

ISSN 1816-210X

ТРУДЫ НГТУ

ИМ. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

Нижний Новгород

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

№ 2 (129)

Нижний Новгород 2020

УДК 050(06)
ББК 9я54
Т 78

Т 78 Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2020. №2(129).
– 156 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: 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины; 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации; 05.13.17 – Теоретические основы информатики; 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы; 05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование и вывод из эксплуатации

Главный редактор А.А. Куркин

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Члены редколлегии: Н.Ю. Бабанов, В.В. Беляков, Г.Я. Вагин, В.А. Горбунов, С.М. Дмитриев, Г.О. Котиев, В.В. Кондратьев, А.Л. Куликов, В.Н. Ланцов, М.А. Легчанов, А.Б. Лоскутов, В.С. Макаров, В.Н. Наумов, Н.А. Прибатурин, В.П. Хранилов, А.Е. Хробостов

В.П. Хранилов – ответственный секретарь рубрики
«Информатика и управление в технических и социальных системах»
М.А. Легчанов – ответственный секретарь рубрики «Энергетические системы и комплексы»
В.С. Макаров – ответственный секретарь рубрики
«Машиностроение и транспорт: теория, технологии, производство»

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель

Сергей Михайлович Дмитриев
(д.т.н., проф., ректор НГТУ им. Р.Е. Алексеева)

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА

Пелиновский Дмитрий Ефимович	PhD, проф. математики, Университет Мак Мастер, Гамильтон, Онтарио, Канада
Палкович Ласло	Проф. Сечени Иштван Университет, Дьёр, Венгрия
Варлаки Петер	Проф. Сечени Иштван Университет, Дьёр, Венгрия
Виджай Кумар Чакка	PhD, проф., Университет Шив Надар, Индия
Ялчинер Ахмет	д., проф., METU, директор OERC, Турция

УЧРЕДИТЕЛЬ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»
(603950, Нижегородская обл., г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24)

Электронная версия журнала:
<http://www.nntu.ru/content/trudy/>

*Свидетельство о регистрации
периодического печатного издания:*
ПИ № ФС 77-56417

УДК 050(06)
ББК 9я54

© Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2020

**MINISTRY OF SCIENCE EDUCATION AND 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

№ 2 (129)

Nizhny Novgorod 2020

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: 05.05.03 – Wheeled and tracked vehicles;
05.13.01 – System analysis, management and information processing;
05.13.17 – Theoretical foundations of computer science;
05.14.02 – Electric power stations and electric power systems;
05.14.03 – Nuclear power plants, including design and decommissioning

Editor-in-Chief A.A. Kurkin

EDITORIAL BOARD

Members of Editorial Board: N.Yu. Babanov, V.V. Belyakov, G.Ya. Vagin, V.A. Gorbunov, S.M. Dmitriev G.O. Kotiev, V.V. Kondratiev, A.L. Kulikov, M.A. Legchanov, V.N. Lantsov, A.B. Loskutov, V.S. Makarov, V.N. Naumov, N.A. Pribaturin, V.P. Khranilov, A.Ye. Khrobostov

V.P. Khranilov – Executive Secretary of the Section «Informatics and Management in Technical and Social Systems»
M.A. Legchanov – Executive Secretary of the Section «Energy Systems and Complexes»
V.S. Makarov – Executive Secretary of the Section «Mechanical Engineering and Transport»

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

EDITORIAL COUNCIL

Chairman

S.M. Dmitriev
NNSTU Rector (Nizhny Novgorod, Russia)

Members of Editorial Council

Pelinovski Dmitri

PhD, Doctor of Mathematical Science, Professor
McMaster University (Ontario, Canada)

László Palkovics

The Széchenyi István University (Győr, Hungary)

Péter Várlaki

The Széchenyi István University (Győr, Hungary)

Vijay Kumar Chakka

PhD, Doctor of Philosophical Science, Professor
Shiv Nadar University (India)

Yalciner Akhmet

Professor, Head of Ocean Engineering Research Center
of Middle East Technical University (Turkey)

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

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ	9
Куркин А.А., Куркина О.Е., Пелиновский Е.Н. Логистические модели распространения эпидемий	9
Доценко А.В., Дивеев А.И. Разрешение коллизий в задаче группового взаимодействия мобильных роботов с изменением набора аргументов функции управления ...	19
Елисеев М.Е., Мазунова Л.Н., Елисеева И.Н. Статистический и корреляционный анализ погодных факторов в интерактивной информационной системе повышения безопасности дорожного движения	28
Спижевой А.С., Баландин Д.В. Понижение размерности пространства признаков в задаче автоматического определения пола человека	42
Уткина А.А. Применение модели SSG/LRR- ω RSM при моделировании нестационарных отрывных течений.....	52
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ	64
Безносов А.В., Бокова Т.А., Боков П.А., Маров А.Р., Львов А.В., Волков Н.С. Обоснование технических решений реакторного контура установок БРС-ГПГ малой и средней мощности с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем для наземных и плавучих АЭС.....	64
Ершова М.И., Крюков Л.Т. Использование параметров микропластической деформации для оценки охрупчивания материалов реакторного оборудования	77
Титов И.Т., Бычков А.В., Дони Н.А. Учет влияния открытой электрической дуги на параметры срабатывания дистанционной защиты	85
МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО	94
Беляев А.М., Васильев А.А., Жарков Е.В., Макаров В.С., Беляков В.В. Исследование движения шасси мобильного робототехнического комплекса с гусенично-модульным движителем по песчаному опорному основанию	94
Вашурин А.С., Молев Ю.И., Прошин Д.Н., Трусов Ю.П. Разработка требований к устойчивости транспортных средств при экстренном торможении	107
Драпалюк М.В., Гнусов М.А., Дручинин Д.Ю., Клубничкин В.Е. Математическое описание взаимодействия элементов почвогрунта с рабочими поверхностями лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя	117
Котиев Г.О., Гумеров И.Ф., Стадучин А.А., Косицын Б.Б. Выбор емкости бортового накопителя энергии при использовании электромашины в износостойкой тормозной системе высокоподвижных колесных машин	126
Рогов П.С., Мишустов В.П., Колесниченко Д.А., Сеницын Е.А. Системы авто-	

матического экстренного торможения. Особенности реализации и компонентный состав	134
Умирзоков А.М., Мамбеталин К.Т., Сайдуллозода С.С., Самиев Ш.К. Моделирование расхода топлива большегрузными автомобилями в горных условиях эксплуатации	140
НАШИ АВТОРЫ	150

CONTENTS

INFORMATICS AND MANAGEMENT IN TECHNICAL AND SOCIAL SYSTEMS...	9
Kurkin A.A., Kurkina O.E., Pelinovsky E.N. Logistic models of epidemic growth...	9
Dotsenko A.V., Diveev A.I. Collision avoidance at swarm regrouping with variable set of arguments of control function	19
Eliseev M.E., Mazunova L.N., Eliseeva I.N. About subsystem of analysis of weather-related factors of interactive system of road safety improvement.....	28
Spizhevoy A.S., Balandin D.V. Feature space dimensionality reduction for automatic gender recognition	42
Utkina A.A. SSG/LRR- ω RSM model application for transitional detached flow modelling	52
 ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES	 33
 Beznosov A.V., Bokova T.A., Bokov P.A., Marov A.R., Lvov A.V., Volkov N.S. Substantiation of technical solutions of the reactor circuit of the BRS-GPG units of small and medium power with a heavy liquid metal coolant for ground and floating NPPs.....	 64
Ershova M.I., Kryukov L.T. Using parameters of microplastic deformation to evaluate embrittlement of reactor equipment materials.....	77
Titov I.T., Bychkov A.V., Doni N.A. Taking into account the influence of the open electric arc on the remote protection operation parameters	85
 MECHANICAL AND TRANSPORT: THEORY, TECHNOLOGY, PRODUCTION ..	 94
 Belyaev A.M., Vasiliev A.A., Zharkov E.V., Makarov V.S., Belyakov V.V. Research of the movement of a chassis of a mobile robotic complex with a track-modular mover on a sand surface.....	 94
Vashurin A.S., Molev Yu.I., Proshin D.N., Trusov Yu.P. Development of requirements for stability of vehicles under emergency braking	107
Drapalyuk M.V., Gnusov M.A., Druchinin D.Yu., Klubnichkin V.E. Mathematical description of the interaction of elements of soil with working surfaces of forestry fire grinder and stripped player.....	117
Kotiev G.O., Gumerov I.F., Stadukhin A.A., Kositsyn B.B. Choosing the capacity of the on-board energy storage when using an electric motor in the wear-resistant braking system of high-mobility wheeled vehicles.....	126
Rogov P.S., Mishustov V.P., Kolesnichenko D.A., Sinitsyn E.A. Automatic emergency braking systems: features of implementation and components.....	134

Umirzokov A.M., Mambetalin K.T., Saydulozoda S.S., Samiev Sh.K. Modeling of fuel consumption by heavy cars in mountains operating of conditions.....	140
AUTHORS	150

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

УДК 517.91

А.А. Куркин¹, О.Е. Куркина¹, Е.Н. Пелиновский¹⁻³

ЛОГИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭПИДЕМИЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»²

Институт прикладной физики РАН³

В связи с увеличивающимся числом эпидемий мирового масштаба огромное значение обретает возможность математического моделирования их развития, наступления их пика и продолжительности. Коэффициенты моделей определяются из натуральных данных и не всегда хорошо известны на начальном этапе развития эпидемий. Именно поэтому на этой стадии необходимо применение максимально простых моделей, содержащих минимальное количество параметров. В данной работе для описания развития эпидемии используется логистическое уравнение Ферхюльста и его обобщения. Рассмотрены три вида уравнений: 1) классическое уравнение Ферхюльста, 2) обобщенное логистическое уравнение, 3) дифференциально-разностное уравнение. Обсуждаются аналитические решения этих уравнений, включая выбор констант уравнений, основываясь на этих решениях. Представлены зависимости для характеристик пика эпидемии и продолжительности эпидемии.

Ключевые слова: обыкновенные дифференциальные уравнения, логистическое уравнение, моделирование эпидемий.

Введение

Уже в этом столетии наблюдалось несколько эпидемий мирового масштаба (коровье бешенство, птичий грипп, атипичная пневмония и др.) Последняя эпидемия коронавируса (COVID-19) поразила всех своими масштабами и затронула буквально все страны, вынуждая принять чрезвычайные меры для нераспространения заражения (закрытие государственных границ, карантин, самоизоляция, прекращение работы многих предприятий и учреждений, переход на дистанционную работу и обучение). Число заразившихся в мире превысило два миллиона (данные середины апреля 2020 г.), а число умерших превысило 100 тыс. чел. [1-3]. Динамика заболевания иллюстрируется рис. 1, представленным в газете «Financial Times». На нем в полулогарифмическом масштабе указан рост числа заболевших коронавирусом в различных странах со временем, начиная со 100 случаев заболевания. Здесь же штриховыми линиями приведены экспоненциальные асимптотики, соответствующие удвоению числа случаев за определенное количество дней. Звездочками обозначены дни, когда страны вводили карантинные меры. Как видим, характер распространения эпидемий в каждой стране происходит по почти одному и тому же сценарию: сначала экспоненциальный (или близкий к экспоненциальному) рост заболевших людей, а затем этот рост замедляется (однако численные значения констант, описывающих эти кривые, различны для разных стран). В двух странах (Китай и Южная Корея) число заболевших уже не увеличивается, так что эпидемия коронавируса в этих странах закончилась. В некоторых странах кривые в этих координатах еще являются прямыми линиями, что означает экспоненциальный рост числа заболевших, и эпидемия еще не достигла пика. Данные по России за март-апрель показывают ту же динамику (рис. 2). В целом, они хорошо ложатся на экспоненциальную кривую, но темпы роста

числа заболевших стали уменьшаться, по-видимому, благодаря режиму самоизоляции, введенному 20 марта 2020 г.

Для объяснения скорости распространения эпидемии коронавируса (COVID-19) и прогнозирования ее последствий сейчас применяются разные математические модели [4-9].

В данной работе затронуты только математические проблемы описания динамики распространения эпидемий и возможности предсказания времени наступления пика и окончания эпидемии. Мы перечислим простейшие модели, основанные на логистическом уравнении, приведем их решения и обсудим возможность прогнозирования на основе получаемых решений.

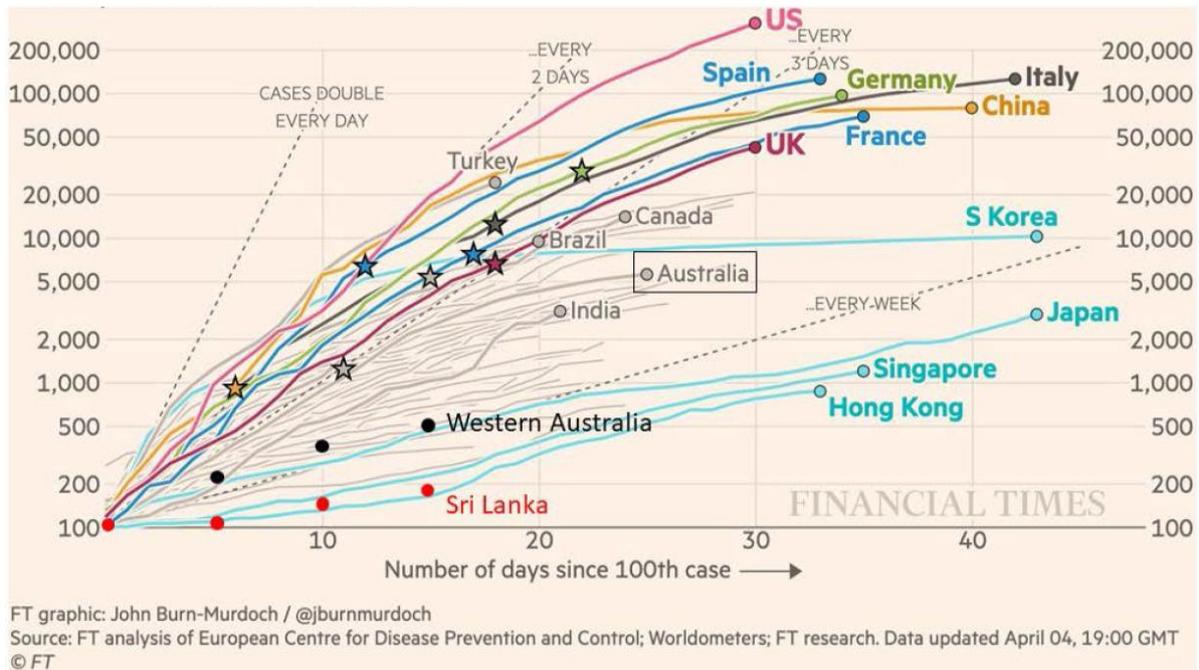


Рис. 1. Распространение числа людей, заболевших коронавирусом
(источник: газета Financial Times за 5 апреля 2020 года)

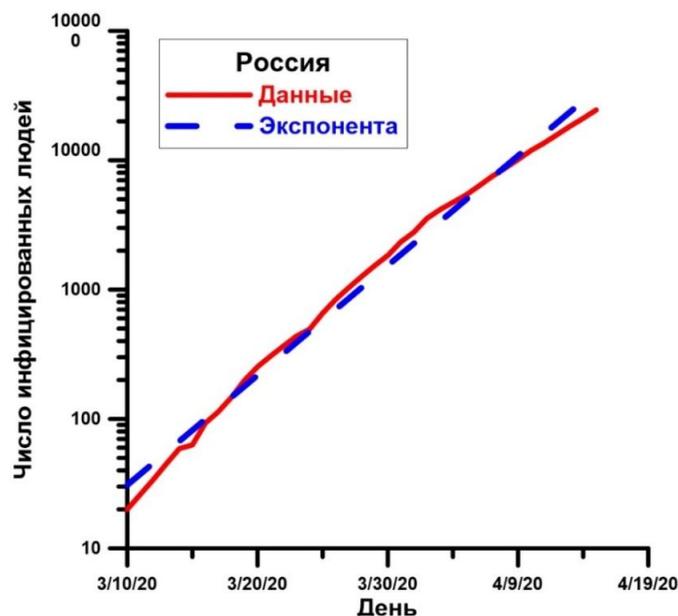


Рис. 2. Данные о числе заболевших людей в России за март-апрель 2020 г.
(взяты из сводки, обновляемой каждый день на сайте Газета.ru)

Логистическая модель Ферхюльста

Одна из распространенных математических моделей для описания динамики народонаселения и распространения эпидемий основана на логистическом уравнении (обыкновенном дифференциальном уравнении первого порядка), предложенном бельгийским математиком Пьером Ферхюльстом [10] (1):

$$\frac{dN}{dt} = rN \left(1 - \frac{N}{N_{\infty}} \right), \quad (1)$$

где $N(t)$ – число заболевших людей при эпидемии, N_{∞} – максимально возможное число заболевших людей и r – скорость роста эпидемии (частота заболеваемости). Математически, это уравнение очень хорошо исследовано [11 – 13]. Его решение тривиально находится в виде (2):

$$N(t) = \frac{N_0 N_{\infty} \exp(rt)}{N_{\infty} + N_0 [\exp(rt) - 1]}, \quad (2)$$

где N_0 – начальное число заболевших людей и t – время, отсчитываемое от начала эпидемии.

На рис. 3 показан рост числа заболевших со временем, если в начальный момент времени зараженными является 0,1 % от числа могущего переболеть населения (красная сплошная линия), 1 % населения (синяя штриховая линия) и 10 % населения (коричневая штрихпунктирная линия). Ясно видно, что с увеличением количества изначально зараженных людей эпидемия распространяется быстрее и быстрее. На начальном этапе $N_0/N_{\infty} \ll 1$ кривая (2) трансформируется в экспоненту (3):

$$N(t) = N_0 \exp(rt). \quad (3)$$

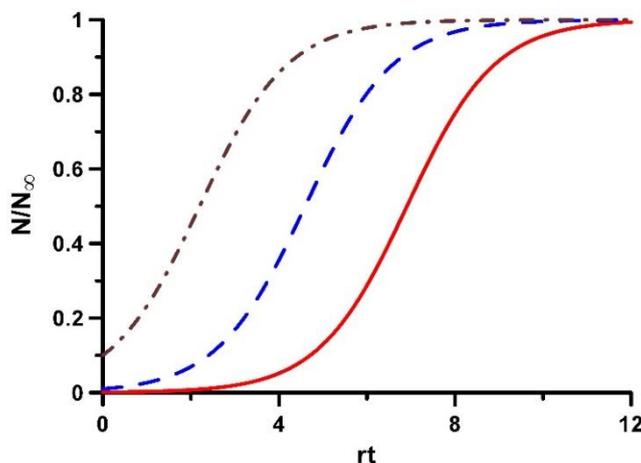


Рис. 3. Рост числа заболевших от времени, если в начальный момент времени зараженными является 0,1 % населения (сплошная линия), 1 % населения (штриховая линия) и 10 % населения (штрихпунктирная линия)

Данная модель содержит две константы N_{∞} и r , которые, вообще говоря, неизвестны для эпидемии, вызванной вирусом нового типа. Вирусологи, проводя опыты и анализируя прежние данные, могут определять эти коэффициенты весьма грубо. На начальном этапе развития эпидемии, используя ежедневные данные о количестве заболевших людей, можно из (3) оценить N_0 и r уже весьма точно. Однако важную характеристику максимального числа заболевших людей N_{∞} и продолжительность эпидемии в этот период найти невозможно. Именно поэтому оценки общего количества заболевших людей и продолжительности эпидемии так разнятся в различных источниках. Здесь могут помочь сопоставление графиков развития эпидемии в разных странах, представленных на рис. 1; для стран с одинаковыми обычаями нормированные кривые близки между собой. Наконец, важно отметить роль административных мер в уменьшении эпидемии. Так, закрытие границ стран или территориальных

образований позволяет уменьшить начальное число инфицированных больных N_0 , а самоизоляция (карантин) – скорость роста эпидемии r , что «растягивает» продолжительность эпидемии и дает возможность врачам помочь заболевшим.

Для подготовки медицинских учреждений к работе во время эпидемии важно знать количество заболевших в сутки, что легко находится дифференцированием (2).

$$\frac{dN}{dt} = \frac{N_0 N_\infty (N_\infty - N_0) r \exp(rt)}{(N_\infty + N_0 [\exp(rt) - 1])^2}, \quad (4)$$

и это кривая немонотонна (рис. 4) с максимумом (5):

$$\max\left(\frac{dN}{dt}\right) = \frac{rN_\infty}{4}, \quad (5)$$

который приходится на время (пик эпидемии)

$$T = \frac{1}{r} \ln \frac{N_\infty - N_0}{N_0} \quad (6)$$

Уравнение (4) даже более важно, чем исходное уравнение (1), так как, зная параметры логистической кривой, можно рассчитать время наступления пика эпидемии и количество необходимых коек в больницах.

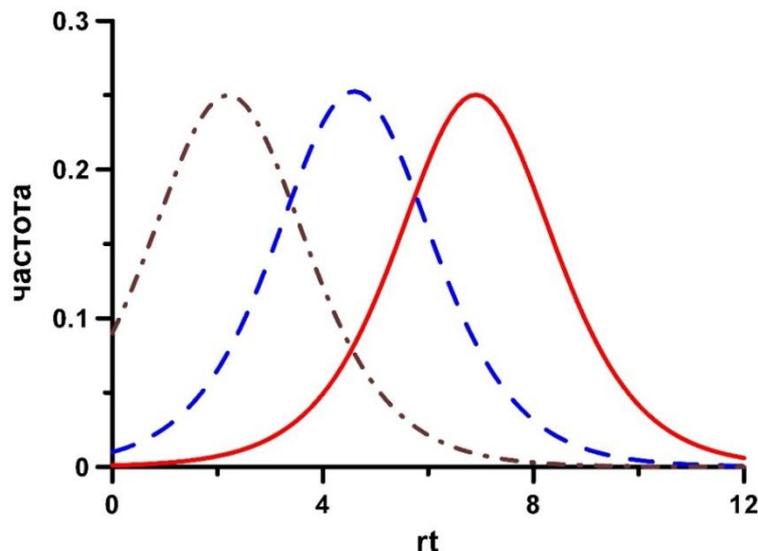


Рис. 4. Зависимость количества заболевших людей в сутки – безразмерная частота $d(N/N_\infty)/(r dt)$.

