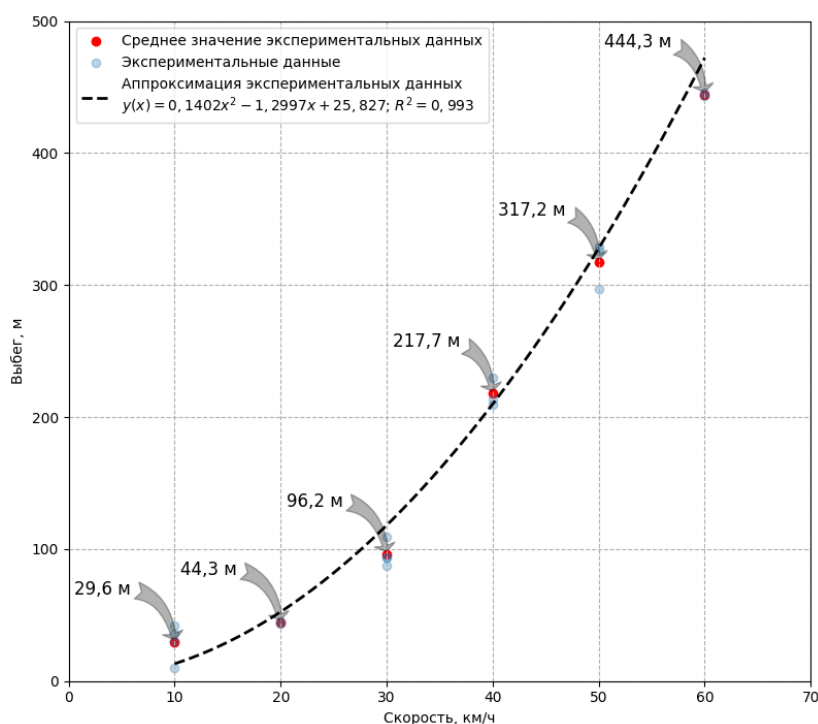


Рис. 3. Зависимость выбега от скорости

Fig. 3. Dependence of the coasting distance on speed

Предварительный визуальный анализ экспериментальных данных (без их обработки методами математической статистики и теории планирования эксперимента) показывает, что полученные значения отклика (выбега) от фактора (скорости), носят характер монотонно возрастающей степенной зависимости. Поэтому возникает необходимость оценить в первом приближении, насколько полученные зависимости адекватно отражают реальные физические процессы в ходовой части. С этой целью рассмотрим теоретические основы методики определения потерь в ходовой части методом выбега. Они могут быть построены на двух исходных положениях. Первое положение основано на использовании принципа Даламбера [13]. Согласно принципу Даламбера, энергия, оставшаяся в системе ΔE после воздействия сил сопротивления $R_{сопр}$, равна разнице между полной кинетической энергией системы $E_{кин}$ и работой $A_{сопр}$, совершаемой силами сопротивления:

$$\Delta E = E_{\text{кин}} - A_{\text{сomp}}$$

Такой подход можно назвать энергетическим, поскольку он состоит в определении работы, совершаемой силами сопротивления. Другой вариант может быть реализован с использованием законов динамики. Рассмотрим дифференциальное уравнение движения гусеничной машины в общем виде при движении машины по горизонтальной поверхности:

$$m\ddot{x} = \sum_{i=1}^n F_i, \quad (1)$$

где F_i – действующая на объект сила.

С учетом приложенных сил выражение (1) примет вид:

$$m\ddot{x} = P_m - R_{\text{сп}} - R_{\text{в}} - R_{\text{с.д.}}$$

В рассматриваемом случае действуют следующие силы:

P_m – сила тяги, подведенная к грунту;

$R_{\text{сп}}$ – сила сопротивления грунта движению;

$R_{\text{в}}$ – сила сопротивления воздуха движению;

$R_{\text{с.д.}}$ – сила сопротивления гусеничного движителя движению.

Внутренние и внешние сопротивления движению обозначим через R_c :

$$R_c = R_{\text{сп}} + R_{\text{в}} + R_{\text{с.д.}}$$

В случае невысоких скоростей силой сопротивления воздуха можно пренебречь. Тогда дифференциальное уравнение движения машины при отсутствии силы тяги P_m , т.е. при движении накатом переписывается в следующем виде:

$$m\ddot{x} = -R_c$$

С учетом выбранных факторов эксперимента получим:

$$mdv = -R_c dt$$

Это уравнение с разделяющимися переменными, проинтегрировав которое, найдем время до полной остановки машины:

$$\int \frac{mdv}{-R_c} = \int dt,$$

$$\Delta t = \frac{m}{-R_c} (V_{\text{к}} - V_0), \quad (2)$$

где $V_{\text{к}}$ – конечная скорость движения машины; V_0 – начальная скорость в каждом опыте.

Силы сопротивления движения R_c выразим через удельную составляющую f_c . С учетом условий эксперимента, где P_m и $V_{\text{к}}$ равны нулю, уравнение (2) примет следующий вид:

$$\Delta t = \frac{V_0}{f_c g} \quad (3)$$

Согласно кинематической формуле, пройденный машиной путь S определяется как:

$$S = V_0 \Delta t + \frac{a \Delta t^2}{2} \quad (4)$$

Значение ускорения (замедления) по определению:

$$a = (V_{\text{к}} - V_0) / \Delta t \quad (5)$$

Подставим в формулу (4) выражения (3) и (5):

$$S_i = \frac{V_{0_i}^2}{2g(f_{\text{с.д.}i} + f_{\text{сп}})}$$

где V_{0_i} , S_i и $f_{\text{с.д.}i}$ – скорость, путь и удельное сопротивление, соответствующие каждому опыту.

Проведя обратные преобразования, получим выражение для определения удельных потерь в гусеничном движителе для пути торможения накатом полученного экспериментально методом выбега для каждого i -го опыта:

$$f_{c.d_i} = \frac{V_{0_i}^2}{2gS} - f_{cp}$$

Таким образом, получив в результате эксперимента значения тормозного пути для различных скоростей, можно построить эмпирическую зависимость удельных потерь в гусеничном движителе от скорости движения гусеничной машины в известных условиях. Для более точного определения удельных потерь требуется фиксация и учет промежуточных значений времени и тормозного пути. В ином случае f_c представляет интегральную характеристику удельных потерь на всем скоростном диапазоне от V_0 до V_k . На основе вышеприведенных выражений, полученных аналитическим путем, запишем характер искомой зависимости в общем виде для непрерывной функции:

$$S = S(V_0^2) \text{ или } f_{c.d.} = f_{c.d.}(V_0^2)$$

Проведенные теоретические выкладки свидетельствуют о квадратичном законе зависимости выбега от скорости движения. Таким образом, полученные результаты эксперимента согласуются с общепринятыми положениями современной теории движения быстроходных гусеничных машин и в первом приближении соответствуют теоретически полученной квадратичной функции зависимости выбега от скорости движения машины, а, следовательно, адекватно отражают происходящие исследуемые процессы. Это позволяет считать эксперимент успешным, а предложенную методику – работоспособной.

Заключение

Значения удельных потерь в ходовой части используются в проектировочных и поверочных расчетах подвижности быстроходных гусеничных машин. Вычисление искомых потерь расчетным путем вызывает трудности вследствие сложности гусеничной машины как механической системы. Определение потерь экспериментальным путем вызывает сложности, в частности, из-за трудности отделения внутренних потерь в ходовой части от внешних сопротивлений, особенно, сопротивления грунта, необходимости установки датчиков, токо-съемы с вращающихся частей, последующей обработки полученных осциллограмм.

Общезвестные эмпирические зависимости ранее получены для устаревших образцов с гусеницами с открытым металлическим или с резинометаллическим шарниром последовательного типа, в основном, до 50 км/ч. Таким образом, остро стоит вопрос совершенствования методик определения потерь в гусеничном движителе, исследования удельных потерь в гусеничном движителе современных быстроходных гусеничных машин повышенной удельной мощности с гусеницами с резинометаллическим шарниром параллельного типа.

В настоящей работе предложена, теоретически обоснована и реализована усовершенствованная методика расчетно-экспериментального определения потерь в ходовой части методом выбега с движением по недеформируемому основанию. Полученные результаты позволяют выдвинуть гипотезу о распространении в общем виде на гусеницы с параллельным резинометаллическим шарниром закона удельных потерь, ранее применявшегося для гусениц с последовательным шарниром, в том числе для скоростей, превышающих ранее установленные значения. Для уточнения значений эмпирических коэффициентов в зависимости от конкретной конструкции гусеничного движителя требуются дальнейшие экспериментальные исследования с последующей их обработкой методами теории планирования эксперимента.