Кривые соответствуют разному числу начальных инфицированных людей: 0,1 % населения (сплошная линия), 1 % населения (штриховая линия) и 10 % населения (штрихпунктирная линия)

Обобщенная логистическая модель

На рис. 1 и 2 видны также кривые, которые на начальном этапе отличаются от экспоненты. Это означает, что принятие определенных мер по недопущению распространения эпидемии, влияет не только на параметры распределения логистической кривой, но и меняют ее саму, так что уравнение (1) должно быть модифицировано. Естественным обобщением логистического уравнения является уравнение [14, 15] (7):

$$\frac{dN}{dt} = rN^\alpha \left(1 - \frac{N}{N_\infty}\right)^\beta, \quad (7)$$

в котором добавляются два новых положительных параметра: α и β . Увеличение числа параметров, естественно, позволяет более точно описать кривую распространения эпидемии,

но с другой стороны, требует данных за более продолжительный отрезок времени, что не способствует заблаговременному прогнозу. Переходя к безразмерным переменным (8),

$$y = \frac{N}{N_\infty}, \dots x = rN_\infty^{\alpha-1}t, \quad (8)$$

запишем уравнение (7) в виде (9):

$$\frac{dy}{dx} = y^\alpha(1-y)^\beta, \quad (9)$$

что позволяет изучить влияние показателей степеней на характер решений в чистом виде.

В общем случае при $\alpha \neq 1$ решение уравнения (9) записывается через гипергеометрическую функцию [16] (10):

$$y^{1-\alpha} {}_2F_1(1-\alpha, \beta; 2-\alpha; y) = x. \quad (10)$$

Работать с гипергеометрическими функциями достаточно сложно, поэтому сначала рассмотрим начальную стадию развития эпидемии, когда уравнение (9) преобразуется в (11):

$$\frac{dy}{dx} = y^\alpha. \quad (11)$$

Решение уравнения (12) находится тривиально (12):

$$y = \begin{cases} \left(\frac{x}{1-\alpha}\right)^{\frac{1}{1-\alpha}}, & 0 < \alpha < 1, \\ \exp(x), & \alpha = 1, \\ \left(\frac{\alpha-1}{x_0-x}\right)^{\frac{1}{\alpha-1}}, & \alpha > 1 \end{cases} \quad (12)$$

и оно представлено на рис. 5. Здесь x_0 – константа, определяющая начальное значение числа заболевших. Как видно из рис. 5, число инфицированных людей быстро вырастает при $\alpha < 1$, при $\alpha > 1$ сравнительно долго число зараженных людей остается почти неизменным, а затем в течение короткого времени (взрывным образом) неограниченно возрастает.

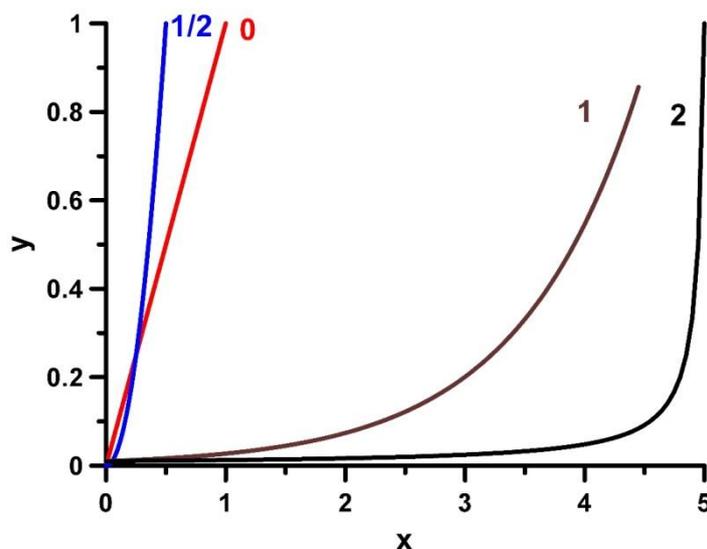


Рис. 5. Графики распространения эпидемии в рамках уравнения (12)
(цифры – значения константы α)

Полученное решение (12) справедливо для начальной стадии развития эпидемии. Аналогичную асимптотику можно получить для конечной стадии ($x \rightarrow \infty$).

$$1 - y = \begin{cases} \exp(-x), & \beta = 1, \\ \left(\frac{\beta - 1}{x}\right)^{\frac{1}{\beta - 1}}, & \beta > 1. \end{cases} \quad (13)$$

В случае же $0 < \beta < 1$ вся эпидемия занимает конечное время, и асимптотика числа заболевших есть (14):

$$1 - y = [(1 - \beta)(x_0 - x)]^{\frac{1}{1 - \beta}}. \quad (14)$$

Разумеется, для практики нет большой разницы между конечной и бесконечной продолжительностью эпидемии; эпидемия считается законченной, когда число заболевших практически перестает меняться.

О влиянии величин показателей степени в (9) можно судить по величине скорости распространения эпидемии (15):

$$\frac{dy}{dx} = F(y) = y^\alpha (1 - y)^\beta. \quad (15)$$

График функции $F(y)$ показан на рис. 6. Видно, что величины показателей степени влияют как на величину скорости распространения эпидемии, так и на пиковое значение числа заболевших. Эти пиковые характеристики можно рассчитать аналитически (16)-(17):

$$\max F(y) = \frac{\alpha^\alpha \beta^\beta}{(\alpha + \beta)^{\alpha + \beta}}, \quad (16)$$

$$y_{peak} = \frac{\beta}{\alpha + \beta}. \quad (17)$$

Формулы (16)-(17) позволяют рассчитать характеристики пика эпидемии для известных степеней обобщенной логистической кривой, и главная трудность здесь в «плохом» определении этих величин на начальной стадии развития эпидемии.

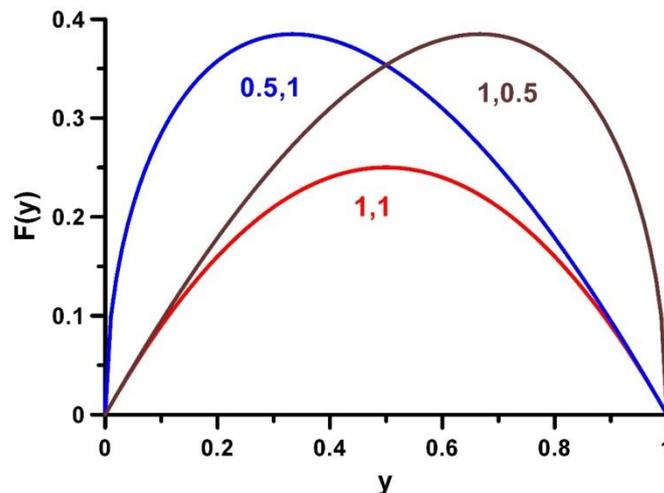


Рис. 6. Скорость распространения эпидемии в рамках уравнения (9)
(цифры у кривых – величины α, β)

Модели с запаздыванием

Как известно, между попаданием вируса в организм человека и его заболеванием проходит определенное время (инкубационный период), что влияет на скорость распространения эпидемии. Этот эффект учитывается в логистическом уравнении введением времени запаздывания T в частоту заболевания [17]:

$$\frac{dN}{dt} = rN \left(1 - \frac{N(t-T)}{N_\infty} \right), \quad (18)$$

или

$$\frac{dN}{dt} = rN(t-T) \left(1 - \frac{N}{N_\infty} \right). \quad (19)$$

Эти уравнения являются дифференциально-разностными, и они изучаются во многих работах [18, 19]. Здесь мы исследуем только начальную стадию развития эпидемии, когда можно ограничиться линейным приближением и свести уравнение (19) к виду (20):

$$\frac{dN}{dt} = rN(t-T). \quad (20)$$

Решение линейного уравнения естественно искать в виде $\exp(\lambda r t)$, что приводит к характеристическому уравнению (21):

$$rT = -\frac{\ln \lambda}{\lambda}. \quad (21)$$

С увеличением времени задержки (продолжительности инкубационного периода) величина характеристического показателя падает (рис. 7) и, следовательно, скорость распространения эпидемии уменьшается. Аналитически, рост числа заболевших описывается экспоненциальной функцией (22):

$$N(t) = N_0 \exp[\lambda r (t - T)], \quad t > T. \quad (22)$$

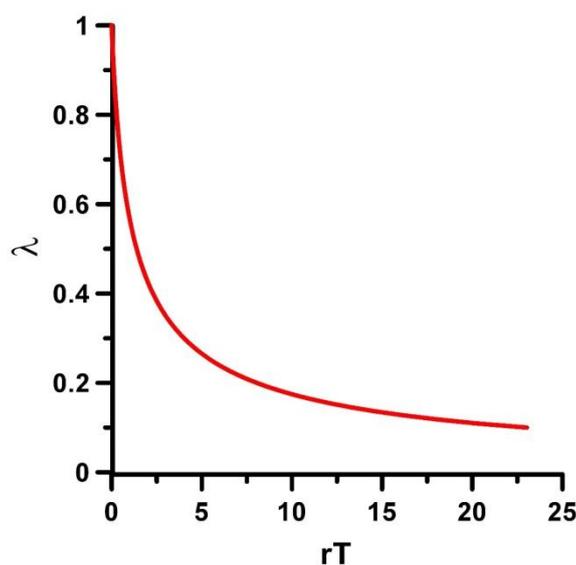


Рис. 7. Зависимость характеристического показателя от продолжительности инкубационного периода

В окрестности насыщения число заболевших людей меняется слабо, поэтому процесс, описываемый решением уравнений (18) и (20), происходит по тому же сценарию, что и при нулевой продолжительности инкубационного периода.

Отметим, что на начальном этапе развития эпидемии из анализа статистических данных удастся определить степень роста $r\lambda$, но не по отдельности каждой из этих величин. Однако продолжительность инкубационного периода медики определяют довольно быстро по клиническим данным, так что возникает возможность независимого определения двух параметров, что важно для прогнозирования пика эпидемии.

Для прогнозирования эпидемии необходимо учитывать также, что из числа инфицированных людей исключаются умершие. Поэтому в работе [20] в уравнении (20), точнее его разностного аналога, на каждом шаге подправляется численность заболевших (23):

$$y'_{i+1} = y_{i+1} - py_{i-d} - (1-p)y_{i-h}, \quad (23)$$

где учитывается, что после $h \sim 14$ дней большинство больных выздоравливает, а после примерно $d \sim 21$ дней часть инфекционных больных ($p \sim 0.04$) умрет.

Учитывая, что в эпидемии принимают участие вирусы нескольких типов, в уравнении типа (18) могут добавляться члены с разным временем запаздывания. Например, в работе [21] анализируется следующее уравнение (24):

$$\frac{dN}{dt} = rN \left(1 - \frac{q_1 N(t-T_1) + q_2 N(t-T_2)}{N_\infty} \right), \quad (24)$$

и динамика величины N становится более сложной с возможностью возникновения нескольких пиков.

Заключение

Рассмотрены модели распространения эпидемии, основанные на логистическом уравнении и его обобщениях. Во всех этих случаях решается обыкновенное дифференциальное уравнение первого порядка или дифференциально-разностное уравнение того же порядка. Основная проблема в использовании этих уравнений связана с определением коэффициентов этих уравнений, которые зависят как от природы вирусов, так и скученности населения; они различны для разных эпидемий в разных странах.

Учитывая, что во время эпидемии происходят различные процессы: (заболеваемость, выздоровление и умирание) существуют более сложные математические модели, среди которых наиболее популярна так называемая SIR модель и ее модификации [11, 22-26].

Наряду с представленными, развиваются и модели, основанные на уравнениях в частных производных. Так, в работах [27, 28] используется уравнение в частных производных первого порядка для функции двух переменных: времени и возраста. Более распространены диффузионные модели, учитывающие пространственное распределение эпидемий [29].

Представленные результаты получены при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации по государственной поддержке научных исследований ведущих научных школ Российской Федерации НШ-2485.2020.5 и при поддержке Лаборатории динамических систем и приложений НИУ ВШЭ (грант Министерства науки и высшего образования РФ соглашение № 075-15-2019-1931).

Библиографический список

1. **Linton, N.M.** Incubation period and other epidemiological characteristics of 2019 novel coronavirus infections with right truncation: a statistical analysis of publicly available case data / N.M. Linton, T. Kobayashi, Y. Yang, K. Hayashi, A.R. Akhmetzhanov, S.-M. Jung, B. Yuan, R. Kinoshita, H. Nishiura // Journal of Clinical Medicine. – 2020. – V. 9(2). – P. 538.
2. **Wu, D.** The SARS-CoV-2 outbreak: what we know / D. Wu, T. Wu, Q. Liu, Zh. Yang // Int. Journal of Infectious Diseases (in print). 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2020.03.004>.
3. **Xie, M.** Insight into 2019 novel coronavirus – an updated interim review and lessons from SARS-CoV and MERS-CoV / M. Xie, Q. Chen // Int. Journal of Infectious Diseases (in print). 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2020.03.071>.
4. **Chang, Sh.L.** Modelling transmission and control of the COVID-19 pandemic in Australia / Sh.L. Chang, N. Harding, C. Zachreson, O.M. Cliff, M. Prokopenko // arXiv:2003.10218 [q-bio.PE]. 2020.
5. **Crokidakis, N.** Data analysis and modeling of the evolution of COVID-19 in Brazi / N. Crokidakis // arXiv:2003.12150 [q-bio.PE]. 2020.
6. **Luca, Dell'A.** Solvable delay model for epidemic spreading: the case of Covid-19 in Italy / Dell'A. Luca // arXiv:2003.13571v1[q-bio.PE]. 2020.

7. **Medo, M.** Epidemic spreading on spatial networks with distance-dependent connectivity / M. Medo // arXiv:2003.13160v1 [physics.soc-ph]. 2020.
8. **Sonnino G.** Dynamics of the COVID-19 Comparison between the theoretical predictions and real data / G. Sonnino // arXiv:2003.13540v1 [q-bio.PE]. 2020.
9. **Wu, K.** Generalized logistic growth modeling of the COVID-19 outbreak in 29 provinces in China and in the rest of the world / K. Wu, D. Darcet, Q. Wang, D. Sornette // arXiv preprint arXiv:2003.05681. 2020.
10. **Verhulst, P.F.** Notice sur la loi que la population poursuit dans son accroissement / P.F. Verhulst // Correspondance Mathematique et Physique, 1838, V. 10. – P. 113-121.
11. **Амелькин, В.В.** Дифференциальные уравнения в приложениях / В.В. Амелькин. – М.: Наука, 1987. – 153 с.
12. **Арнольд, В.А.** Теория катастроф / В.А. Арнольд. – М., Наука, 1990. – 128 с.
13. **Tsoularis, A.** Analysis of logistic growth models / A. Tsoularis, J. Wallace // Mathematical Biosciences. 2002. V. 179. No. 1. P. 21-55.
14. **Blumberg, A.A.** Logistic growth rate functions / A.A. Blumberg // Journal of Theoretical Biology. 1968. V. 21. – P. 42-44.
15. **Brilhante, M.F.** Modeling risk of extreme events in generalized Verhulst models / M.F. Brilhante, M.I. Gomes, D. Pestana // Statistical Journal. – 2019. – V. 17. – №. 2. – P. 145-162.
16. **Градштейн, И.С.** Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И.С. Градштейн, И.М. Рыжик. – М.: Физматлит, 1963. – 1100 с.
17. **Wright, E.M.** A non-linear difference-differential equation / E.M. Wright // Journal fur die reine und angewandte Mathematik. 1955. V. 194. – P. 66-87.
18. **Kaschenko, S.A.** About global stable of solutions of logistic equation with delay / S.A. Kaschenko, D.O. Loginov // Journal of Physics: Conf. Series. – 2017. – V. 937. Art. No. 012019. DOI:10.1088/1742-6596/937/1/012019.
19. **Branhelyi, B.** Global attractivity of the zero solution for Wright's equation / B. Branhelyi, T. Csendes, T. Krisztin, A. Neumaier // SIAM Journal on Applied Dynamical Systems. – 2014. – V. 13. – №. 1. – P. 537-563.
20. **Perc, M.** Forecasting COVID-19 / M. Perc, N. Gorišek Miksic', M. Slavinec, A. Stožer // Frontiers in Physics. – 2020. – V. 8. – P. 127. DOI: 10.3389/fphy.2020.00127.
21. **Кащенко, И.С.** Динамика уравнения с двумя запаздываниями, моделирующего численность популяции / И.С. Кащенко, С.А. Кащенко // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 2019. – Т. 27. – № 2. – С. 21-38.
22. **Шабунин, А.Б.** SIRS-модель распространения инфекций с динамическим регулированием численности популяции: исследование методом вероятностных клеточных автоматов / А.Б. Шабунин // Известия ВУЗов Прикладная нелинейная динамика. – 2019. – Т. 27. – № 2. – С. 5-20.
23. **Gray, A.** A stochastic differential equation sis epidemic model / A. Gray, D. Greenhalgh, L. Hu, X. Mao, J. Pan // SIAM J. Appl. Math. – 2011. – V. 71. – №. 3. – P. 876-902.
24. **Dieu, N.T.** Classification of asymptotic behavior in a stochastic SIR model / N.T. Dieu, D.H. Nguyen, N.H. Du, G. Yin // SIAM J. Applied dynamical systems. – 2016. – V. 15. – №. 2. – P. 1062-1084.
25. **Choi, S.-H.** A multi-stage sir model for rumor spreading / S.-H. Choi, H. Seo // Discrete and continuous dynamical systems series B. – 2020. – V. 25. – №. 6. – P. 2351-2372.
26. **Maier, B.F.** Effective containment explains subexponential growth in recent confirmed COVID-19 cases in China / B.F. Maier, D. Brockmann // Science. – 2020. DOI: 10.1126/science.abb4557.
27. **Gurtin, M.** Nonlinear age-dependent population dynamics / M. Gurtin, R. MacCamy // Arch. Ration. Mech. Anal. – 1974. – V. 54. – P. 281-300.
28. **Magpantay, F.M.G.** An age-structured population model with state-dependent delay: dynamics / F.M.G. Magpantay, N. Kosovalic // IFAC-PapersOnLine. – 2015. – V. 48. – №. 12. – P. 99-104.
29. **Balcan D., Goncalves B., Hu H., Ramasco J.J., Colizza V., Vespignani A.** Modeling the spatial spread of infectious diseases: The global epidemic and mobility computational model / **D. Balcan, B. Goncalves, H. Hu, J.J. Ramasco, V. Colizza, A. Vespignani** // Journal of Computational Science. – 2010. – V. 1. – №. 3. – P. 132-145.

Дата поступления
в редакцию: 15.04.2020

A.A. Kurkin¹, O.E. Kurkina¹, E.N. Pelinovsky¹⁻³

LOGISTIC MODELS OF EPIDEMIC GROWTH

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev¹
National Research University – Higher School of Economics²
Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences³

Purpose: It is very important to know the possibility of mathematical models to forecast epidemic spreading including characteristics of the epidemic peak.

Design/methodology/approach: Three different mathematical models are applied to analyze the epidemic spreading. There are: 1) the Verhulst logistic equation, 2) generalized logistic equation, and 3) differential – difference equation.

Results: Analytical solutions of the logistic-like equations are used to analyze the epidemic spreading, and their characteristics. The important question to determine the coefficients of the mathematical models using the data of infected patients on the initial stage is discussed.

Area of applicability: The obtained results may be useful for the forecasting of the epidemic characteristics, including COVID-19.

Key words: ordinary differential equations, logistic equation, epidemic modelling

УДК 004.896, 62.50

А.В. Доценко¹, А.И. Дивеев^{1,2}**РАЗРЕШЕНИЕ КОЛЛИЗИЙ В ЗАДАЧЕ ГРУППОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ С ИЗМЕНЕНИЕМ НАБОРА АРГУМЕНТОВ
ФУНКЦИИ УПРАВЛЕНИЯ**Российский университет дружбы народов¹
Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН²

Рассматривается децентрализованный подход разрешения столкновений при групповом взаимодействии гусеничных мобильных роботов. Для каждого из них предусматривается отдельный аппроксиматор функции управления, осуществляющий поиск как в пространстве функций, так и в пространстве параметров. Предполагается, что роботы значительным образом ограничены в предоставляемой им информации о среде, а также о состоянии динамических и статических фазовых ограничений в каждый момент времени: можно обмениваться информацией о текущем состоянии с другими роботами, если те находятся в области видимости, задаваемой окружностью. Специфической чертой является наличие для функции управления робота возможности расширить набор аргументов, если в области видимости рассматриваемого робота появились другие, и сократить набор аргументов – если соседние роботы покинули его область видимости. Приведен вычислительный эксперимент, в котором для поиска функций управления использовался модифицированный метод сетевого оператора. Исходя из результатов эксперимента по перестроению группы, найденная для каждого робота функция управления доставила свой объект управления в терминальное состояние, позволив каждому роботу полностью избежать столкновений с другими роботами.

Ключевые слова: синтез системы управления, метод сетевого оператора, управление группой роботов, генетический алгоритм.

Введение

Задача разрешения коллизий не имеет унифицированной математической постановки в силу широкого набора технических решений, а также требований к входным данным. В рамках проводимых в данной области исследований сформировалась определенная иерархия подходов. В ряде работ рассматривается избегание столкновений благодаря планированию траекторий [1, 2]. Данная парадигма делится на два класса: сопряженный, где в целях избегания коллизий зачастую используется диаграмма координации [3, 4], и несвязный, который, в свою очередь, подразделяется на централизованный [5, 6] и децентрализованный [7]. Несвязное планирование также можно разделить на две категории:

- а) координирование путей [8-11];
- б) приоритетное планирование [12-14].