Библиографический список

1. **Чобиток, В.А.** Теория движения танков и БМП / В.А. Чобиток. – М.: Воениздат, 1984. – 263 с.
2. **Никитин, А.О.** Теория танка / А.О. Никитин, Л.В. Сергеев. – М.: ВАБТВ, 1962. – 584 с.
3. **Платонов, В.Ф.** Динамика и надежность гусеничного движителя / В.Ф. Платонов. – М.: Машиностроение, 1973. – 232 с.

4. **Забавников, Н.А.** Основы теории транспортных гусеничных машин / Н.А. Забавников. – М.: МВТУ, 1961. – 335 с.
5. Теория и конструкция танка. – Т. 10. Испытания военных гусеничных машин / под ред. П.П. Исакова. – М.: Машиностроение, 1989. – 232 с.
6. Расчет и конструирование гусеничных машин / под ред. проф. Н.А. Носова. – Л.: Машиностроение. [Ленингр. отд-е], 1972. – 559 с.
7. **Шароглазов, Б.А.** Численная оценка составляющих тягового и мощностного балансов гусеничной машины на базе результатов полевых испытаний / Б.А. Шароглазов, М.Ф. Сафаров, Д.И. Нарadowый и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия Машиностроение. – 2014. – Т. 14. № 2. – С. 51-58.
8. Теория и конструкция танка. – Т. 6. Вопросы проектирования ходовой части военных гусеничных машин / под ред. П.П. Исакова. – М.: Машиностроение, 1985. – 244 с.
9. **Петрушов, В.А.** Патент № 2130599 Российская Федерация, МПК G01M 17/00 (2006.01). Способ определения сопротивления движению колесного транспортного средства: № 96120656/28; заявл. 15.10.1996; опубл. 20.05.1999.
10. **Антонов, А.С.** Гусеничные тягачи: В 2-х ч. Конструкция и расчет. Т. 2. – М.: Воен. изд-во, 1960. – 574 с.
11. Модернизацию танка до уровня Т-72Б3М показали за 60 секунд. [Электронный ресурс]. – URL: <https://rg.ru/2023/04/14/reg-urfo/modernizaciiu-tanku-do-urovnia-t-72b3m-pokazali-za-60-sekund.html> (дата обращения: 18.08.2025).
12. **Спирин, Н.А.** Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, Л.А. Зайнуллин [и др.]. – Екатеринбург: ООО «УИНЦ», 2015. – 290 с.
13. **Наказной, О.А.** Частичная оценка целесообразности применения электрической трансмиссии быстроходных гусеничных машин / О.А. Наказной // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – №10. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://rucont.ru/efd/276627> (дата обращения: 13.12.2025).