В настоящем исследовании акцент делается на задаче избегания коллизий при перестроении группы роботов в контексте постановки задачи синтеза системы управления [16]. Метод сетевого оператора [17, 18] был разработан специально для решения задачи синтеза системы управления. В отличие от других методов символьной регрессии (генетического программирования [19], грамматической эволюции [20], аналитического программирования [21] и недавно появившегося метода матриц разбора [22]), метод сетевого оператора производит поиск не только в пространстве функций, но и по параметрам, благодаря чему становится схожим с нейронными сетями. В экспериментальной части задействована модификация метода сетевого оператора [23], написанная на языке программирования Python.

Постановка задачи

Пусть задана некоторая система ОДУ, задающая динамику мобильных роботов (1):

$$\begin{cases} \dot{x}^i = \frac{(u_1^i + u_2^i) \cos(\theta^i)}{2} \\ \dot{y}^i = \frac{(u_1^i + u_2^i) \sin(\theta^i)}{2}, \\ \dot{\theta}^i = \frac{(u_1^i - u_2^i)}{2} \end{cases}, \quad (1)$$

где n – количество роботов, $\mathbf{u}^i \in U \subseteq \mathfrak{R}^m$, U – ограниченное замкнутое множество, $i = 1, \dots, n$.

При наложенных на управление ограничениях (2):

$$\mathbf{u}^i = [u_1^i, u_2^i] \in [-20.0, 20.0], \quad (2)$$

т.е. ограничение скорости до 1 см/с.

Пусть задано максимальное время моделирования t^+ , начальные условия

$$x_i(0) = x_i^0, y_i(0) = y_i^0, \theta_i(0) = \theta_i^0, \quad (3)$$

и терминальные условия (4):

$$x_i(t_f), y_i(t_f), \theta_i(t_f), \quad (4)$$

где t_f – время симуляции, $x_i^0, y_i^0, \theta_i^0 \in X_0 \subseteq \mathfrak{R}^n, i = 1, \dots, n$.

Условия отсутствия столкновения роботов записываем в виде динамических фазовых ограничений (5):

$$D_c = R_c - \sqrt{(x_i - x_{j \neq i})^2 + (y_i - y_{j \neq i})^2} \leq 0, \quad (5)$$

где R_c – радиус, задающий габариты робота (радиус столкновения), где i – индекс рассматриваемого робота, j – индекс ближайшего робота,

$$j = \arg \min \left\{ \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \right\}, i, j = 1, \dots, n, j \neq i.$$

Функционал качества задан в следующем виде (6):

$$J = t_f + \sum_{i=1}^n \sqrt{d_1^2 + d_2^2} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \int_0^{t_f} D_c dt \rightarrow \min, \quad (6)$$

где

$$d_1 = x_{i,f} - x_i,$$

$$d_2 = y_{i,f} - y_i,$$

$$d_3 = x_i - x_{j \neq i},$$

$$d_4 = y_i - y_{j \neq i},$$

$$t_f = \begin{cases} t, \text{ если } t < t^+ \text{ и } \sum_{i=1}^n \sqrt{d_1^2 + d_2^2} < \varepsilon \\ t^+ + \sum_{i=1}^n \sqrt{d_1^2 + d_2^2} - \text{иначе} \end{cases}.$$

Наконец, искомые управления представлены как функции, зависящие от состояния (7):

$$\dot{\mathbf{s}}^i = \mathbf{f}(\mathbf{s}^i, \mathbf{h}^i(\mathbf{s}^i)). \quad (7)$$

Целью является нахождение для каждого робота, описываемого системой (1), такой функции управления (7), удовлетворяющей условию оптимальности (6) для всех возможных начальных состояний (3), чтобы достиглось терминальное состояние (4) при наложенных ограничениях на управления (2) и динамических фазовых ограничениях (5).

Изменение правых частей дифференциальных уравнений

Специально для задачи разрешения коллизий в данной статье представлена модификация метода. Главной модификацией является ситуативное внедрение относительных координат двух ближайших роботов в правые части ОДУ. Таким образом, поиск оптимальной функции управления для взаимодействия соседних агентов встроено в процесс поиска оптимальной функции управления для достижения терминальных условий. Иными словами, на некотором шаге интегрирования агент определяет, входит ли ближайший к нему соседний агент в область взаимодействия. Если соседний робот находится достаточно близко, то относительные координаты этих двух агентов включаются в правые части ОДУ первого агента, а также второго, если они оба являются друг для друга ближайшими соседями.

Из этого следует необходимость введения гиперпараметра, благодаря которому определяется необходимость расширения вектора аргументов функции управления. Нельзя дать точный ответ на вопрос – какое значение должен принимать этот гиперпараметр. Можно лишь утверждать, что он, в первую очередь, зависит от технического оснащения агента, а также от среды и размера объекта. Также следует отметить, что параметр может изменяться в ходе работы алгоритма. Его поиск можно осуществлять наряду с аргументами и параметрами искомой функции, однако в этой работе было решено ограничиться фиксированным значением.

Будем считать, что если выполняется условие $D_i = R_i - \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} > 0$, где R_i – радиус видимости робота (радиус взаимодействия), где i – индекс рассматриваемого робота, j – индекс ближайшего робота, $j = \arg \min \left\{ \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \right\}, i, j = 1, \dots, n, j \neq i$, то два робота вступают во взаимодействие.

Далее, в случае, если ближайший робот находится во взаимодействии с рассматриваемым роботом, осуществляется шаг интегрирования с расширенным вектором аргументов, иначе – в качестве аргумента остается собственный вектор состояния (8).

$$\mathbf{u}^i = \begin{cases} \mathbf{h}^i(\mathbf{s}^i, \mathbf{s}^k), & \text{если } D_i > 0 \\ \mathbf{h}^i(\mathbf{s}^i) - \text{иначе.} \end{cases} \quad (8)$$

Вычислительный эксперимент

В вычислительном эксперименте демонстрируется перестроение группы из восемнадцати мобильных роботов. Начальное расположение группы можно видеть на рис. 2. Желаемые и фактические терминальные состояния роботов изображены на рис. 3. В качестве оптимизатора использовался модифицированный метод сетевого оператора [23], реализованный на языке программирования Python. В процессе моделирования использовались следующие значения гиперпараметров: время моделирования, $t = 3$, шаг интегрирования, $dt = 0.03$, радиус взаимодействия, $R_i = 4$, радиус коллизии, или габарит, $R_c = 1$. Гиперпараметры сетевого оператора следующие: количество индивидов в популяции, $P = 6000$, количество поколений, $G = 100$, минимальное значение параметров, $q_{\min} = -20$, максимальное значение параметров, $q_{\max} = 20$, число вариаций, $l = 8$, количество скрещиваний, $R = 256$, количество потомков, $C = 8$.

Для отображения расположения роботов на плоскости используется график с черными точками, где каждая отдельная точка отображает состояние определенного робота в некий момент времени. Для отслеживания динамики на каждом шаге интегрирования сохранялось состояние всех роботов в виде черных точек. В данной статье представлены самые информативные с точки зрения избегания коллизий, а также достижения терминальных состояний, графики из коллекции. Исходя из рис. 3, можно сделать вывод, что роботы успешно перегруппировались, заняв желаемые терминальные состояния в пределах заданной в ходе моделирования точности.

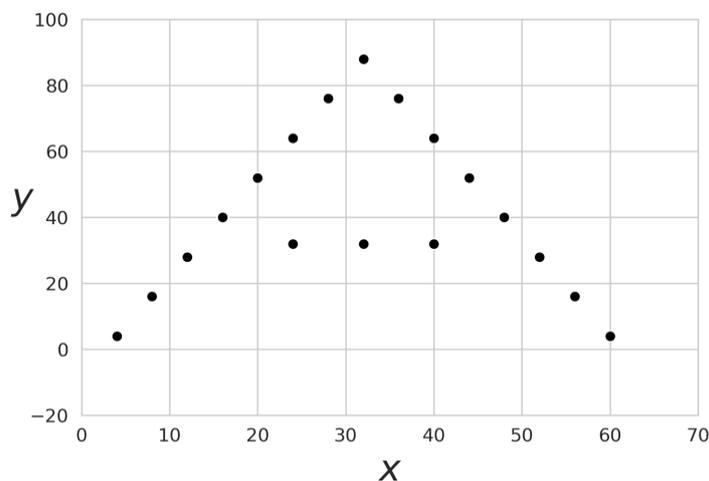


Рис. 2. Начальное расположение группы роботов

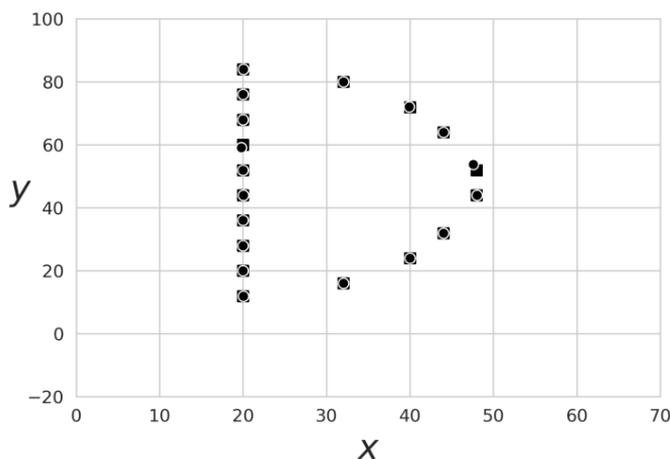


Рис. 3. Желаемое расположение роботов (квадраты) и фактическое (точки)

Чтобы продемонстрировать процесс взаимодействия двух ближайших роботов с изменением набора аргументов функции управления, был выбран момент времени, в который было зафиксировано резкое уклонение от столкновения. Стоит отметить, что это всего лишь один из нескольких зафиксированных случаев избегания столкновений между роботами в ходе данного перестроения. Ради наглядности в этой работе использовалась ситуация с самой резкой реакцией роботов.

Сопоставляя рис. 4 и рис. 5, можно увидеть взаимодействие двух роботов, отмеченное черным овалом.

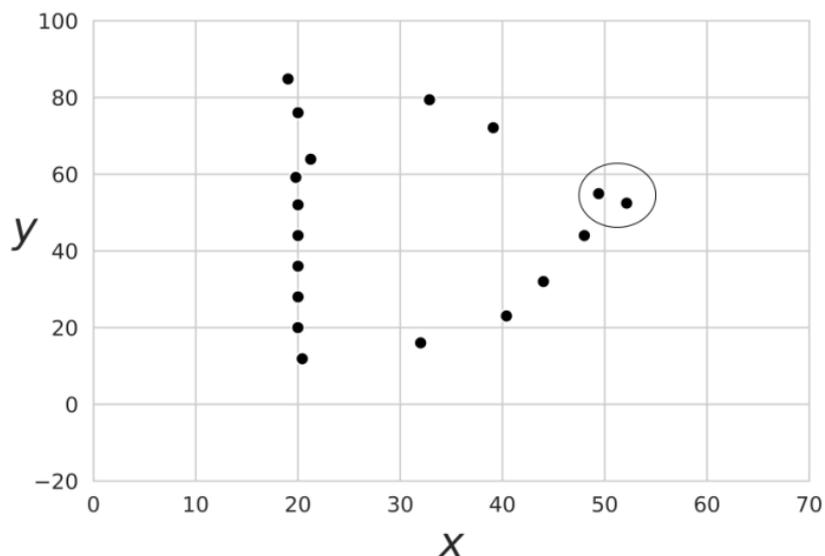


Рис. 4. Взаимодействие роботов в некоторый момент времени

На рис. 4, в ситуации, когда почти все роботы заняли свои терминальные состояния, два робота внутри овала сближаются, причем один из них находится достаточно далеко от своего терминального состояния.

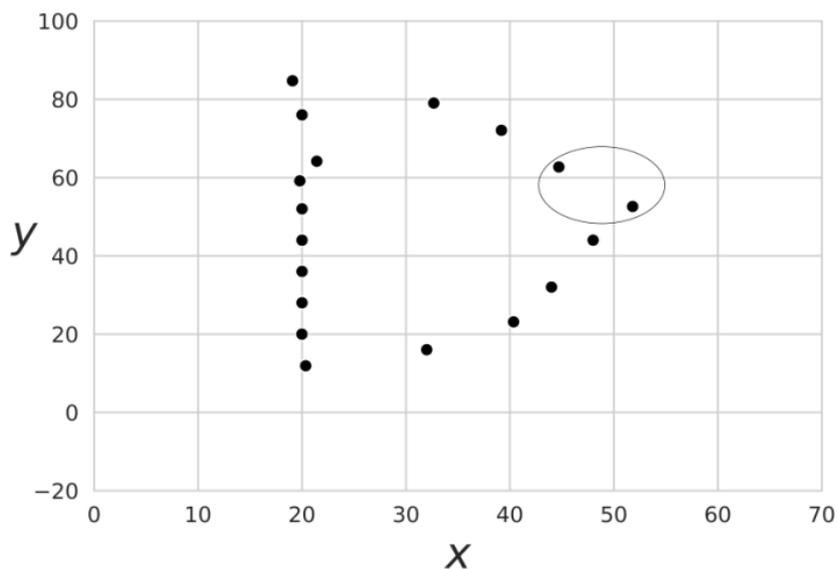


Рис. 5. Взаимодействие роботов в последующий момент времени

Далее, на рис. 5 изображен следующий момент времени, когда один из роботов отстраняется от другого в направлении терминального состояния, посредством включения относительных координат соседа в свою функцию управления. Обратим внимание, что на рис. 3 роботы, достигшие своих терминальных состояний, не находятся во взаимодействии. Однако роботы, достигшие терминальных состояний, все равно прекратят движение, даже если они продолжают находиться во взаимодействии.

Сетевой оператор робота с самым большим значением по оси ординат на рис. 2 будет иметь следующий вид:

$$R = [[(0,0), (6,0), (0,2), (12,3)],$$

$$[(1,0), (7,0), (13,1)],$$

$$[(2,0), (8,0), (14,1)],$$

$$[(3,0), (9,0), (15,1)],$$

$$[(4,0), (10,0), (16,1)],$$

$$[(5,0), (11,1), (2,12), (2,12), (17,1)],$$

$$[(12,0), (13,0), (14,0), (15,0), (16,0), (17,0), (6,7), (18,0)],$$

$$[(12,0), (13,0), (14,0), (15,0), (16,0), (17,0), (5,5), (5,5), (5,5), (5,5), (19,0)]]].$$

Полученная структура является несокращенной, о чем свидетельствует, например, наличие в последней строке унарной операции под номером 5 четыре раза. Его вектор параметров имеет следующие значения: $p = [1.00, 1.00, 2.05, 18.56, -16.50, -17.21]$.

Унарные и бинарные операции, используемые в ходе поиска оптимальных функций управления, приведены в табл. 1 и табл. 2 соответственно.

Таблица 1

Множество унарных операций

Номер операции	Операция
0	$f(x) = x$
1	$f(x) = -x$
2	$f(x) = x^2$
3	$f(x) = \sin(x)$
4	$f(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x \geq 0 \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases}$
5	$f(x) = \cos(x)$
6	$f(x) = \arctan(x)$
7	$f(x) = e^x$
8	$f(x) = \ln x$
9	$f(x) = \operatorname{sgn}(x)\sqrt{ x }$
10	$f(x) = x^3$
11	$f(x) = x^{-1}$
12	$f(x) = \sqrt[3]{x}$
13	$f(x) = e^x - 1$
14	$f(x) = 2^x$
15	$f(x) = \operatorname{sgn}(x)$
16	$f(x) = \lg x$
17	$f(x) = \log_2 x$
18	$f(x) = \ln(1 + x)$
19	$f(x) = x $
20	$f(x) = \tan x$
21	$f(x) = \tanh x$

Таблица 2

Множество бинарных операций

Номер операции	Операция
0	$f(x, y) = x + y$
1	$f(x, y) = xy$
2	$f(x, y) = \max(x, y)$
3	$f(x, y) = \min(x, y)$

Используя индексы входных и выходных узлов, можно перевести закодированную запись в математическое выражение. В случае самого верхнего (по оси ординат) на рис. 2 робота, получим следующие функции управления:

$$u_1 = \min(1, x - x^f) + (y - y^f) + 2.05(\theta - \theta^f) + 18.56(x - x_n) - 16.50(y - y_n) - 17.21(-\theta + \theta_n) + e^{(x-x^f)},$$

$$u_2 = \min(1, x - x^f) + (y - y^f) + 2.05(\theta - \theta^f) + 18.56(x - x_n) - 16.50(y - y_n) - 17.21(-\theta + \theta_n) + 4\cos(-17.21).$$

Отметим, что приведенные функции управления были сокращены вручную. Возможность сокращать полученные математические выражения автоматически является предметом исследования последующих работ по тематике методов символьной регрессии.

Заключение

Рассмотрена задача разрешения коллизий. Экспериментально подтверждено, что можно осуществлять поиск функций управления с ситуативным изменением набора аргументов этой функции. Найденные функции одновременно позволяют роботам избегать коллизии и попадать в терминальные состояния.

Избегание столкновений в постановке задачи синтеза системы управления представляется иной, выбивающейся из существующей иерархии методов группового взаимодействия, перспективой задачи при управлении группой роботов. Однако в данной работе осуществлялся поиск отдельной для каждого робота функции, что лишь подтверждает способность функций с переменным числом аргументов как доставлять объект управления в терминальное состояние, так и избегать столкновений с динамическими фазовыми ограничениями. В продолжение данной работы, в будущем планируется провести ряд экспериментов по синтезу функции управления с изменением правых частей дифференциальных уравнений для многочисленной группы роботов с использованием единого аппроксиматора.

Библиографический список

1. **Tian, J.** Dynamic collision avoidance path planning for mobile robot based on multi-sensor data fusion by support vector machine / J. Tian, M. Gao, E. Lu // 2007 international conference on mechatronics and automation. IEEE, 2007. – P. 2779-2783.
2. **Fujimori, A.** Adaptive navigation of mobile robots with obstacle avoidance / A. Fujimori, P.N. Nikiforuk, M.M. Gupta // IEEE Transactions on Robotics and Automation. – 1997. – Vol. 13. – N 4. – P. 596-601.
3. **Barraquand, J.** Robot motion planning: A distributed representation approach / J. Barraquand, J.C. Latombe // The International Journal of Robotics Research, 1991. – Vol. 10. – № 6. – P. 628-649.

4. **Sanchez, G.** Using a PRM planner to compare centralized and decoupled planning for multi-robot systems / G. Sanchez, J.C. Latombe // Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 02CH37292). IEEE, 2002. – Vol. 2. – P. 2112-2119.
5. **Oh, J.H.** Centralized decoupled path planning algorithm for multiple robots using the temporary goal configurations / J.H. Oh, J.H. Park, J.T. Lim // 2011 Third International Conference on Computational Intelligence, Modelling and Simulation. IEEE, 2011. – P. 206-209.
6. **Den Berg, J.** Centralized path planning for multiple robots: Optimal decoupling into sequential plans / J. Den Berg // Robotics: Science and systems, 2009. – Vol. 2. – № 2(5). – P. 2-3.
7. **Devasia, S.** Decoupled conflict-resolution procedures for decentralized air traffic control / S. Devasia // IEEE Transactions on intelligent transportation systems, 2011. – Vol. 12. – № 2. – P. 422-437.
8. **O'Donnell, P.A.** Deadlock-free and collision-free coordination of two robot manipulators / P.A. O'Donnell, T. Lozano-Pérez // ICRA, 1989. – Vol. 89. – P. 484-489.
9. **Griswold, N.C.** Control for mobile robots in the presence of moving objects / N.C. Griswold, J. Eem // IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1990. – Vol. 6. – № 2. – P. 263-268.
10. **Pan, T.J.** Motion planning for mobile robots in a dynamic environment with moving obstacles / T.J. Pan, R.C. Luo // Proceedings, IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 1990. – P. 578-583.
11. **Rude, M.** Collision avoidance by using space-time representations of motion processes / M. Rude // Autonomous Robots, 1997. – Vol. 4. – № 1. – P. 101-119.
12. **Erdmann, M.** On multiple moving objects / M. Erdmann, T. Lozano-Perez // Algorithmica, 1987. – Vol. 2. – № 1-4. – P. 477.
13. **Bennewitz, M.** Finding and optimizing solvable priority schemes for decoupled path planning techniques for teams of mobile robots / M. Bennewitz, W. Burgard, S. Thrun // Robotics and autonomous systems, 2002. – Vol. 41. – № 2-3. – P. 89-99.
14. **Clark, C.M.** Applying kinodynamic randomized motion planning with a dynamic priority system to multi-robot space systems / C.M. Clark, T. Bretl, S. Rock // Proceedings, IEEE Aerospace Conference. IEEE, 2002. – Vol. 7. – P. 7.
15. **Diveev, A.I.** Application of network operator method for synthesis of optimal structure and parameters of automatic control system / A.I. Diveev, E.A. Sofronova // IFAC Proceedings Volumes. 2008. – Vol. 41. – № 2. – P. 6106-6113.
16. **Diveev, A.I.** Self-adjusting control for multi robot team by the network operator method / A.I. Diveev, E.Y. Shmalko // 2015 European Control Conference (ECC). IEEE, 2015. – P. 709-714.
17. **Diveev, A.I.** Numerical method of network operator for multiobjective synthesis of optimal control system / A.I. Diveev, E.A. Sofronova // 2009 IEEE International Conference on Control and Automation. IEEE, 2009. – P. 701-708.
18. **Diveev, A.** The Network operator numerical method for solving the problem of control system synthesis with undefined initial conditions / A. Diveev // Izvestiya RAS Theory and control systems. 2012. – Vol. 2. – P. 63-78.
19. **Koza, J.R.** Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection / J.R. Koza, J.R. Koza // MIT press. – 1992. – Vol. 1.
20. **O'Neill, M.** Grammatical evolution / M. O'Neill, C. Ryan // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2001. – Vol. 5. – № 4. – P. 349-358.
21. **Zelinka, I.** Analytic programming by means of soma algorithm / I. Zelinka // Proceedings of the 8th International Conference on Soft Computing, Mendel. 2002. – Vol. 2. – P. 93-101.
22. **Luo, C.** Parse-matrix evolution for symbolic regression / C. Luo, S.L. Zhang // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2012. – Vol. 25. – № 6. – P. 1182-1193.
23. **Dotsenko, A.V.** Python package for the network operator implementation and its application for group control system synthesis problem / A.V. Dotsenko // Procedia Computer Science. 2019. – Vol. 150. – P. 679-686.

Дата поступления

в редакцию: 16.02.2029

A.V. Dotsenko¹, A.I. Diveev^{1,2}

**COLLISION AVOIDANCE AT SWARM REGROUPING WITH VARIABLE SET
OF ARGUMENTS OF CONTROL FUNCTION**

Peoples Friendship University of Russia¹

Federal Research Center Computer Science and Control of the Russian Academy of Sciences²

Purpose: To study the possibility of applying control functions with variable set of arguments in collision avoidance problem and to propose a method which is aimed to find such control functions.

Approach: It is suggested to equip each robot with its own optimizer which is able to search in the space of functions and parameters as well. Robots pursue not only to reach terminal states but also to avoid collisions with another robots. In order to accomplish both goals we introduce a new approach which assumes that right parts of differential equations of control object can be modified.

Findings: It was experimentally confirmed that situational extension or contraction of control function argument vector is a viable approach to resolving collisions between robots.

Research limitations: The present study provides a starting-point for further research of multi-robot interaction domain which is formulated here as a synthesis problem but here we assume each robot to have its own optimizer when the only control function is needed.

Originality: There is a plenty of methods addressing collision avoidance problem. Proposed in this study approach is somewhat special because it fully relies on calculations and its key feature of situational argument vector modification is unique.

Key words: synthesis of control system, modified network operator method, group of robots, genetic algorithm.

УДК 004.031

М.Е. Елисеев, Л.Н. Мазунова, И.Н. Елисеева

СТАТИСТИЧЕСКИЙ И КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ПОГОДНЫХ ФАКТОРОВ В ИНТЕРАКТИВНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается статистический и корреляционный анализ погодных факторов в интерактивной информационной системе повышения безопасности дорожного движения. Анализируется влияние метеоусловий на безопасность дорожного движения на автомобильном транспорте в зимний период. Методом корреляционного анализа оценивается теснота связи между самими погодными факторами и количеством ДТП, производится отбор погодных данных, значимых для исследования. Строится критерий, который с высокой вероятностью позволяет выделить сочетание метеорологических факторов, приводящее к росту числа аварий. Определяющими показателями являются прогнозные метеофакторы и их статистические характеристики. Экспериментальным путем найдены критические значения критерия для каждого температурного диапазона, а также произведена оценка точности расчета. Предложенный критерий планируется применить в интерактивной информационной системе направленной на повышение безопасности дорожного движения путем информирования дорожных служб, водителей и других участников дорожного процесса об ухудшении дорожных условий.

Ключевые слова: интерактивная информационная система, статистический анализ, авария, погодные факторы, корреляционный анализ, безопасность дорожного движения, ДТП, географическая информационная система, ГИС, метеофакторы.

Введение

Работа относится к циклу статей, посвященных созданию интерактивной информационной системы повышения безопасности дорожного движения (ИИСПБДД). Такие системы сочетают плюсы ГИС-технологий, аналитических методов и методов работы с базами данных; их описание приводится, например, в [1-3]. Архитектура системы подробно рассматривается в [4, 5], приведем здесь лишь общую схему с краткими комментариями (рис. 1).

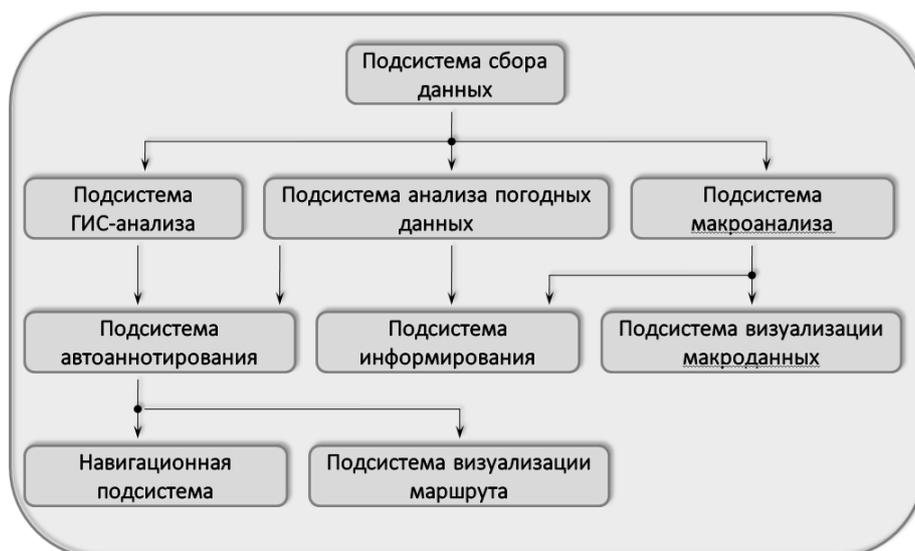


Рис. 1. Схема архитектуры интерактивной информационной системы повышения безопасности дорожного движения

Изначально данные поступают в систему в различных форматах, в подсистеме сбора данных форматы данных преобразуются и заносятся в общую базу (авторы использовали базы данных MySQL). Потом данные анализируются при помощи трех подсистем:

- подсистемы ГИС-анализа;
- подсистемы анализа погодных данных;
- подсистемы макроанализа.

Затем, в зависимости, от запроса конечного пользователя, данные анализа, преобразуются в удобную для восприятия форму в подсистемах:

- навигации (при помощи подсистемы автоаннотирования);
- визуализации маршрута (при помощи подсистемы автоаннотирования);
- информирования;
- визуализации макроданных.

Примеры работы системы показаны на рис. 2 и 3.

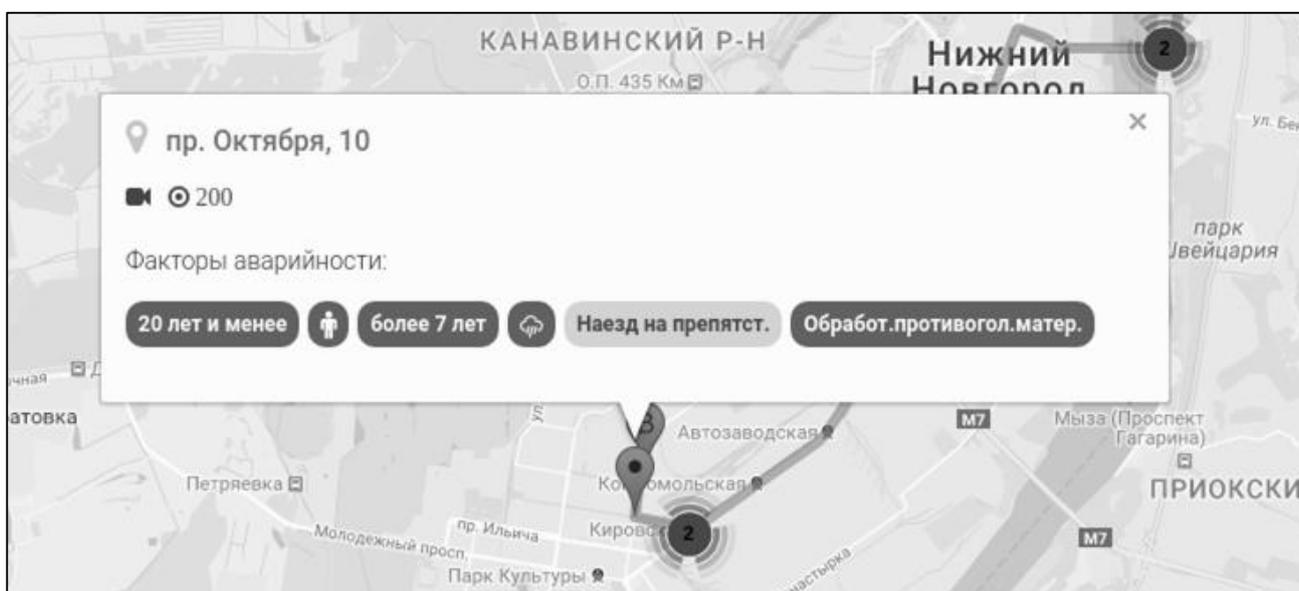


Рис. 2. Пример работы ИИСПБДД – аннотированное сообщение

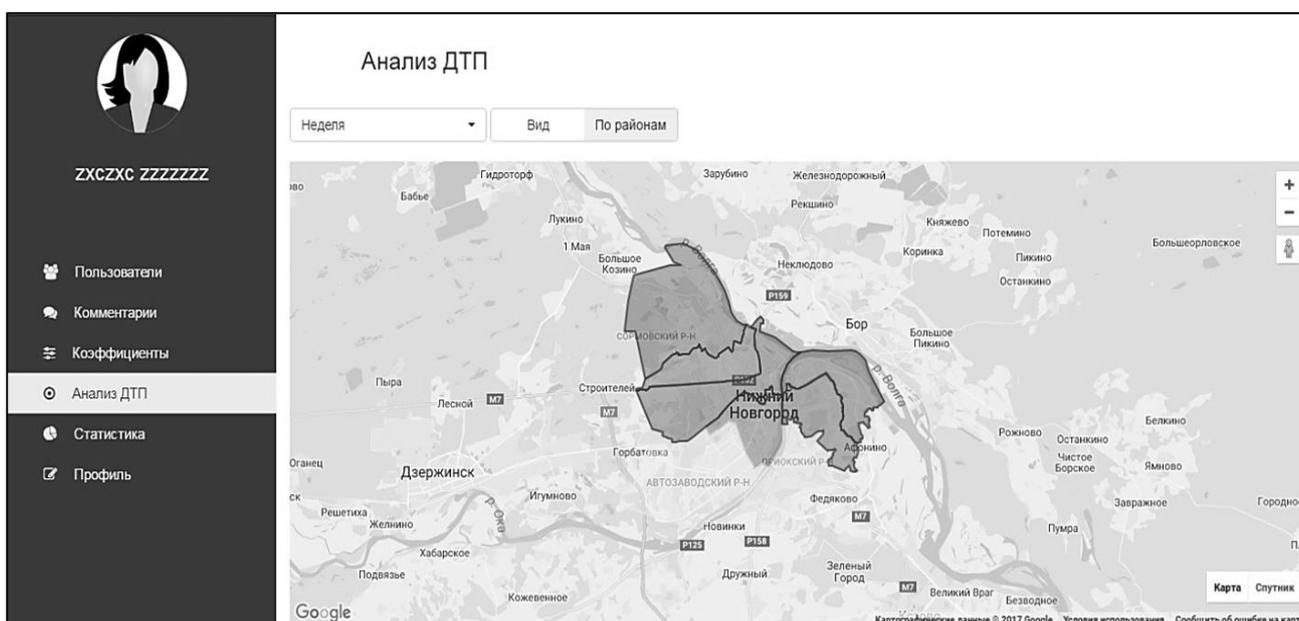


Рис. 3. Пример работы ИИСПБДД – работа подсистемы макроанализа

В первых двух случаях пользователем системы является водитель, в третьем – водитель или работник дорожной службы, в четвертом – специалист по организации дорожного движения или работник администрации.

Целью настоящей работы является построение математической модели подсистемы анализа погодных данных. В качестве сопутствующих факторов, сопровождающих дорожно-транспортные происшествия, часто указывают погодные условия. Так, уровень аварийности при неблагоприятной погоде может увеличиваться в несколько раз по сравнению со средним значением. Причины такого скачка количества аварий хорошо известны: дополнительными факторами риска возникновения дорожно-транспортных происшествий в зимний период становятся снег, туман, ледяной дождь, ухудшающие видимость на дороге и состояние дорожного покрытия (рис. 4). Следствием выпавших осадков является изменение состояния дорожного полотна: гололед, снежный накат, уменьшающие коэффициент сцепления шин с дорогой, вызывая тем самым опасность заноса и возрастание тормозного пути. Помимо этого, материал, из которого изготовлены шины, становится твердым и непластичным, в результате чего снижается сила трения и увеличивается тормозной путь. Снежные заносы вдоль дороги снижают видимость и уменьшают используемую ширину проезжей части. В сложных дорожных условиях, вследствие утомления, снижается внимательность водителя, увеличивается время его реакции. Также в непогоду на дороге менее организованы пешеходы.



Рис. 4. Влияние метеоусловий на безопасность дорожного движения

Метеопрогнозирование в последние годы стало реальным инструментом снижения негативных последствий влияния неблагоприятных погодных условий на дорожную ситуацию. Новые технологии и средства позволяют использовать эту информацию и внедрять с заметным экономическим эффектом в хозяйственную деятельность автотранспортных компаний и дорожных служб. Это особенно актуально в районах с нестабильным климатом, где погода напрямую влияет на состояние дорожного покрытия, а, значит, и на безопасность дорожного движения. Следствие принятия предупредительных мер – рациональное и в то же время эффективное расходование денежных средств и противогололедных реагентов, которые используются при зимнем содержании автомобильных дорог.

Отметим, что сам по себе метеопрогноз, каким бы точным он ни был, не может оказать значительного влияния на повышение безопасности дорожного движения. Необходимо выявить, что данное сочетание погодных факторов представляет потенциальную опасность, произведя при этом комплексное адресное информирование участников дорожного процесса.

Дорожная служба, отвечающая за чистку снега и устранение гололедицы, должна иметь список мест, которым нужно уделить особое внимание. Последнее возможно установить только посредством комплексного статистического анализа. Таким образом, приходим к выводу о необходимости внесения информации о погодных факторах в интерактивную информационную систему повышения безопасности дорожного движения.

Материалы и методы

Влияние погодных факторов на аварийность рассматривается в ряде работ [6-15]. Большинство исследователей отмечают, что в случае неблагоприятных погодных факторов число аварий резко растет. Как правило, используются статистические методы и анализ временных рядов [8]. В некоторых работах, например, в [12] рассматриваются вопросы информирования водителей о аварийно-опасном сочетании погодных факторов. Ряд исследований отмечает, что влияние погодных факторов сильно меняется от города к городу и сложно установить общие закономерности [6].

В данной работе рассматривается статистический подход, позволяющий выделить такие закономерности для зимнего периода. В качестве основных методов получения искомого критерия используется корреляционный анализ и другие методы математической статистики. После того, как критерий будет получен в подсистеме ГИС-анализа интерактивной информационной системы, происходит выявление списка мест концентрации ДТП с данными характеристиками с помощью динамических SQL-запросов к базе данных. Пример функции составления списка очагов показан на рис. 5.

```
function getQueryDtpNodes($param, $needDtp=false){
    $selectouter = "select lat, lng, id_node, full_count";
    $selectinner = "select p.lat, p.lng, id_node, count(*) full_count";

    $frominner = "
        from dtpnode p
        join dtp_by_node dt on dt.id_node = p.id
        join dtp d on d.id_point = dt.id_dtp ";
    $where = " where 1=1";

    $outersql = "";
    if(isset($param["date_from"])) $where .= " and d.dt >= ? ";
    if(isset($param["date_to"])) $where .= " and d.dt <= ? ";
    if(isset($param["weather"])){
        $selectinner .= ",count(case when id_weather=? then 1 else null end) weather_count";
        $selectouter .= ", weather_count, full_count/weather_count weather_koef";
    }
    if(isset($param["age"])){
        $frominner .= " left join dtp_member m on m.dtp = d.id";
        $selectinner .= ",count(case when id_ages=? then 1 else null end) ages_count";
        $selectouter .= ", ages_count, full_count/ages_count ages_koef";
    }
    if(isset($param["experience"])){
        if(!isset($param["age"])) $frominner .= " left join dtp_member m on m.dtp = d.id";
        $selectinner .= ",count(case when id_experiences=? then 1 else null end) experiences_count";
        $selectouter .= ", experiences_count, full_count/experiences_count experiences_koef";
    }
    if(isset($param["gender"])){
        if(!isset($param["age"])) && !isset($param["experience"])) $frominner .= " left join dtp_member m on m.dtp = d.id";
        $selectinner .= ",count(case when male=? then 1 else null end) gender_count";
        $selectouter .= ", gender_count, full_count/gender_count gender_koef";
    }
    if(isset($param["type"])){
        $selectinner .= ",count(case when type=? then 1 else null end) type_count";
        $selectouter .= ", type_count, full_count/type_count type_koef";
    }
    if(isset($param["factor"])){
        $selectinner .= ",count(case when id_sop_type=? then 1 else null end) factor_count";
        $selectouter .= ", factor_count, full_count/factor_count factor_koef";
    }
    $sql = $selectouter . " from (" .
        $selectinner . " " .
        $frominner . " " .
        $where .
        " group by id_node, lat, lng) innerq " .
        " order by id_node, lat, lng ";

    //echo $sql;
    return $sql;
}
```

Рис. 5. Пример функции формирования списка мест концентрации ДТП

В качестве объекта исследования выбраны две области севера России: Мурманская и Архангельская. Выбор обусловлен, во-первых, большой продолжительностью климатической зимы, во-вторых, особенностями климата. В качестве входных данных используется база данных аварийности [16] за зимний период сезонов 2016-2017, 2017-2018, 2018-2019 гг. в Мурманской и Архангельской областях (данные по аварийности в г. Мурманск и в прилегающих районах: Кольском, Мончегорском, Апатитском и в части Архангельской обл.: г. Архангельск, г. Северодвинск, Приморский р-н); архив погодных данных [17] за тот же период в Мурманской и Архангельской областях. В зимний период вошли дни, в которых наблюдался устойчивый температурный минус (начиная с трех дней подряд с отрицательной среднесуточной температурой и заканчивая тремя днями с теми же характеристиками). Из архива извлечены следующие данные:

- температура окружающего воздуха (Т);
- атмосферного давления на уровне метеостанции (P0);
- относительная влажность (U);
- скорость ветра (Ff).

Кроме того, были рассмотрены такие погодные характеристики, как суточные изменение температуры (ΔT), атмосферного давления (ΔP_0) и относительной влажности (ΔU). В дальнейшем данные о ДТП и погодных условиях по каждой области были совмещены в одну таблицу. Объем выборочных данных по Архангельской области составил 536, по Мурманской обл. – 505 дней.

Таблица 1

Средние показатели погодных факторов по временным периодам

Область	Средние показатели	ДТП, шт	Температура, °С	Атм. давление, мм рт. ст.	Влажность, %	Скорость ветра, м/с
Архангельская	2016-2017	2,54	-5,96	757,07	86,63	2,67
	2017-2018	2,40	-5,90	759,81	86,96	2,49
	2018-2019	2,20	-5,89	757,96	86,92	2,41
Мурманская	2016-2017	2,54	-6,77	753,44	86,70	1,74
	2017-2018	1,61	-6,65	752,64	80,85	3,22
	2018-2019	1,86	-6,85	757,52	84,02	4,05

Полный объем данных был последовательно обработан методами математической статистики. В табл. 2 представлены средние значения рассматриваемых параметров за весь период.

В среднем за три года в Мурманской области в зимний период происходит в среднем 1,85 ДТП в день, средняя температура составляет $-6,78^\circ\text{C}$, среднее атмосферное давление – 755,34 мм рт. ст., средняя влажность – 83,23 %, средняя скорость ветра – 3,5 м/с. В Архангельской области средние показатели следующие: 2,31 ДТП в день, температура $-5,92^\circ\text{C}$, атмосферное давление – 758,29 мм рт. ст., влажность – 86,83 %, скорость ветра – 2,52 м/с.

Полученные данные свидетельствуют о том, что средние, максимальные и минимальные характеристики в рассматриваемых регионах практически не отличаются друг от друга, за исключением скорости ветра. В Мурманской области наблюдаются более высокие значения этого показателя.

Таблица 2

Средние, максимальные и минимальные значения показателей
за зимний период 2016-2019 гг.

Область	Кол-во ДТП	Температура, °С (Т)	Давление, мм рт. ст. (Р _о)	Влажность, % (U)	Скорость ветра, м/с (Ff)	ΔТ, °С	ΔР _о , мм рт ст	ΔU, %
Средние значения показателей								
Мурманская	1,85	-6,78	755,34	83,23	3,5	0,04	0,01	-0,13
Архангельская	2,31	-5,92	758,29	86,83	2,52	0,00	0,00	-0,14
Максимальные значения показателей								
Мурманская	9	4,24	788,48	98,88	10,63	15,52	20,12	18,23
Архангельская	10	5,38	787,05	100,00	5,88	17,73	21,01	32,88
Минимальные значения показателей								
Мурманская	0	-36,92	726,8	48,65	0,33	-15,9	-25,2	-18,38
Архангельская	0	-39,39	732,61	46,13	0,13	-16,49	-19,6	-25,04

Теория/расчет

На первом этапе исследования применялся корреляционный анализ с целью выявления аварийноопасных погодных факторов. Определялись коэффициенты корреляции, отражающие взаимосвязь между количеством ДТП и погодными факторами и влияние их друг на друга (табл. 3, 4).

Таблица 3

Коэффициенты корреляции между парами факторов (Мурманская обл.)

	ДТП	Т	ΔТ	Р _о	ΔР _о	U	ΔU	Ff
ДТП	1,000							
Т	0,092	1,000						
ΔТ	0,029	0,348	1,000					
Р _о	0,019	-0,181	-0,107	1,000				
ΔР _о	0,015	-0,178	-0,449	0,301	1,000			
U	0,207	0,007	0,058	-0,044	-0,038	1,000		
ΔU	0,042	0,088	0,233	-0,123	-0,246	0,395	1,000	
Ff	0,058	0,366	0,134	-0,093	-0,200	-0,224	-0,183	1,000

Коэффициенты корреляции свидетельствуют о том, что количество ДТП в Мурманской обл. в большей степени зависит от влажности и температуры и в меньшей степени от других факторов. По всей рассмотренной совокупности был вычислен коэффициент детерминации $R^2 = 0,071$. Он говорит о том, что изменение количества ДТП на 7,1 % можно объяснить вариацией рассматриваемых погодных факторов.