References

1. Chobitok V.A. Teoriya dvizheniya tankov i BMP [Theory of motion of tanks and infantry fighting vehicles]. Moscow: Voenizdat; 1984. 263 p. (in Russian).
2. Nikitin A.O., Sergeev L.V. Teoriya tanka [Tank theory]. Moscow: VABTV; 1962. 584 p. (in Russian).
3. Platonov V.F. Dinamika i nadezhnost' gusenichnogo dvizhitelya [Dynamics and reliability of a tracked propulsion system]. Moscow: Mashinostroenie; 1973. 232 p. (in Russian).
4. Zabavnikov N.A. Osnovy teorii transportnykh gusenichnykh mashin [Fundamentals of the theory of transport tracked vehicles]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University; 1961. 335 p. (in Russian).
5. Isakov P.P., editor. Teoriya i konstruktsiya tanka. T. 10. Ispytaniya voennykh gusenichnykh mashin [Theory and design of the tank. Vol. 10. Testing of military tracked vehicles]. Moscow: Mashinostroenie; 1989. 232 p. (in Russian).
6. Nosov N.A., editor. Raschet i konstruirovaniye gusenichnykh mashin [Calculation and design of tracked vehicles]. Leningrad: Mashinostroenie (Leningrad branch); 1972. 559 p. (in Russian).
7. Sharoglazov B.A., Safarov M.F., Naradoviy D.I., et al. Chislennaya otsenka sostavlyayushchikh tyagovogo i moshchnostnogo balansov gusenichnoy mashiny na baze rezul'tatov polevykh ispytaniy [Numerical assessment of the components of the traction and power balances of a tracked vehicle based on field test results]. Vestnik YuUrGU. Seriya Mashinostroenie [Bulletin of SUSU. Series Mechanical Engineering]. 2014;14(2):51-58. (in Russian).
8. Isakov P.P., editor. Teoriya i konstruktsiya tanka. T. 6. Voprosy proektirovaniya khodovoy chasti voennykh gusenichnykh mashin [Theory and design of the tank. Vol. 6. Design issues of the running gear of military tracked vehicles]. Moscow: Mashinostroenie; 1985. 244 p. (in Russian).
9. Petrushov V.A. Spособ opredeleniya soprotivleniya dvizheniyu kolesnogo transportnogo sredstva [Method for determining the resistance to motion of a wheeled vehicle]. Russian Federation patent RU 2130599 C1. IPC G01M 17/00 (2006.01). Application No. 96120656/28. Filed 1996 Oct 15. Issued 1999 May 20. (in Russian).
10. Antonov A.S. Gusenichnye tyagachi: V 2-kh ch. Konstruktsiya i raschet. T. 2 [Tracked tractors: In 2 parts. Design and calculation. Vol. 2]. Moscow: Military Publishing House; 1960. 574 p. (in Russian).
11. Modernizatsiyu tanka do urovnya T-72B3M pokazali za 60 sekund [The modernization of the tank to the T-72B3M level was shown in 60 seconds] Available from: <https://rg.ru/2023/04/14/reg-urfo/modernizaciiu-tanku-do-urovnia-t-72b3m-pokazali-za-60-sekund.html>

- urfo/modernizaciiu-tanki-do-urovnia-t-72b3m-pokazali-za-60-sekund.html [accessed 2025 Aug 18]. (in Russian).
12. Spirin N.A., Lavrov V.V., Zainullin L.A., et al. Metody planirovaniya i obrabotki rezul'tatov inzhenernogo eksperimenta [Methods of planning and processing the results of engineering experiments]. Ekaterinburg: UINC; 2015. 290 p. (in Russian).
 13. Nakaznoy O.A. Chastichnaya otsenka tselesoobraznosti primeneniya elektricheskoy transmisii bystrokhodnykh gusenichnykh mashin [Partial assessment of the feasibility of using electric transmission for high-speed tracked vehicles]. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation]. 2013;(10). Available from: <https://rucont.ru/efd/276627> [accessed 2025 Dec 13]. (in Russian).

Дата поступления

в редакцию: 26.01.2026

Дата принятия

к публикации: 14.07.2026

НАШИ АВТОРЫ

ИНФОРМАТИКА, УПРАВЛЕНИЕ И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

Гусев Михаил Николаевич – инженер Арзамасского научно-производственного предприятия «ТЕМП-АВИА», аспирант Арзамасского политехнического института

Муромцев Дмитрий Ильич – доцент Национального исследовательского университета ИТМО, канд. техн. наук

Нетронин Илья Викторович – младший научный сотрудник Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

Сичкар Валентин Николаевич – аспирант Национального исследовательского университета ИТМО

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

Егорова Екатерина Сергеевна – студент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

Семененко Андрей Николаевич – начальник службы радиационной безопасности Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

Мельников Владимир Иванович – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

Веселов Николай Борисович – инженер-конструктор ООО НПО «ТРАНСПОРТ», канд. техн. наук, профессор, действительный член Академии Транспорта

Дьяков Филипп Кириллович – доцент Московского автомобильно-дорожного института (МАДИ), канд. техн. наук

Коростелев Сергей Анатольевич – заведующий кафедрой «Наземные транспортно-технологические системы» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, д-р техн. наук

Мазунова Лариса Николаевна – старший преподаватель Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

Молев Михаил Юрьевич – магистрант Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

Наумов Валерий Николаевич – профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, д-р техн. наук

Черевастов Максим Геннадьевич – эксперт ГУ МВД России по Нижегородской области

ПРИНИМАЕМ В ПЕЧАТЬ НАУЧНЫЕ СТАТЬИ В ЖУРНАЛ «ТРУДЫ НГТУ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»