Таблица 4

Коэффициенты корреляции между парами факторов (Архангельская обл.)

	ДТП	T	ΔT	Po	ΔPo	U	ΔU	Ff
ДТП	1,000							
T	0,059	1,000						
ΔT	0,028	0,279	1,000					
Po	-0,002	-0,232	-0,055	1,000				
ΔPo	-0,005	-0,219	-0,486	0,294	1,000			
U	0,342	0,154	0,085	-0,105	-0,133	1,000		
ΔU	0,099	0,108	0,325	-0,090	-0,308	0,391	1,000	
Ff	-0,014	0,455	0,319	-0,252	-0,365	-0,053	-0,045	1,000

В Архангельской области рост уровня аварийности связан с показателями влажности, температуры, изменения влажности, в меньшей степени с другими факторами. По всей рассмотренной совокупности был вычислен коэффициент детерминации $R^2 = 0,121$. Он говорит о том, что изменение количества ДТП на 12 % можно объяснить вариацией рассматриваемых погодных факторов.

Таблица 5

Коэффициенты корреляции и детерминации

Город	Объем выборки	Коэффициент множественной корреляции	Коэффициент детерминации
Мурманск	505	0,267	0,071
Архангельск	536	0,348	0,121

С целью увеличения тесноты связи между показателями погоды и количеством ДТП вся совокупность данных была рассортирована на 7 температурных диапазонов: $0 < t < 5$, $-2 < t < 0$, $-4 < t < -2$, $-6 < t < -4$, $-10 < t < -6$, $-15 < t < -10$, $t < -15$. Подобное действие объясняется тем, что температура является одним из основополагающих факторов, которые влияют на аварийность. Кроме того, существует зависимость между температурой воздуха и такими неблагоприятными для безопасности движения факторами, как гололедица, снегопад, снежный накат и пр. Структура таких данных представлена в табл. 6, 7.

Таблица 6

Коэффициенты корреляции и детерминации в температурных диапазонах (Архангельская обл.)

Температурный диапазон	Объем выборки	Среднее количество ДТП	Коэффициент множественной корреляции	Коэффициент детерминации
0; 5	104	2,34	0,513	0,263
-2; 0	96	2,28	0,438	0,192
-4; -2	68	2,34	0,332	0,110
-6; -4	50	2,42	0,416	0,173
-10; -6	86	2,45	0,341	0,116
-15; -10	67	2,39	0,484	0,234
< -15	65	1,91	0,568	0,323

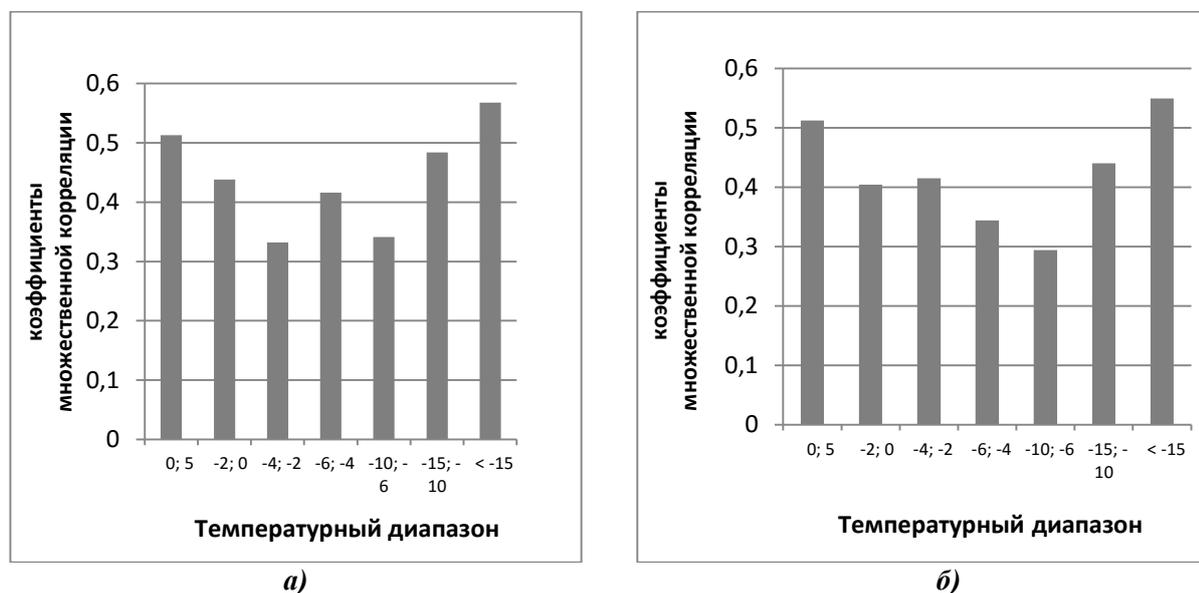
Среднее количество ДТП во всех температурных диапазонах незначительно отличается, за исключением периода с самыми низкими температурами.

Таблица 7

**Коэффициенты корреляции и детерминации
в температурных диапазонах (Мурманская обл.)**

Температурный диапазон	Объем выборки	Среднее количество ДТП	Коэффициент множественной корреляции	Коэффициент детерминации
0; 5	57	2,16	0,512	0,262
-2; 0	66	2,03	0,404	0,163
-4; -2	73	1,79	0,415	0,172
-6; -4	62	1,73	0,344	0,118
-10; -6	117	1,75	0,294	0,087
-15; -10	74	1,92	0,440	0,194
< -15	56	1,66	0,549	0,301

Среднее количество ДТП в температурных диапазонах уменьшается по мере снижения температуры. Коэффициенты множественной корреляции, рассчитанные для каждого температурного диапазона, значительно выше коэффициента, подсчитанного по всей совокупности (рис. 6).



**Рис. 6. Распределение коэффициентов множественной корреляции
по температурным диапазонам:
а) Архангельская обл.; б) Мурманская обл.**

В дальнейшем для уточнения в каждом температурном диапазоне произведем разбивку всех данных на группы с высоким, средним и низким уровнем аварийности. К дням с низкой аварийностью отнесем дни, количество аварий в которые меньше среднего значения Q за рассматриваемый период. К дням со средним уровнем аварийности отнесем дни, когда уровень аварийности был заключен в интервале от Q до $1,5Q$, высокий уровень – дни с аварийностью, превышающей $1,5Q$. Распределение дней по температурным диапазонам представлено в табл. 8.

Таблица 8

Распределение уровня аварийности по температурным диапазонам

Город	Температурный диапазон	Количество дней					
		с низким уровнем аварийности		со средним уровнем аварийности		с высоким уровнем аварийности	
Архангельская область	0; 5	41	39,4 %	39	37,5 %	24	23,1 %
	-2; 0	38	39,6 %	41	42,7 %	17	17,7 %
	-4; -2	25	36,8 %	26	38,2 %	17	25,0 %
	-6; -4	13	26,0 %	25	50,0 %	12	24,0 %
	-10; -6	29	33,7 %	34	39,5 %	23	26,7 %
	-15; -10	20	29,9 %	31	46,3 %	16	23,9 %
	< -15	28	43,1 %	29	44,6 %	8	12,3 %
Мурманская область	0; 5	25	43,9 %	22	38,6 %	10	17,5 %
	-2; 0	29	43,9 %	27	40,9 %	10	15,2 %
	-4; -2	35	47,9 %	29	39,7 %	9	12,3 %
	-6; -4	33	53,2 %	21	33,9 %	8	12,9 %
	-10; -6	60	51,3 %	45	38,5 %	12	10,3 %
	-15; -10	33	44,6 %	32	43,2 %	9	12,2 %
	< -15	29	51,8 %	22	39,3 %	5	8,9 %

В зимний период в Архангельской обл. преобладают дни с аварийностью близкой к средней, в 22 % – дни с высокой аварийностью, в Мурманской обл. в половине случаев наблюдаются дни с низкой аварийностью и в 12,5 % – дни с высокими показателями числа ДТП (рис. 7).

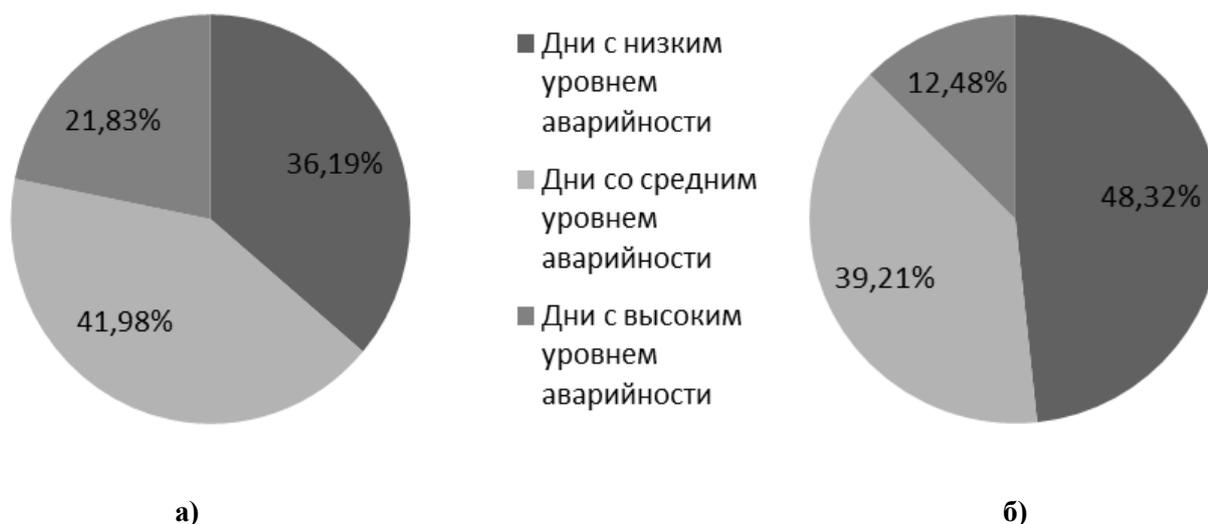


Рис. 7. Распределение дней по уровню аварийности:
а) Архангельская обл.; б) Мурманская обл.

Построение критерия

В качестве исходных данных рассматриваются следующие параметры:

1) $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7$ – значения величин погодных факторов (Т, Р₀, U, ΔТ, ΔР₀, ΔU, Ff) для проверяемого дня;

2) $\overline{x_1}, \overline{x_2}, \overline{x_3}, \overline{x_4}, \overline{x_5}, \overline{x_6}, \overline{x_7}$ – средние значения соответствующих величин погодных факторов в каждом температурном диапазоне;

3) $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6, r_7$ – значения коэффициентов корреляции, которые отражают взаимосвязь соответствующего погодного фактора и количества ДТП;

4) $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5, \sigma_6, \sigma_7$ – среднеквадратические отклонения соответствующих величин погодных факторов в каждом температурном диапазоне.

Расчетное значение критерия формально выражается функцией (1):

$$K_{расч} = K(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7) = \sum_{i=1}^n \frac{x_i - \overline{x_i}}{\sigma_i} \cdot r_i, \quad (1)$$

где x_1 – значение фактора температуры, °С;

x_2 – значение фактора давления, мм рт. ст.;

x_3 – значение фактора влажности, %;

x_4 – значение фактора разности температуры, °С;

x_5 – значение фактора разности давления, мм рт. ст.;

x_6 – значение фактора разности влажности, %;

x_7 – значение фактора скорости ветра, м/с.

Условие выполнения критерия (2):

$$K_{расч} < K_{кр} \quad (2)$$

Экспериментальным путем найдены критические значения критерия $K_{кр}$ для каждого диапазона (табл. 8), таким образом, чтобы для большинства дней с высокой аварийностью расчетное значение превышало критическое, но в то же время для дней с низкой аварийностью расчетное значение не превышало критическое.

Таблица 9

Критические значения критерия

Температурный диапазон	Критическое значение критерия $K_{кр}$	
	Архангельская обл.	Мурманская обл.
0; 5	0,01	-0,07
-2; 0	-0,01	0,24
-4; -2	-0,12	-0,01
-6; -4	-0,12	0,1
-10; -6	0	0,15
-15; -10	0,01	0,17
< -15	0,01	0,13

Таким образом, если для некоторого дня неравенство $K_{расч} > K_{кр}$ выполняется, то полагаем, что в этот день будет наблюдаться повышенная аварийность. В противном случае значительного превышения среднего числа аварий наблюдаться не будет.

Вычисление характеристик точности прогноза

При построении прогноза возможны ошибки двух родов. Ошибка первого рода заключается в том, что был предсказан рост числа аварий, которого затем не последовало. Ошибка второго рода – рост количества ДТП предсказан не был, но по факту наблюдался. Для определения достоверности прогноза по каждой области была проведена проверка выполнения критерия и вычислены ошибки первого и второго рода, представлены количественные характеристики точности. Окончательные результаты сведены в табл. 9, 10.

Таблица 10

Результаты проверки критерия (Архангельская обл.)

температурный диапазон	Дни с низкой аварийностью		Дни с высокой аварийностью	
	количество дней	вероятность выполнения критерия	количество дней	вероятность выполнения критерия
0; 5	41	0,317	24	1
-2; 0	38	0,316	17	0,706
-4; -2	25	0,6	17	0,765
-6; -4	13	0,231	12	0,833
-10; -6	29	0,379	23	0,826
-15; -10	20	0,3	16	0,688
< -15	28	0,5	8	0,875
Итого	194	0,381	117	0,821

В результате ошибка второго рода составила 0,381, т.е., 38 % дней с низкой аварийностью ошибочно признаны аварийно-опасными, в то же время, дни с повышенным риском возникновения ДТП были выявлены с вероятностью 82 % (вероятность ошибки первого рода составила 0,179).

Таблица 11

Результаты проверки критерия (Мурманская обл.)

температурный диапазон	Дни с низкой аварийностью		Дни с высокой аварийностью	
	количество дней	вероятность выполнения критерия	количество дней	вероятность выполнения критерия
0; 5	25	0,28	10	0,8
-2; 0	29	0,276	10	0,8
-4; -2	35	0,371	9	1,0
-6; -4	33	0,303	8	0,75
-10; -6	60	0,167	12	0,5
-15; -10	33	0,091	9	0,889
< -15	29	0,241	5	0,8
Итого	244	0,238	63	0,778

Для Мурманской области ошибка второго рода составила 0,238, т.е., 24 % дней с низкой аварийностью ошибочно признаны аварийно-опасными, в то же время дни с повышенным риском возникновения ДТП были выявлены с вероятностью 78 % (вероятность ошибки первого рода составила 0,222). Схема применения критерия показана на рис. 8.

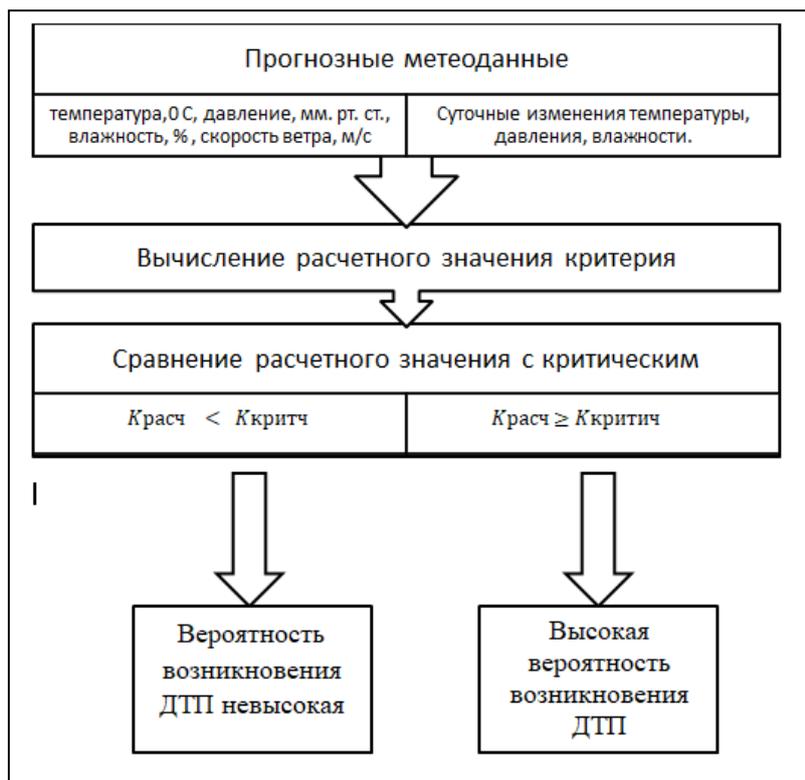


Рис. 8. Схема применения критерия

Заключение

Проведенное исследование с использованием методов математической статистики и корреляционного анализа показало, что средние показатели погодных факторов соответствуют климатической норме, выявлено наличие связи между числом ДТП и погодными факторами температурой ($^{\circ}$ С), давлением (мм рт. ст.), влажностью (%) и их суточными изменениями, а также скоростью ветра (м/с).

Для выявления дней с повышенной аварийной опасностью был предложен критерий (рис. 8), который с некоторой вероятностью, по прогнозным показателям погоды позволяет определить дни с высоким риском возникновения ДТП. Точность прогноза считается удовлетворительной.

Вернемся к схеме на рис. 1 и поясним логику работы подсистемы анализа погодных факторов интерактивной информационной системы:

- 1) прогнозная информация о погодных характеристиках автоматизировано поступает в базу данных;
- 2) происходит обработка данных методами, описанными в работе, с использованием динамических sql-запросов;
- 3) если сочетание факторов признается критическим, информация передается в подсистемы информирования и автоаннотирования;
- 4) в подсистеме автоаннотирования происходит обработка полученных данных и, с учетом данных подсистемы ГИС-анализа, формируются аннотированные сообщения, которые затем передаются навигационной подсистеме и подсистеме визуализации маршрута;
- 5) подсистема информирования передает данные на мобильные устройства и на придорожные информационные табло.

В перспективе планируется использование результатов исследования для определения значения безопасной скорости движения в электронных знаках.

Библиографический список

1. **Daito, Real** Time Accident Risk Information Provision on a Urban Expressway Network: Prediction Model Analysis and Development of a Provision System / Daito, Kodama, Ozawa // Proceedings of the 51st Spring Conference of the Committee of Infrastructure Planning and Management, 2015.
2. **DeLucia, B.H.** E-Crash: The Model Electronic Crash Data Collection System / B.H. DeLucia, R.A. Scopatz // Report DOT HS 811 326, National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), Washington, DC, 2010.
3. **Khan, G.** Application and Integration of Lattice Data Analysis, Network K-Functions, and Geographic Information System Software to Study Ice-Related Crashes / G. Khan, K.R. Santiago-Chaparro, X. Qin, D.A. Noyce // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. – 2009. – № 2136. – P. 67-76.
4. **Eliseev, M.E.** Virtual Reality and Navigation subsystems of the Interactive System for Road Safety Improving / M.E. Eliseev, T.N. Tomchinskaya, E.D. Galkina, N.Yu. Dudakov, R.A. Musarsky // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – С. 012027.
5. **Елисеев, М.Е.** Архитектура и стандартные реакции на внешние события интерактивной карты аварийности / М.Е.Елисеев, Т.Н. Томчинская, А.А. Репников, А.С. Блинов // Автотранспортное предприятие. Отраслевой научно-производственный журнал. – 2016. – №2. – С.34-27.
6. **Andrey, J.** Weather as a chronic hazard for road transportation in Canadian cities / J. Andrey, B. Mills, M. Leahy, J. Suggett // Nat. Hazards. – 2003. – Vol. 28. – P. 319-343.
7. **Asano, M.** Characteristics of traffic accidents in cold, snowy Hokkaido, Japan / M. Asano, M. Hirasawa // Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. – 2003. – Vol. 4 – P. 1426-1434.
8. **Bergel-Hayat, R.** Explaining the road accident risk: weather effects / R. Bergel-Hayat, M. Debbarh, C. Antoniou, G. Yannis // Accident Analysis and Prevention. – 2013. – Vol.60. – P. 456-465.
9. **Black, A.W.** Effects of winter precipitation on automobile collisions, injuries, and fatalities in the United States / A.W. Black, T.L. Mote // J. TranspGeogr. – 2015. – Vol.48. – P. 165-175.
10. **Keay, K.** Road accidents and rainfall in a large Australian city / K. Keay, I. Simmonds // Accident Analysis and Prevention. – 2006. – Vol. 38 (3). – P. 445-454.
11. **Keay, K.** The association of rainfall and other weather variables with road traffic volume in Melbourne, Australia / K. Keay, I. Simmonds // Accident Analysis and Prevention. – 2005. – Vol.37. – P. 109-124.
12. **Kilpeläinen, M.** Effects of weather and weather forecasts on driver behaviour / M. Kilpeläinen, H. Summala // Transportation Research. Part F. – 2007. – Vol. 10. – P. 288-299.
13. **Norrman, J.** Relationships between road slipperiness, traffic accident risk and winter road maintenance activity / J. Norrman, M. Eriksson, S. Lindqvist // Climate Research. – 2000. – Vol. 15. – P. 185-193.
14. **Songchitruksa, P.** Assessing weather, environment, and loop data for real-time freeway incident prediction / P. Songchitruksa, K.N. Balke // Transport Research Record – 2006. – Vol. 1959. – P. 105-113.
15. **Theofilatos, A.** A review of the effect of traffic and weather characteristics on road safety / A. Theofilatos, G. Yannis // Accident Analysis and Prevention. – 2014. – Vol.72. – P. 244-256.
16. Госавтоинспекция [официальный сайт]. – Режим доступа: <https://гибдд.рф/>, свободный.
17. Расписание погоды [официальный сайт]. – Режим доступа: <https://rp5.ru>, свободный.

*Дата поступления
в редакцию: 19.04.2020*

M.E. Eliseev, L.N. Mazunova, I.N. Eliseeva

**ABOUT SUBSYSTEM OF ANALYSIS OF WEATHER-RELATED FACTORS
OF INTERACTIVE SYSTEM OF ROAD SAFETY IMPROVEMENT**

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

Purpose: constructing of the criteria which allows to distinguish with some degree of probability among all days of the winter period those where the number of accidents exceeds the average by more than 50 per cent.

Approach: the correlation method assesses the close relationship between the weather factors themselves and the number of accidents, selection of weather data relevant for the study is holding.

Findings: critical values for each temperature diapason were found experimentally, and the accuracy of the calculation has been assessed

Research limitations: the proposed criterion can be applied to reduce the risk of accidents through timely and immediate remediation of the effects of weather and informing road users about the deterioration of road conditions.

Originality: the structural results are new.

Key words: road safety, accident, road accident, interactive system, geographic information system, GIS, weather, meteorological factors, correlation analysis.

УДК 004.932.2

А.С. Спижевой, Д.В. Баландин

ПОНИЖЕНИЕ РАЗМЕРНОСТИ ПРОСТРАНСТВА ПРИЗНАКОВ В ЗАДАЧЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛА ЧЕЛОВЕКА

Национальный исследовательский
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Рассматривается задача автоматического определения пола человека по изображению лица. В качестве его описателей предлагается использовать биологически обусловленные признаки, приближенно моделирующие схему работы зрительной коры головного мозга и представляющие собой иерархический подход с двумя уровнями. На первом уровне изображение фильтруется с помощью фильтров Габора, на втором уровне вычисляются статистические признаки. Полученные таким образом результаты могут варьироваться в зависимости от влияния несущественных для решения поставленной задачи факторов (например, поворота головы и освещения). Также с целью обеспечения устойчивости оценивания пола человека были рассмотрены два метода нормализации признаков: геометрическая нормализация лица и адаптивная нормализация яркости лица с ограничением контраста. Представлены два подхода для повышения скорости работы метода за счет понижения размерности пространства признаков: метод главных компонент и метод деревьев решений, ранжирующий признаки по значимости. Предложенный подход определения пола человека достигает средней точности классификации в 96,18 % и превосходит другие рассмотренные методы на стандартной базе Labeled Faces in the Wild.

Ключевые слова: распознавание лиц, распознавание пола, биологически обусловленные признаки, геометрическая нормализация, фотометрическая нормализация.

Введение

В последнее время наблюдается непрерывный рост интереса к задаче автоматического определения пола человека. Примером области, в которой автоматическое определение пола находит непосредственное применение, являются маркетинговые исследования, целью которых является сбор информации о составе аудитории.

Задача автоматической классификации пола человека по изображению лица на фотографии представляет определенную сложность для компьютера ввиду большого разнообразия возможных изображений, соответствующих одному и тому же полу. Такие факторы, как неравномерная освещенность, вращения головы, а также изменение возраста и выражения лица, также оказывают влияние на точность и представляют собой проблемы при разработке практических решений. Некоторые из этих проблем решаются на этапе нормализации лица, другие – с помощью повышения разнообразия обучающей выборки.

В работе [1] авторы предлагают использовать локальные бинарные шаблоны в качестве описателей лица и машину опорных векторов для решения задачи классификации пола. Также в работе проводится исследование подхода ранжирования признаков по значимости с помощью метода машинного обучения AdaBoost. Исходная размерность пространства описателей 342 200 была понижена за счет выбора наиболее значимых компонент до 500 (т.е., менее 1 %). На стандартной базе LFW предложенный подход достиг точности в 94,81 %. В работе [2] авторы, рассматривая задачу автоматической оценки возраста, предлагают подход, основанный на биологически обусловленных признаках в качестве описателей лица.

В качестве методов машинного обучения, используемых для решения задачи классификации пола, широко распространены машины опорных векторов; также популярны нейронные сети, сверточные нейронные сети и подходы, основанные на бустинге. В работе [3] было предложено использование единой сверточной нейронной сети для решения задачи

классификации пола совместно с задачей детектирования усов и бороды на лице. На стандартной базе LFW данный подход достиг точности в 95,13 %.

В работе [4] предложен подход решения задачи автоматического определения возраста человека на основе биологически обусловленных признаков. В данной работе мы расширяем предложенный подход и рассматриваем два подхода к понижению размерности пространства признаков уже в задаче определения пола.

Постановка задачи

Задача автоматической классификации пола по фотографии лица формулируется следующим образом: дана тренировочная выборка N_k , с m изображениями лиц, где I – изображение, $X(I)$ – функция, которая осуществляет вычисление описателя лица по изображению, I – пол человека. Задача состоит в том, чтобы построить модель $\hat{y}(X(I))$ и классифицировать пол человека для новых фотографий, не представленных в тренировочной выборке (в том числе, для новых людей).

Описатели лица

В задаче автоматического определения пола предлагается использование BIF признаков (biologically inspired features) [2, 5, 6] и метода опорных векторов [7].

Алгоритм определения пола человека включает в себя следующие шаги:

- 1) геометрическая нормализация и нормализация яркости лица;
- 2) вычисление биологически обусловленных признаков;
- 3) снижение размерности вектора-признаков с помощью метода главных компонент или метода, основанного на использовании деревьев решений;
- 4) классификация пола с помощью метода опорных векторов с rbf ядром, реализованный в библиотеке `opencv` [8].

В рамках данной задачи дополнительно проведено исследование метода снижения размерности пространства признаков, отличного от метода главных компонент. Мотивация этого исследования заключается в том, что понижение размерности пространства признаков и, соответственно, перевод вектора-описателя в пространство меньшей размерности, занимает большое время, относительно всего времени работы алгоритма (табл. 1). Как альтернатива методу главных компонент был рассмотрен метод, использующий ансамбль деревьев решений для получения оценок значимости отдельных признаков. Данный подход обладает преимуществом в плане временной трудоемкости по сравнению с методом главных компонент, поскольку после предварительной оценки значимости всех признаков понижение размерности пространства впоследствии происходит просто за счет выбора наиболее информативных компонент.

Геометрическая нормализация

Данная процедура выполняется с целью нормализации геометрии лица, т.е., его положения, масштаба и ориентации в изображении. Данные преобразования несущественны для решения поставленной задачи определения пола. Следовательно, желательно, чтобы признаки, вычисляемые по изображениям, были инвариантны относительно этих преобразований. В результате геометрической нормализации получается изображение фиксированного размера, с фиксированным положением, масштабом и ориентацией лица (в плоскости изображения).

Для достижения данной цели был предложен подход, основывающийся на переводе центров глаз на исходном изображении в две фиксированные точки на выходном изображении. Перевод осуществляется с помощью преобразования подобия (комбинации

изотропного масштабирования).

Пусть точки $p_{le} = (x_{le}, y_{le})^T$ и $p_{re} = (x_{re}, y_{re})^T$ есть координаты центров левого и правого глаз человека соответственно на исходном изображении. Цель геометрической нормализации заключается в том, чтобы с помощью преобразования подобия $p' = sR(p + T)$, где s – это коэффициент изменения масштаба, – двумерный поворот в плоскости изображения, а T – вектор сдвига, перевести исходные точки в фиксированные точки p'_{le}, p'_{re} в выходном (нормализованном) изображении заданного размера. Зафиксировав выходные точки равными для всех изображений, за счет применяемого преобразования осуществляется корректировка и фиксирование положения, масштаба лица и его ориентации в плоскости изображения. Размер выходного изображения, а также координаты глаз в нем, являются параметрами метода и выбираются исходя их потребностей конкретной задачи.

Нормализация яркости

На шаге нормализации яркости изображения (или фотометрической нормализации) происходит выравнивание яркости пикселей изображения с целью устранения влияния несущественных факторов, например, освещенности лица источниками света, на вычисляемые по изображению признаки. Так же, как и в случае геометрической нормализации, на данном шаге желательно устранить влияние несущественных факторов на последующие шаги алгоритма. По окончании фотометрической нормализации получается черно-белое изображение такого же размера, как и исходное, но с уже выровненной яркостью.

Одним из широко распространенных алгоритмов нормализации яркости изображения является алгоритм глобального выравнивания гистограммы. Адаптивное выравнивание гистограммы (алгоритм CLAHE, [10]) является модификацией алгоритма глобального выравнивания яркости. Цель данного алгоритма – это исключение не только глобальных вариация яркости пикселей в изображении, но также и локальных. В данном подходе не строится гистограмма для всего исходного изображения. Вместо это строятся несколько гистограмм для различных блоков изображения. При таком подходе в однородных областях изображения появляется шум. В таких областях интегральная кривая $F(l)$, вычисляемая на первом шаге работы алгоритма выравнивания гистограммы, будет иметь резкий наклон из-за того, что большое число пикселей имеют схожую яркость. Это приведёт к тому, что близкие значения яркости на изображении I отображаются в далекие по яркости на изображении I' . Уменьшение размера окрестности повышает интенсивность эффекта зашумления. Для избежания этого применяются дополнительные методы ограничения контрастности выходного изображения. Такой алгоритм носит название контрастно-ограниченного адаптивного выравнивания гистограммы. Детали алгоритма можно найти в работах [4, 10].

Биологически обусловленные признаки

После всех шагов нормализации исходного изображения вычисляются биологически обусловленные признаки (англ. Bio-Inspired Features, BIF) [2, 5]. BIF признаки были разработаны с учетом знаний о функционировании зрительной коры головного мозга млекопитающих [6]. Результаты экспериментов свидетельствуют в пользу наличия клеток различного типа в зрительной коре и наличии иерархии между ними. В моделях, описывающих восприятие визуальной информации, выделяют клетки простого типа, которые воспринимают информацию локально и чувствительны к положению визуальных стимулов. Также выделяют клетки сложного типа, которые, в отличие от простого, обладают некой инвариантностью к изменению положения локальных визуальных стимулов и зависят от выходных сигналов клеток простого типа.

Для моделирования клеток простого типа зрительной коры используют фильтры Габора, показавшие высокий уровень точности аппроксимации эмпирических данных. Модели клеток сложного типа так или иначе строят на основе выходных сигналов клеток простого типа. Например, в работе [6] для этого используется операция взятия максимума, т.е., выходной сигнал клетки сложного типа представляет собой максимальный среди выходных сигналов группы клеток простого типа. В работе [2] вместо операции взятия максимума предложено использование среднеквадратического отклонения, вычисляемого по выходным сигналам клеток простого типа.

Процедура вычисления признаков включает в себя применение нескольких линейных фильтров с последующей нелинейной обработкой. Всю процедуру можно разбить на шаги следующим образом:

- применение набора линейных фильтров Габора к исходному изображению;
- попарное слияние выходов от фильтров;
- вычисление среднеквадратических отклонений в различных положениях «скользящего окна».

Фильтр Габора представляет собой линейный фильтр, ядро которого представляет собой Гауссиан с дисперсией промодулированный косинусоидальной волной $G(x,y) = \exp\left(-\frac{x+\gamma^2 y}{2\sigma^2}\right) \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x' + \varphi\right)$, где $x' = x\cos\theta + y\sin\theta$, $y' = -x\sin\theta + y\cos\theta$, θ – ориентация, s – размер фильтра, $x, y \in \left\{-\frac{s}{2} \dots \frac{s}{2}\right\}$, γ – коэффициент сжатия, σ – среднеквадратическое отклонение функции Гаусса, λ – длина волны, φ – сдвиг фазы волны. В работе [2] в качестве модели клеток простого типа используются фильтры Габора с параметрами, оцененными на основе экспериментальных данных.

Соответственно, при поступлении на вход входного изображения I на выходе получается $2n$ отфильтрованных изображений, где $2n$ – это общее число применяемых фильтров. Для повышения устойчивости признаков к незначительным вариациям масштаба исходного изображения отфильтрованные результаты разбиваются на пары по близким значениям дисперсии Гауссиана и объединяются в одно изображение с помощью операции взятия попиксельного максимума: $F_k = \max(I * G_{2k}, I * G_{2k})$, где k – номер пары отфильтрованных изображений, знак $*$ означает операцию применения линейного фильтра (корреляция).

Последний шаг предполагает применение техники «скользящего окна» по изображениям F_k , полученным на предыдущем шаге слияния отфильтрованных изображений. В каждом окне с координатами верхнего левого угла (x_0, y_0) и размером $N_k \times N_k$ мы вычисляем стандартное отклонение для значений элементов из окна. Конкретные значения размеров окон N_k для каждого $k=1..8$ приводятся в [2]. Вычисленные значения стандартных отклонений формируют биологически обусловленные признаки.

Понижение размерности вектора признаков с помощью метода главных компонент

Метод главных компонент (Principal Component Analysis, PCA) [11] – широко распространенный в машинном обучении подход, предназначенный для понижения размерности пространства признаков, сохраняющий при этом как можно больше информации.

Задача ставится следующим образом. Пусть имеется n -мерный случайный вектор $\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ и соответствующая ему выборка, представленная в виде матрицы $X \in \mathfrak{R}^{m \times n}$, где m – это число наблюдений, а вектор X_{*j} – наблюдения переменной ξ_j . Не уменьшая общности, будем предполагать, что все векторы X_{*j} отцентрированы.

Метод главных компонент – статистический метод, применяемый для выявления линейных комбинаций переменных, обладающих высокой дисперсией. Пусть матрица

$C = \frac{1}{m-1} X^T X$ представляет собой эмпирическую ковариационную матрицу случайного вектора ξ . Собственные векторы $u_i, i = 1..n$ матрицы C , отранжированные в порядке убывания собственных чисел, т.е., $\lambda > \lambda_{i+1}$, задают набор ортогональных направлений – главных компонент. Линейные комбинации случайных переменных вдоль полученных направлений обладают тем свойством, что дисперсия первой компоненты максимальна среди всех возможных направлений, дисперсия второй компоненты максимальна среди всех направлений ортогональных первой, дисперсия третьей максимальна среди всех ортогональных первым двум и т.д.

В машинном обучении метод главных компонент часто используется, как способ понижения размерности вектора-признаков. Это делается для снижения влияния несущественных факторов при построении и использовании моделей, а также для борьбы с переобучением. На практике отцентрированная тренировочная выборка из n векторов-признаков размерности m трактуется как набор n наблюдений случайного вектора размерности m , по которой впоследствии находятся главные компоненты. Из полученного набора главных компонент выбирается требуемое количество направлений $d < m$, соответствующих наибольшим собственным числам. Исходные векторы-признаки размерности m проектируются на выбранные направления, в результате чего получаются новые векторы-признаки меньшей размерности d . Количество используемых направлений, т.е., выходная размерность пространства признаков, является параметром алгоритма. Она может определяться экспериментально или же с помощью эвристик. Один из популярных подходов для выбора числа главных компонент заключается в выборе такого числа направлений, чтобы сумма соответствующих им собственных чисел $\sum \lambda_i$ составляла не менее $p \sum \lambda_i$, где p – это параметр метода (обычно близкий к 1, например 0,95).

Понижение размерности пространства признаков с помощью деревьев решений

С помощью метода главных компонент можно добиться снижения размерности исходного пространства признаков за счет перевода признаков в пространство меньшей размерности с помощью линейного преобразования. На практике данный метод может оказаться слишком трудоемким. Поэтому имеет смысл рассмотреть методы, которые вычисляют оценку информативности признаков, например, подходы, основанные на построении деревьев решений. Снижения размерности исходных векторов-признаков в таком случае можно добиться за счет исключения наименее значимых компонент.

Метод ERT (Extremely Randomized Trees) [12] представляет собой метод машинного обучения, использующий ансамбль деревьев решений. Метод применим для решения задач классификации и регрессии. В нашем случае рассматривается задача классификации. На стадии тренировки строится требуемое число случайных деревьев решений, каждое из которых конструируется рекурсивно. На каждом шаге выбирается наилучший слабый классификатор $w_i = (l_i, \theta_i)$, где i -- номер вершины в дереве, l_i -- это индекс выбираемого опорного признака, а θ_i -- это порог, с которым осуществляется сравнение значения признака x_{l_i} . После выбора слабого классификатора для вершины с номером i , все векторы-признаков со значением признака $x_{l_i} < \theta_i$ используются далее для построения вершины с номером $2i+1$, все остальные для построения вершины с номером $2i+2$.

Выбор номера признака l_i осуществляется с помощью частичного перебора среди всего множества возможных признаков. После выбора опорного признака порог выбирается случайно и равномерно в диапазоне от минимального до максимального наблюдаемых значений признака с номером среди всех экземпляров тренировочной выборки, достигнувших текущей вершины $X^{(i)}$. Среди рассматриваемого множества слабых классификаторов выбирается тот, в котором результат сравнения несет больше информации:

$w_i = \operatorname{argmax}_{l, \theta} H\left(X^{(i)} - \frac{n_{2i+1}}{n_i} H(X^{(2i+1)}) - \frac{n_{2i+2}}{n_i} H(X^{(2i+2)})\right)$, где n_i – это количество векторов-признаков в множестве, используемых для построения вершины с номером i , а $H(X^{(i)})$ – это энтропия информационной системы, соответствующей распределению значений выходной переменной для экземпляров тренировочной выборки $X^{(i)}$.

Суммарные значения приращений энтропии для каждого признака, усредненные по деревьям, используются в качестве меры информативности данного признака [12]. Получившиеся таким образом оценки значимости всех использованных при построении деревьев решений компонент исходных векторов-признаков X , далее используются для ранжирования признаков по значимости и выбора требуемой размерности финального пространства признаков d . После построения деревьев решений и ранжирования признаков по значимости, число операций для получения преобразованного вектора-признаков есть $O(d)$, поскольку достаточно просто выбрать нужные признаки для последующей обработки.

Стандартный тестовый набор данных

База Labeled Faces in the Wild (LFW) [13] содержит 13233 фотографии людей. Из 5749 людей, включенных в базу, 1680 человек представлены более чем одной фотографией. Изображения базы получены в неконтролируемых условиях освещения, есть в наличии фотографии с различными ориентациями головы, люди могут проявлять эмоции, отличные от нейтральной, и т.п. Таким образом, база содержит фотографии, отражающие до некоторой степени свойства изображения, ожидаемых в реальных, неконтролируемых условиях эксплуатации. Люди не всегда специально позируют для камеры и могут вообще не иметь представления о месте ее расположения в пространстве.



Рис. 1. Примеры изображений из базы LFW

В связи с тем, что в большинстве работ используется не вся база, а только некоторая ее часть, мы также использовали только ту, в которой лица детектируются со степенью уверенности выше заданной. Пороги на степень уверенности обнаружения лица задавались таким образом, чтобы число получившихся изображений и сбалансированность полов в выборке были схожи с набором данных, описанным в работе в [1] (т.е., 7 443 изображения, 4 500 мужчин, 2 943 женщины). В итоге была получена выборка размером 7 484 фотографий (5 012 фотографий мужчин и 2 472 фотографий женщин). Для детектирования лиц была использована каскадная схема, реализованная в библиотеке OpenCV, с поддержкой выдачи оценки уверенности системы для каждого обнаруженного ей лица, в том, что это действительно лицо.

Результаты экспериментов

Авторами было проведено исследование двух методов понижения размерности пространства признаков в задаче автоматического определения пола человека. Был изучен подход определения пола человека, использующий для понижения размерности пространства признаков метод главных компонент и метод, основанный на ранжировании признаков по значимости. Сравнение скорости работы двух рассмотренных подходов приведено в табл. 1. Из приведенных результатов видно, что ранжирование признаков по значимости с последующим использованием лишь наиболее значимых, превосходит по скорости метод главных компонент.

Таблица 1

Среднее время обработки одного изображения (640x480) на компьютере с центральным процессором Intel Core i5 (3.2 GHz) в однопоточном режиме

<i>Шаг</i>	<i>Среднее время работы, мс</i>
Детектирование и нормализация	17.4
Вычисление признаков	5.7
Снижение размерности (PCA)	11.1
Снижение размерности (ERT)	<1
Классификация	1

На рис. 2 приведена иллюстрация наиболее информативных частей изображения при решении задачи определения пола, полученная после выбора 1600 самых значимых признаков с помощью метода ERT. На левой части рисунка изображено, для примера, нормализованное лицо из базы LFW. Те пиксели в правой части изображения, которые отображены ярче, используются в выбранных признаках чаще (т.е., более информативны), чем те, которые изображены темнее.

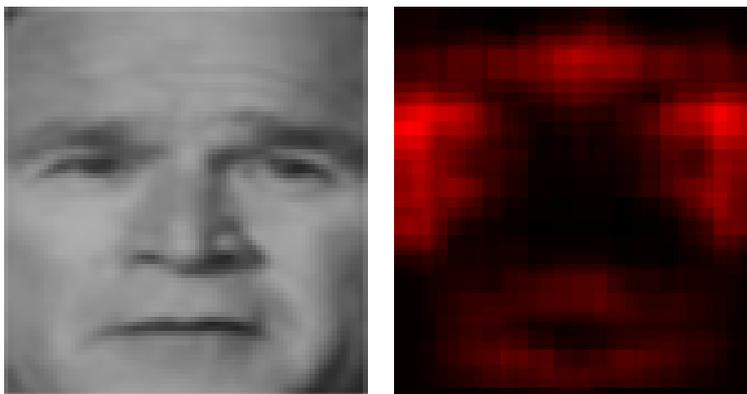


Рис. 2. Иллюстрация наиболее информативных частей изображения

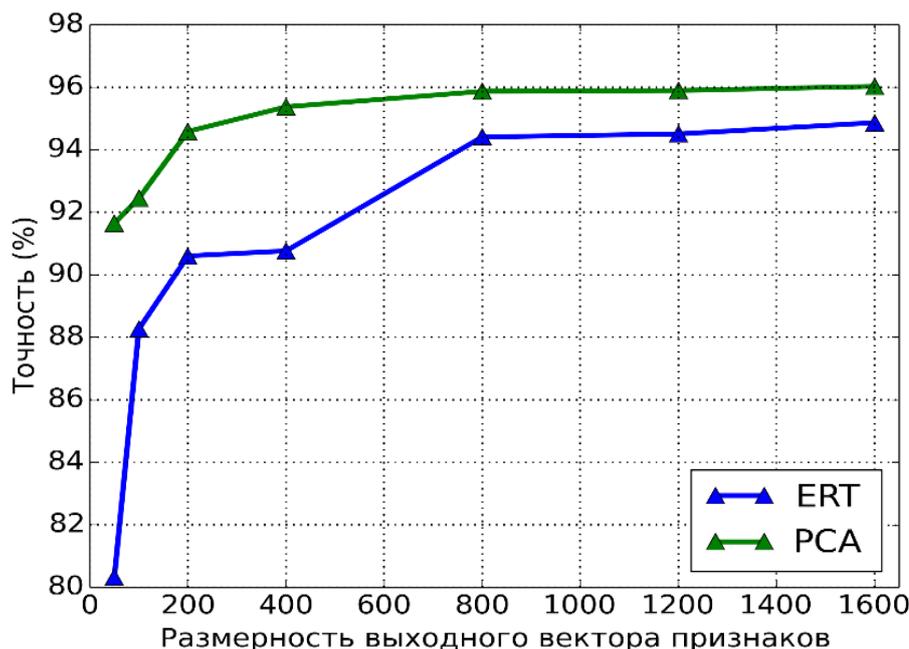


Рис. 3. Сравнение точности определения пола в зависимости от числа используемых признаков для метода главных компонент и метода, основанного на ранжировании признаков с помощью деревьев решений

На рис. 3 показано сравнение точности распознавания пола с использованием двух использованных методов понижения размерности пространства признаков. В табл. 2 приведено сравнение точности работы предложенного метода с несколькими известными подходами. В качестве протокола валидации использовался метод перекрестной проверки.