Адрес редакции: 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24
ауд. 1363-3
e-mail: rsl@nntu.ru

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ, НАПРАВЛЯЕМЫХ В РЕДАКЦИЮ

- В редакцию направляются два печатных экземпляра статьи и комплекты сопроводительной документации: бумажный и электронный.
- Рекомендуемый объем статьи не превышает 15 страниц текста. Все страницы должны быть пронумерованы. Минимальное количество страниц – 7; **минимальный объем статьи – 0,5 п.л.**
- **Статью необходимо сопроводить** актом и протоколом экспортного контроля, экспертным заключением о возможности открытого опубликования, выпиской из заседания кафедры, рекомендующей статью к опубликованию.
- **Печатные экземпляры** статей должны быть подписаны всеми авторами.
- **Первая страница** статьи должна содержать следующую информацию: УДК (код по универсальному десятичному классификатору); инициалы и фамилии авторов (в порядке, отражающем их авторский вклад); аннотацию, ключевые слова.
- **Аннотация** (120-150 слов) отражает перечисление результатов и ключевых выводов, обозначение новизны и сферы применения.
- **Ключевые слова** (не менее 10) отражают тематическую направленность, объект и результаты исследования.
- Изложение материала должно быть логически выстроенным. **Тематика** представленного исследования должна **строго соответствовать рубрике журнала и паспорту специальности ВАК**. Рекомендуется следующая структура статьи: вводная часть с обоснованием необходимости и изложением цели работы, теоретический анализ, методика, экспериментальная часть, результаты и выводы (не более 0,5 страницы), **библиографический список, содержащий только цитируемые или рассматриваемые в тексте работы**. Ссылки нумеруются в порядке цитирования. **Самоцитирование** рекоменду-

ется **ограничить тремя пунктами**. Рекомендуется использовать в библиографическом списке ссылки на научные работы по теме исследования, индексируемые в международных базах научного цитирования. Библиографический список не должен включать неопубликованные работы.

- К статье необходимо **приложить файл с информацией об авторах** на русском языке: ФИО (полностью), должность, место работы (полное название организации, город, страна), идентификатор ORCID, e-mail, ученая степень и звание.
- Текст набирается через один интервал 12 кеглем. Сноски и примечания 10 кеглем. Поля: левое, правое, верхнее и нижнее – 20 мм. Переносы не допускаются. Используется формат *Word for Windows* и стандартные шрифты *Times New Roman* и *Symbol*.
- Формульные выражения выполняют строго в редакторе MS Equation 3-12 кегль. Размерность физических величин должна соответствовать системе СИ.
- Сокращение слов, кроме общепринятых, не допускается. Использованию аббревиатур должна предшествовать их расшифровка.
- Таблицы (11 кегль жирный) должны иметь названия, их следует располагать по тексту статьи, ссылки на таблицы: (табл. 1).
- Диаграммы выполняются в формате Excel. Графический материал (только в черно-белом изображении) должен быть четким и не требовать перерисовки. Изображения выполняются в формате jpg или tif с разрешением 300 dpi. Рисунки выполняются по ГОСТ, подрисовочная подпись 11 жирный кегль, ссылки на рисунки: (рис. 1).

РУКОПИСИ И СОПРОВОДИТЕЛЬНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ ПРИНИМАЮТСЯ:

2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации

2.3.8 – Информатика и информационные процессы

Валерий Павлович Хранилов: **hranilov@nntu.ru**

**2.4.9 – Ядерные энергетические установки, топливный цикл,
радиационная безопасность**

Максим Александрович Легчанов: **legchanov@nntu.ru**

2.5.11 – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы

Юрий Игоревич Молев: **rsl@nntu.ru**

**ТРУДЫ НГТУ
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА**

№ 3 (154)

Ответственный редактор: **В.И. Казакова**

Редакция:
603155, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24
rsl@nntu.ru
Свободная цена

Подписано в печать: 25.08.2026 Дата выхода в свет 01.09.2026. Формат 60x84 ¹/₈.
Бумага офсетная. Печать трафаретная.
Усл. печ. л. 8,50. Тираж 100 экз. Заказ .

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева.
Типография НГТУ.

Адрес университета и типографии:
603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24