Таблица 2

Сравнение методов автоматического определения пола по фотографии на базе LFW

<i>Метод</i>	<i>Точность, %</i>	<i>Число разбиений</i>	<i>Размер выборки</i>
Shan, 2012 [1]	94.81	5	7443 (4500 м, 2943 ж)
Konushin, 2013 [3]	95.13	6	Не указан
BIF+PCA+SVM	96.18	5	7484 (5012 м, 2472 ж)
BIF+ERT+SVM	94.86	5	7484 (5012 м, 2472 ж)

На рис. 4 приведены результаты правильной работы предложенного алгоритма для автоматического определения пола человека по фотографиям из базы LFW. Зеленым цветом выделен правильный, ожидаемый результат, желтым – результат, выданный системой.

Заключение

Предложенный подход определения пола человека по изображению лица, использующий BIF признаки и метод опорных векторов, достигает средней точности классификации в 96,18 % и превосходит другие рассмотренные методы на базе Labeled Faces in the Wild (табл. 2). Также приведены результаты сравнения двух методов понижения размерности пространства признаков: метода главных компонент (который используется и во всех других предложенных подходах) и метода, основанного на выборе наиболее информативных признаков.



Рис. 4. Примеры результатов правильного определения пола субъекта на базе LFW с помощью предложенного алгоритма

Согласно полученным результатам, использование деревьев решений для оценки информативности компонент вектора признаков и последующего выбора наиболее значимых признаков, приводит к значительной экономии во времени обработки кадра (табл. 1). В то же время, это приводит к снижению средней точности классификации с 96,18 % до 94,86 % (рис. 3), что, однако, по-прежнему превосходит по качеству другие рассмотренные подходы.

Библиографический список

1. **Shan, Caifeng** Learning local binary patterns for gender classification on real-world face images / Caifeng Shan // Pattern Recognition Letters. 33.4. 2012. – P. 431-437.
2. **Guo, Guodong** Human age estimation using bio-inspired features / Guodong Guo, Mu Guowang, Fu Yun, S. Thomas // Computer Vision and Pattern Recognition. 2009.
3. **Kuharenko, A.** Simultaneous facial attribute classification with convolutional neural networks / Artem Kuharenko, Anton Konushin // Pattern recognition and image analysis (PRIA-11-2013). 2013. – P. 623-626.
4. **Спижевой, А.С.** Автоматическое оценивание возраста человека с использованием адаптивного выравнивания яркости и биологически обусловленных признаков / А.С. Спижевой, А.И. Оголихина, А.В. Бовырин // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 1-1 (1). 2014.
5. **Guo, Guodong** Image-based human age estimation by manifold learning and locally adjusted robust regression / Guodong Guo, Fu Yun, R. Charles Dyer, S. Thomas Huang // Image Processing, IEEE Transactions on 17, – №. 7. – 2008. – P. 1178-1188.
6. **Riesenhuber, Maximilian** Hierarchical models of object recognition in cortex / Maximilian Riesenhuber, Poggio Tomaso // Nature neuroscience 2, – №. 11. – 1999. – P. 1019-1025.
7. **Cortes, Corinna** Support-vector networks / Corinna Cortes, Vapnik Vladimir. // Machine learning 20.3. 1995. – P. 273-297.

8. Open Source Computer Vision Library, URL: <http://opencv.org/>
9. **Pizer, Stephen M.** Adaptive histogram equalization and its variations / Stephen M. Pizer // Computer vision, graphics, and image processing 39.3. 1987. – P. 355-368.
10. **Benitez-Garcia, G.** Face Identification Based on Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) / G. Benitez-Garcia, J. Olivares-Mercado, G. Aguilar-Torres, G. Sanchez-Perez, H. Perez-Meana // Image processing, computer vision, & pattern recognition. IPCV. 2011.
11. **Abdi, H.** Principal component analysis / H. Abdi, L.J. Williams // Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics, 2(4). 2010. – P. 433-459.
12. **Geurts, Pierre** Extremely randomized trees / Pierre Geurts, Ernst Damien, Wehenkel Louis // Machine learning, 63.1. 2006. – P. 3-42.
13. **Huang, Gary B.** Labeled faces in the wild: A database for studying face recognition in unconstrained environments / Gary B. Huang, Manu Ramesh, Tamara Berg, Erik Learned-Miller // Technical Report 07-49, University of Massachusetts, Amherst. 2007.

*Дата поступления
в редакцию: 02.02.2020*

A.S. Spizhevoy, D.V. Balandin

FEATURE SPACE DIMENSIONALITY REDUCTION FOR AUTOMATIC GENDER RECOGNITION

Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod

Purpose: In this paper we address the problem of automatic human gender estimation by face image.

Design/methodology/approach: We propose to use biologically inspired features as face descriptors. Such features approximately model how visual cortex works and compute features in a hierarchical fashion. First a number of Gabor filters are applied to source image. Then statistical features are computed. However, descriptors computed in such a way are sensitive to irrelevant (for gender estimation) factors: e.g. head orientation and illumination. That is why we propose using geometric face normalization and contrast limited adaptive histogram equalization to make descriptors invariant to those irrelevant effects. Geometric normalization makes face descriptors invariant to head orientation changes within image plane. And adaptive histogram equalization addresses non-uniform face illumination. Also we study using two dimensionality reduction methods for improving gender estimation speed: principal component analysis and ranking features using decision trees.

Findings: The proposed approach achieves average classification accuracy of 96.18% and outperforms the other considered approaches on the standard Labeled Faces in the Wild dataset.

Research limitations/implications: Only in-plane face geometry normalization addressed. It is interesting to study other methods as well.

Originality/value: Developed a novel approach for automatic gender estimation. The proposed approaches can be used in practice in digital signage applications and for market analysis.

Key words: face recognition, gender recognition, biologically inspired features, geometrical normalization, photometric normalization.

УДК 004.94

А.А. Уткина^{1,2}**ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ SSG/LRR- ω RSM ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ
НЕСТАЦИОНАРНЫХ ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЙ**

Российский Федеральный Ядерный Центр

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики¹Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева²

Представлено исследование особенностей моделирования характеристик нестационарных отрывных турбулентных течений и генерируемых ими акустических полей с использованием вихреразрешающей модели турбулентности, построенной на базе модели SSG/LRR- ω (SSG/LRR- ω /EDES). Модель SSG/LRR- ω /EDES является комбинацией моделей отсоединенных вихрей EDES и SSG/LRR- ω RSM. Показано, что модель SSG/LRR- ω RSM в качестве RANS составляющей модели SSG/LRR- ω /EDES позволяет лучше предсказывать точку отрыва потока. Приводится решение характерных задач с отрывными течениями. На данных задачах показано, что результаты, полученные с помощью модели SSG/LRR- ω /EDES, хорошо согласуются с результатами расчетов, полученных с использованием известных вихреразрешающих моделей на основе моделей SA и SST, и с экспериментальными данными.

Ключевые слова: модель турбулентности SSG/LRR- ω RSM, модель отсоединенных вихрей EDES, модель SSG/LRR- ω /EDES, течение в каверне, течение в сопле, обтекание тандема цилиндров.

Введение

В настоящее время при численном моделировании отрывных турбулентных течений применяются DES модели [1-5]. В этих моделях LES подход используется для описания вихревых структур в турбулентных зонах «далеких» от пограничных слоев, тогда как сам пограничный слой моделируется полуэмпирическими RANS моделями турбулентности. Приемлемая точность RANS моделей турбулентности для разрешения пограничных слоев наряду с адекватными вычислительными затратами LES моделей в обширных отрывных зонах, а также достаточно простая численная реализация сделали DES подход достаточно мощным и привлекательным инструментом для расчета широкого круга задач вычислительной аэродинамики.

Первая версия DES была основана на модели турбулентности SA [6]. Простота реализации и экономичность с вычислительной точки зрения DES модели, по сравнению с моделями DNS и LES, привели к широкому ее распространению и интенсивному использованию. Известные модели этого подхода – метод отсоединенных вихрей DES и его модификации DDES, IDDES [6-11]. С помощью DES подхода удалось существенно увеличить точность расчета аэродинамических течений с обширными отрывными зонами, возникающими, например, при обтекании различных препятствий и тел сложной формы под большими углами атаки [5, 10, 12, 13]. Однако именно RANS, как составляющая DES, в случае обтекания на закритических углах атаки дает недостаточно корректное определение точки отрыва из-за неблагоприятного градиента давления [14].

Ключевым недостатком RANS составляющей в гибридных моделях является то, что они базируются на гипотезе Буссинеска [15]. Применение гипотезы Буссинеска дает хорошие результаты, когда есть доминирование одной из компонент тензора рейнольдсовых напряжений, в противном случае получение корректных результатов может быть весьма затруднительным. Разрешить эту трудность позволяют модели турбулентности семейства RSM (Reynolds stress model) [16, 17], которые непосредственно моделируют анизотропию рейнольдсовых напряжений и неравновесные эффекты. Применение моделей RSM позволило

улучшить качество моделирования течений с сильной кривизной линий тока [16] и течений около двугранных углов [18]. В статье [19] была предложена модификация модели турбулентности SSG/LRR- ω RSM [16] для моделирования отрывных течений, основанная на DES подходе.

В данной работе исследуется применимость модели SSG/LRR- ω RSM при моделировании нестационарных отрывных течений на задачах обтекания прямоугольной каверны M219, тандема цилиндров и задачи истечения холодной струи из сопла SMC000. Расчеты проведены в программном комплексе ЛОГОС [20-22]. Пакет программ инженерного анализа ЛОГОС предназначен для решения трехмерных задач аэродинамики, гидродинамики и теплопереноса на супер-ЭВМ и ориентирован на моделирование широкого круга физических процессов в интересах проектирования перспективных наукоемких изделий промышленности. Пакет программ ЛОГОС успешно прошел верификацию и показал достаточно хорошие результаты на серии различных аэродинамических задач, включая расчеты нестационарных отрывных течений [19, 23, 24], а также промышленных задач [25, 26].

DES подход на основе модели SSG/LRR- ω RSM

Модель RSM содержит уравнения переноса Рейнольдсовых напряжений R_{ij} и уравнение переноса удельной диссипации ω . В силу симметричности тензора Рейнольдсовых напряжений интегрируются дифференциальные уравнения переноса для трех нормальных и трех касательных компонент этого тензора [16] (1):

$$\frac{\partial \rho R_{ij}}{\partial t} + \frac{\partial (\rho R_{ij} U_k)}{\partial x_k} = \rho P_{ij} + \rho \Phi_{ij} - \rho \varepsilon_{ij} + \rho D_{ij} + \rho M_{ij}. \quad (1)$$

Для замыкания системы уравнений используется следующее уравнение для удельной диссипации (2):

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \omega U_k)}{\partial x_k} = \frac{\alpha_{\omega} \omega}{k} \frac{\rho P_{kk}}{2} - \beta_{\omega} \rho \omega^2 + \left[\left(\mu_l + \sigma_{\omega} \frac{\rho k}{\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_k} \right] + \sigma_d \frac{\rho}{\omega} \max \left(\frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 0 \right), \quad (2)$$

где члены уравнений учитывают: P_{ij} – генерацию турбулентности, $\rho \varepsilon_{ij}$ – ее диссипацию; $\rho \Phi_{ij}$ – перераспределение турбулентности между компонентами тензора рейнольдсовых напряжений, ρD_{ij} – диффузию; остальные параметры – константы модели. Полное описание используемых моделей дано в [16].

При расчете отрывных течений могут применяться подходы DES, которые обеспечивают приемлемую точность предсказания параметров осредненного течения в LES области и эффективно моделируют пограничные слои в RANS области.

Подходы DES на основе модели SSG/LRR- ω заключаются в том, что в уравнениях переноса рейнольдсовых напряжений R_{ij} вводится зависимость диссипативного члена от линейного масштаба турбулентности. Из-за особенности построения диссипативного члена ($\rho \varepsilon_{ij} = 2/3 \rho \varepsilon \delta_{ij}$) модификации подвергаются только уравнения переноса диагональных элементов тензора R_{ij} (3):

$$\frac{\partial \rho R_{ij}}{\partial t} + \frac{\partial (\rho R_{ij} U_k)}{\partial x_k} = \rho P_{ij} + \rho \Phi_{ij} - \rho \varepsilon_{ij} \frac{l_{RANS}}{l_{DDES}} + \rho D_{ij}. \quad (3)$$

Линейный масштаб турбулентности выбирается таким образом, чтобы в каждой точке пространства для всех уравнений переноса определялась либо RANS, либо LES область (4):

$$l_{RANS} = \max \left(\frac{R_{ii}^{1/2}}{\beta^* \omega} \right). \quad (4)$$

В качестве DES составляющей используется усиленная модель DES (EDES) [28]. Данная модификация позволяет учитывать развитие естественной неустойчивости Кельвина –

Гельмгольца в пограничном слое и более точно моделирует развитие трехмерной турбулентности (за счет значительного ускорения перехода к двухмерной и потом к трехмерной турбулентной структуре в пограничном слое), что особенно важно при моделировании струйных течений.

В подходах DES для вычисления подсеточного масштаба турбулентности используется константа C_{DES} . Константа C_{DES} , входящая в модель отсоединенных вихрей, должна быть откалибрована, чтобы метод DES правильно имитировал прямой энергетический каскад от крупных вихрей к мелким вихрям. Калибровка осуществляется на классической задаче о затухании однородной изотропной турбулентности [29], в которой происходит подбор такого значения величины C_{DES} , при котором расчетный спектр разрешенной кинетической энергии турбулентности наилучшим образом совпадает с экспериментальными данными и подчиняется закону Колмогорова $E \sim \kappa^{-5/3}$ в инерционном диапазоне волновых чисел.

Более подробное описание метода отсоединенных вихрей на основе модели турбулентности SSG/LRR- ω можно найти в [19].

Расчет обтекания прямоугольной каверны турбулентным трансзвуковым потоком

В данной задаче рассматривается трансзвуковое обтекание прямоугольной каверны M219 на плоской пластине, экспериментально исследовавшийся в работе [30] и являющееся популярным тестом для нестационарных подходов к моделированию турбулентности и оценке уровня пульсаций давления (шума) [3130].

При определенных условиях и геометрии каверны в ней реализуется течение, в котором слой смешения, формирующийся при отрыве пограничного от переднего края каверны, теряет устойчивость и взаимодействует с ее задней стенкой. В результате, в каверне возникают самоподдерживающиеся осцилляции давления, которые могут приводить к наличию интенсивных пиков в спектре генерируемого ею аэродинамического шума. Типичными примерами течений рассматриваемого типа являются обтекание «колодца» шасси самолета и грузовых отсеков для хранения ракет, в которых нестационарные акустические нагрузки могут приводить к разрушению конструкции из-за усталостных напряжений. По этой причине, основной интерес при расчете данного течения представляют его нестационарные характеристики, в первую очередь, нестационарные поля давления на стенках каверны.

Для решения задачи была построена неструктурированная сетка, состоящая из усеченных шестигранников и содержащая 6.2 млн. ячеек, размер грани ячейки в структурированной подобласти 2 мм, толщина первой ячейки пограничного слоя составляет 1 мкм для обеспечения условия $y^+ < 1$.

Для моделирования обтекания в качестве параметров невозмущенного потока, набегающего на каверну, выбраны следующие значения: $P_\infty = 62100$ Па, $T_\infty = 266.53$ К, $M_\infty = 0.85$, что соответствует числу Рейнольдса $Re = 1.347 \times 10^7$. Расчет проводился с использованием моделями турбулентности SA/EDDES, SST/EDDES и SSG/LRR- ω /EDDES.

Для оценки точности полученных данных проводится сравнение численных результатов и экспериментальных данных интегральных уровней пульсаций давления по координате x на дне каверны в точках мониторинга. На рис. 1 приводится сравнение результатов уровней звукового давления в точках мониторинга, полученных по ПК ЛОГОС, с экспериментальными данными.

Из представленных графиков видно, что максимумы частотных спектров, полученные в результате расчетов с использованием моделей турбулентности SA/EDDES, SST/EDDES и SSG/LRR- ω /EDDES, совпадают между собой и хорошо согласуются с экспериментальными данными по частоте и уровню воздействия.

Другой оценкой в данном случае является распределение интегрального уровня пульсаций давления (OASPL) в точках мониторинга, приводимое на рис. 2.

По уровню OASPL отличия результатов расчетов, полученные в ПК ЛОГОС, от экспериментальных данных не превышает 1.5 %.

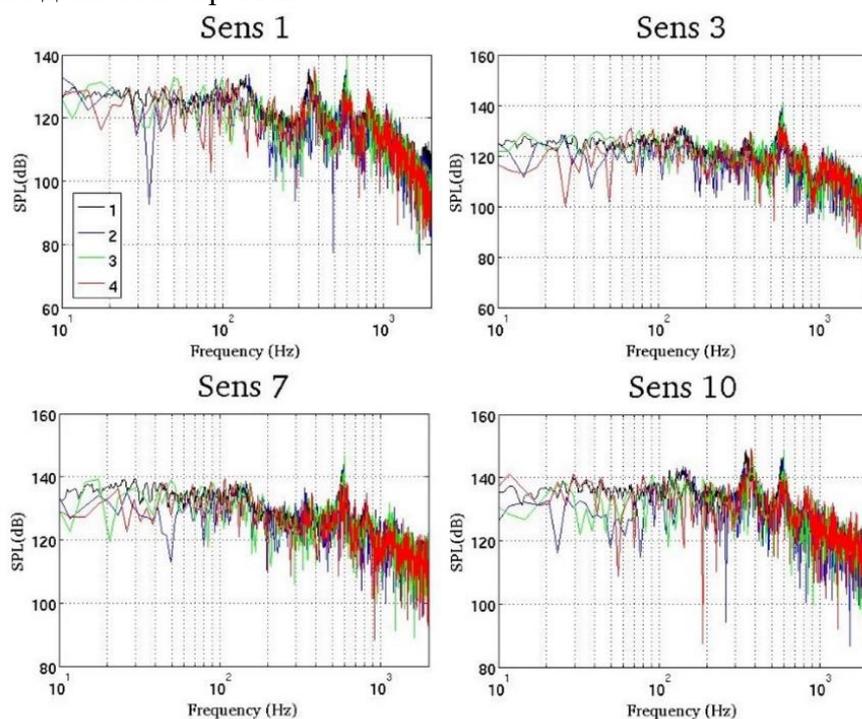


Рис. 1. Спектр звукового давления:

1 – экспериментальные данные [30], 2 – SA/EDES, 3 – SST/EDES, 4 – SSG/LRR- ω /EDES

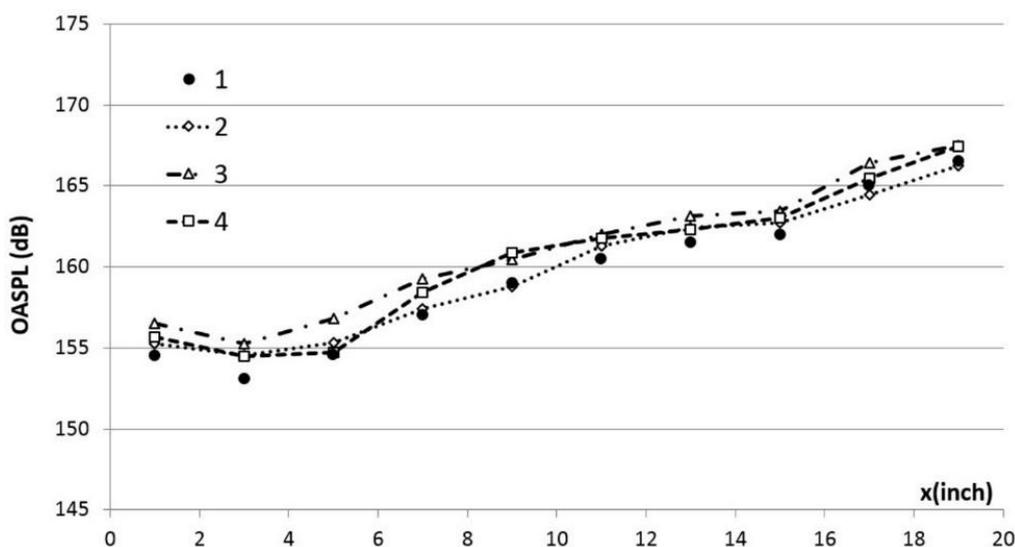


Рис. 2. Интегральный уровень пульсаций давления:

1 – экспериментальные данные [30], 2 – SA/EDES, 3 – SST/EDES, 4 – SSG/LRR- ω /EDES

Расчет характеристик осесимметричного сопла SMC000

Проведен нестационарный расчет истечения холодной струи из осесимметричного суживающего реактивного изолированного сопла SMC000 с непрерывным контуром [33, 34]. В расчете оценивались потеря безразмерной скорости вдоль центральной оси струи и распределение максимальных пульсаций продольной компоненты скорости на оси струи. Приведено сравнение результатов с экспериментальными данными [33-35] и результатами расчетов с использованием модели RANS/ILES, опубликованными в [32].

Для решения задачи построена гексагональная блочно-структурированная сетка с 23.6 млн. ячеек. Сетка имеет сгущение к стенкам сопла с целью выполнения критерия $y^+ \leq 1$ для первой пристеночной ячейки. В рамках подхода DES пограничный слой разрешался в RANS приближении. Толщина пограничного слоя составила $0.03De$, где De – диаметр критического сечения сопла.

В качестве начальных условий в сопле взяты параметры вязкого сжимаемого газа с числом Маха $M = 0.98$ при значении $Re = 1.2 \times 10^6$. Давление и температура в точке торможения: $P_0 = 186000$ Па и $T_0 = 300$ К.

В расчетах использовались вихреразрывающие модели EDES на основе моделей турбулентности SA, SST и SSG/LRR- ω .

Из рисунков видно, что уже вблизи среза сопла формируется вихревой характер течения. С кромки сопла срываются вихри, близкие к регулярным структурам, поэтому на начальном участке наблюдается ламинарное смешение потока. На расстоянии одного калибра сопла вихри разрушаются и переходят в турбулированную структуру течения. Распределение мгновенного поля тензора завихренности дает качественное представление о трансверсальном растекании струи вниз по потоку – происходит растекание пристеночной струи вдоль плоскости в направлении, перпендикулярном основному течению.

На рис. 3 представлено распределение безразмерной скорости U/U_j на оси струи. На графиках приведены результаты расчетов с использованием моделей SA/EDES и SSG/LRR- ω /EDES, а также экспериментальные данные [33, 34] и результаты расчетов с использованием модели RANS/ILES [32].

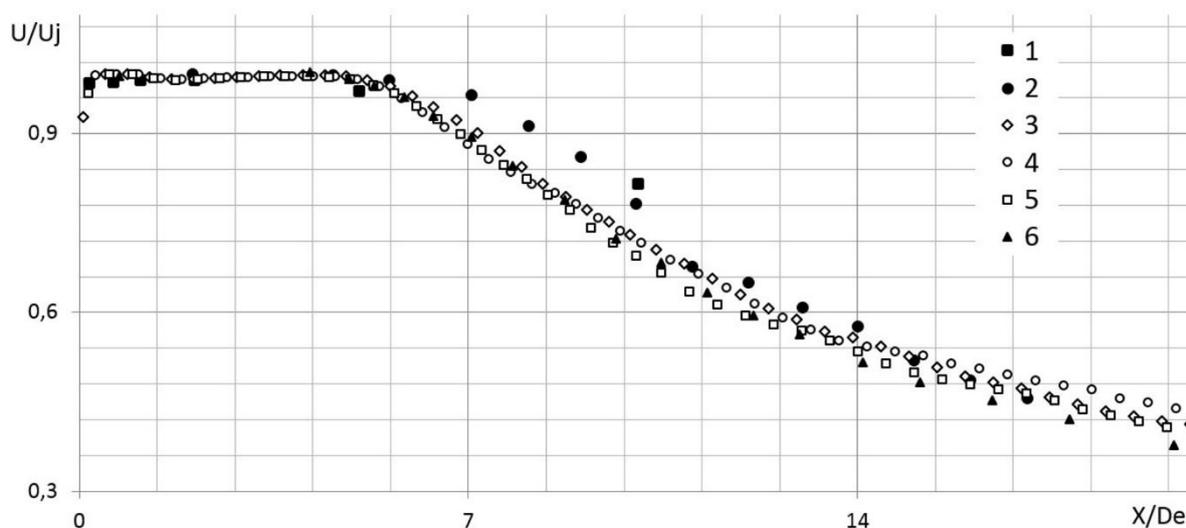


Рис. 3. Распределение безразмерной скорости U/U_j на оси струи:
1, 2 – экспериментальные данные [33, 34], 3 – SA/EDES;
4 – SST/EDES, 5 – SSG/LRR- ω /EDES, 6 – RANS/ILES [32]

Из графика безразмерной скорости на оси струи, видно, что результаты расчета с помощью моделей SA/EDES, SST/EDES и SSG/LRR- ω /EDES хорошо согласуются между собой и с результатами, полученные RANS/ILES модели.

На рис. 4 приведен график пульсаций продольной компоненты скорости на оси струи.

Максимум пульсаций продольной скорости на оси струи для всех моделей турбулентности достигается приблизительно одновременно, на 3-4 калибра сопла раньше, чем в эксперименте [35]. Согласие результатов расчетов между разными вихреразрывающими моделями турбулентности обусловлено тем, что область RANS практически отсутствует, и качество решения зависит от того, как разрешается отрывное течение. В то время как, в отрывной зоне работает подсеточная модель турбулентности LES.

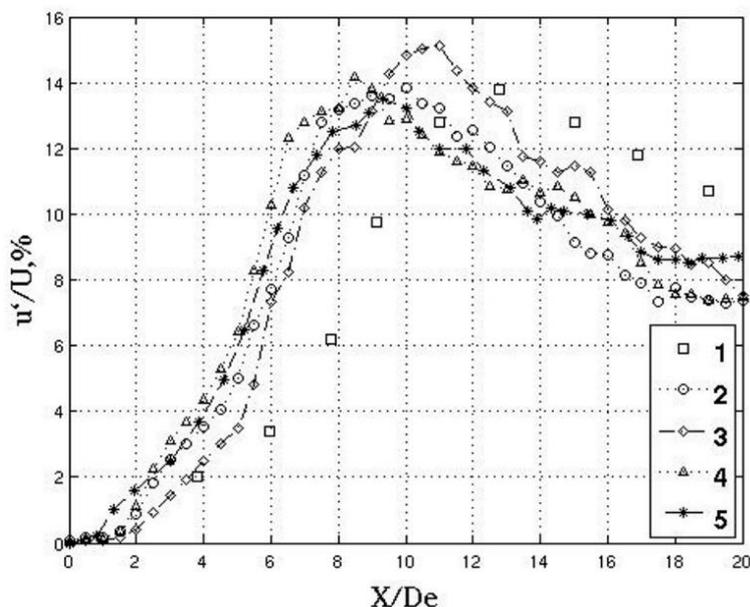


Рис. 4. Распределение пульсаций продольной скорости на оси струй:
 1 – экспериментальные данные [35], 2 – SA/EDES; 3 – SST/EDES,
 4 – SSG/LRR- ω /EDES, 5 – RANS/ILES [32]

Расчет обтекания тандема цилиндров

В последнее время аэродинамические шумы от фюзеляжа, в частности от выпущенных стоек шасси, стали основными источниками шума на этапе посадки летательных аппаратов. Одним из тестовых примеров при численном моделировании ближнего и дальнего акустических полей обтекания стойки шасси является обтекание тандема цилиндров. Экспериментальные исследования этой задачи были выполнены в Basic Aerodynamic Research Tunnel (BART) [36-38] и в Quiet Flow Facility (QFF) [39]. Экспериментальные данные широко обсуждаемы в работе [40, 41].

Для расчетов выбрана следующая постановка задачи: диаметры цилиндров $D = 0.05715$ м, расстояние между цилиндрами $L = 3.7D$, длина цилиндров по третьей координате составляет $3.7D$. Параметры набегающего потока соответствуют числу $Re = 1.66 \times 10^5$ при числе Маха $M = 0.128$. Микрофоны располагаются на расстоянии около $30D$ от обтекаемых цилиндров. На рис.5 представлена используемая в расчете сетка с усеченными шестигранниками. Ячейки с наименьшим размером сосредоточены в области между цилиндрами, в которой размер грани составляет 0.8 мм. Всего построенная модель содержит приблизительно 30 млн. ячеек. В качестве осредненных характеристик на рис. 5 и рис. 6 приводятся распределения осредненного коэффициента давления на цилиндрах, а также осредненной продольной скорости за ними соответственно.

Из рис. 5 видно, что результаты осредненного коэффициента давления на поверхностях цилиндра, полученные в расчете ближе к эксперименту BART, однако пиковые значения на втором цилиндре по потоку занижены. На рис. 6 показано хорошее согласие значений осредненной продольной скорости между двумя цилиндрами с экспериментальными данными. Отклонение от экспериментальных данных на рис. 6, по-видимому, обусловлено быстрым ростом размеров ячеек.

На рис. 7 приводятся спектры акустического давления в точках мониторинга. Точки мониторинга располагаются на поверхности цилиндра в азимутальном направлении.

Акустические нагрузки в дальнем поле в виде спектра пульсаций давления, зафиксированного микрофонами, приводятся на рис. 8.

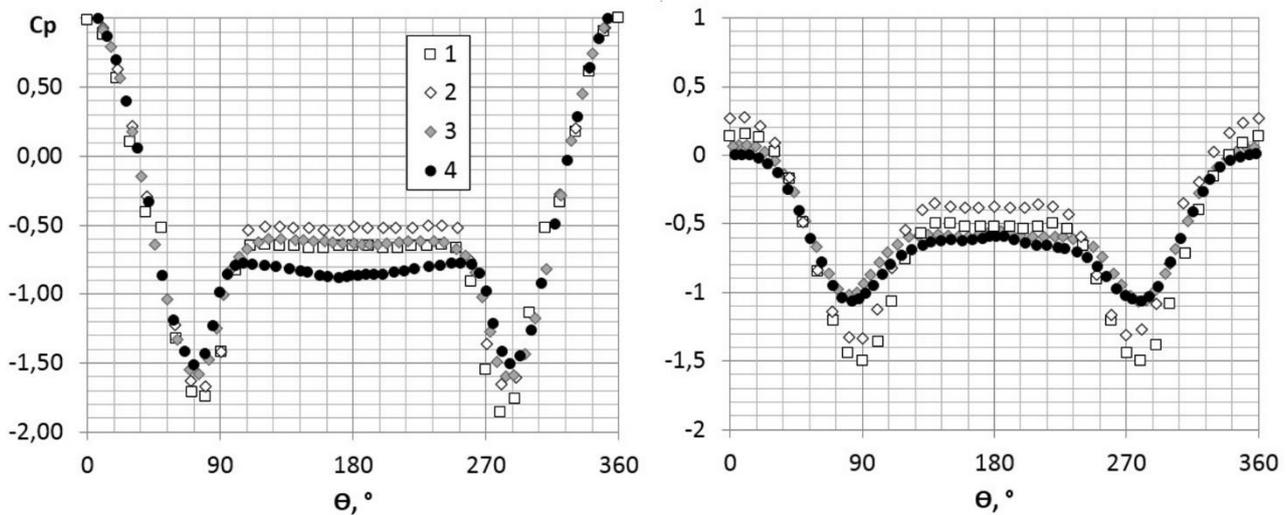


Рис. 5. Распределение осредненного коэффициента давления на первом (слева) и втором (справа) цилиндре вниз по потоку:

1 – экспериментальные данные BART,
2 – экспериментальные данные QFF; 3 – SSG/LRR- ω /EDES; 4 – SST/EDES

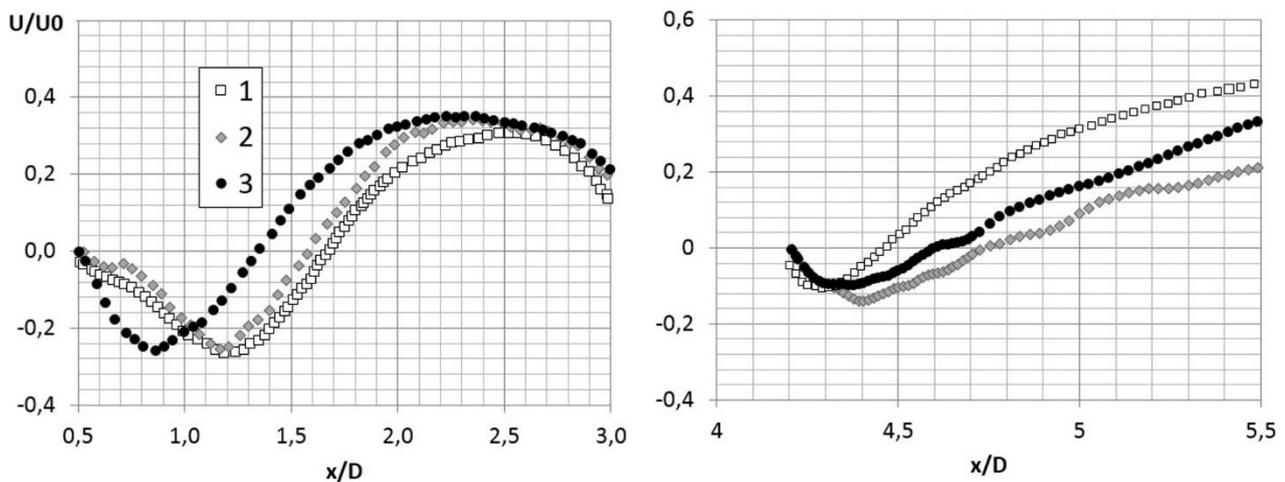


Рис. 6. Распределение безразмерной осредненной продольной скорости за первым (слева) и вторым (справа) цилиндром вниз по потоку:

1 – экспериментальные данные BART, 2 – SSG/LRR- ω /EDES; 3 – SST/EDES

Видно, что на всех рисунках уровень пульсаций давления, взаимное положение спектральных максимумов и наклоны спектров, полученных в расчете с моделью SSG/LRR- ω /EDES, хорошо согласуется с экспериментальными данными. На всех рисунках положения спектральных максимумов, полученные с помощью модели SST/EDES, смещены относительно экспериментальных данных. В то же время результаты, полученные с использованием модели SSG/LRR- ω /EDES, хорошо согласуются с экспериментальными данными по частоте и уровню воздействия.

Заключение

При обтекании каверны получено, что максимумы частотных спектров, полученные в результате расчетов с использованием моделей турбулентности SSG/LRR- ω /EDES, хорошо согласуются с экспериментальными данными по частоте и уровню воздействия. По уровню OASPL отличия результатов расчетов, полученные в ПК ЛОГОС, от экспериментальных данных не превышает 1,5 %.

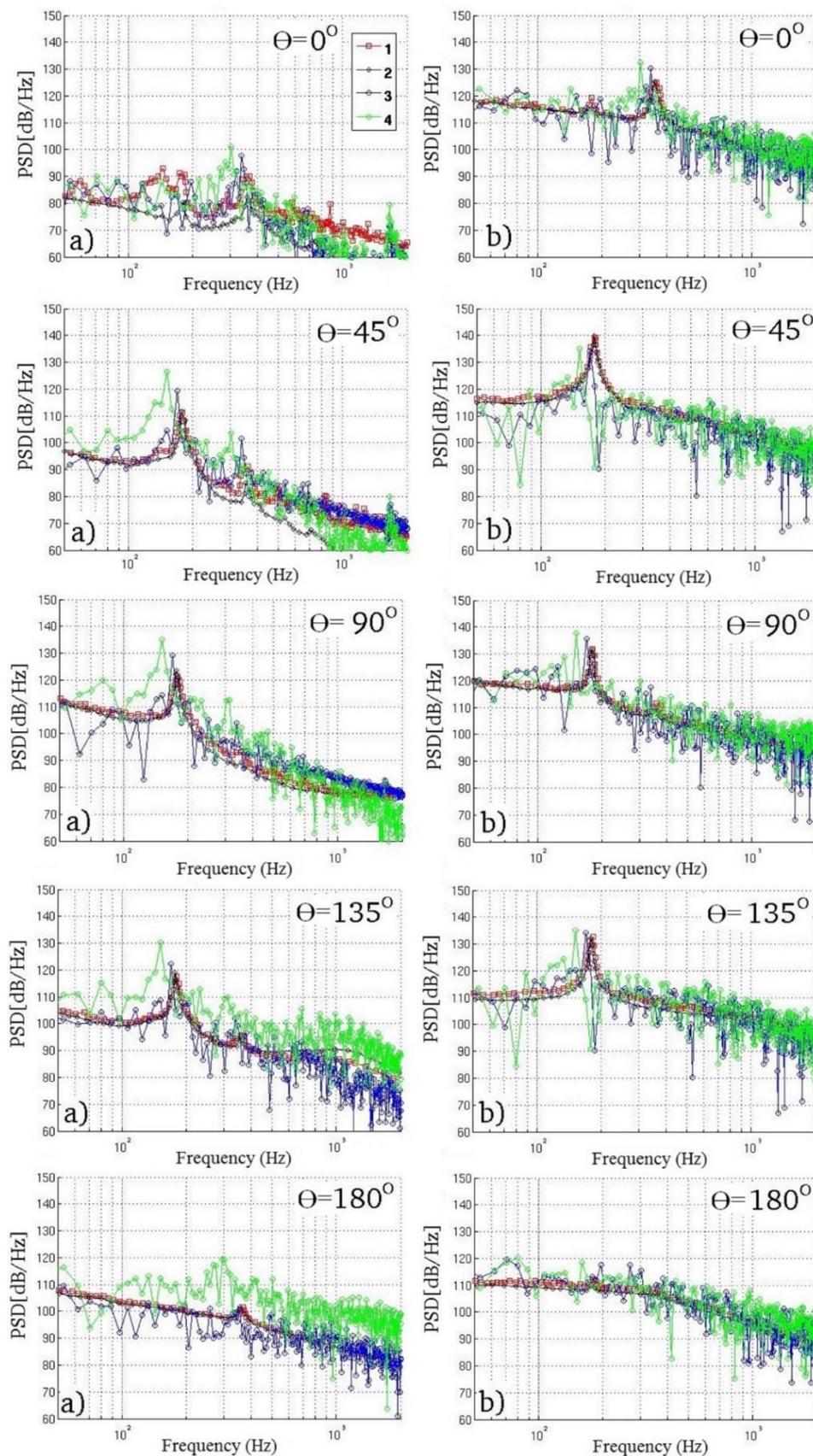


Рис. 7. Спектр давления на поверхности первого (слева) и второго цилиндров (справа) вниз по потоку:

1 – экспериментальные данные BART,

2 – экспериментальные данные QFF; 3 – SSG/LRR- ω /EDES; 4 – SST/EDES

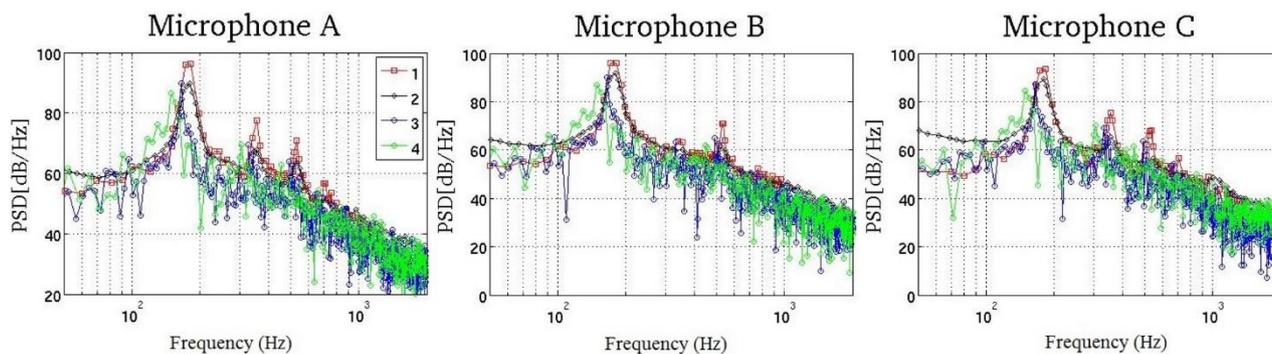


Рис. 8. Спектр акустического давления в точках мониторинга:
 1 – экспериментальные данные BART, 2 – экспериментальные данные QFF;
 3 – SSG/LRR- ω /EDES; 4 – SST/EDES

В задаче истечения холодной струи из сопла получено, что максимум пульсаций продольной скорости на оси струи для всех моделей турбулентности достигается приблизительно одновременно, на 3-4 калибра сопла раньше, чем в эксперименте.

В задаче обтекания тандемов цилиндров получено, что уровень пульсаций давления, взаимное положение спектральных максимумов и наклоны спектров, полученных в расчете с моделью SSG/LRR- ω /EDES в точках мониторинга, хорошо согласуется с экспериментальными данными по частоте и уровню воздействия.

Для исследования применимости моделирования характеристик нестационарных отрывных турбулентных течений и генерируемых ими акустических полей с использованием вихререзающей модели турбулентности на базе модели SSG/LRR- ω приводятся характерные задачи с отрывными течениями, которые являются своего рода Benchmark (эталонными тестами) для данного класса задач. На данных задачах показано, что результаты, полученные с помощью модели SSG/LRR- ω /EDES, хорошо согласуются с результатами расчетов, полученных с использованием известных вихререзающих моделей на основе моделей SA и SST, и с экспериментальными данными, что говорит о применимости модели SSG/LRR- ω /EDES для расчета данного класса задач.

Представленные результаты получены при поддержке гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ РФ НШ-2485.2020.5.

Библиографический список

1. **Гарбарук, А.В.** Современные подходы к моделированию турбулентности / А.В. Гарбарук, М.Х. Стрелец, А.К. Травин, М.Л. Шур. – СПб: Изд-во Политех. Ун-та, 2016. – 234 с.
2. **Strelets, M.** Detached eddy simulation of massively separated flow / M. Strelets // AIAA Paper № 0879, 2001.
3. **Козелков, А.С.** Моделирование турбулентных течений вязкой несжимаемой жидкости на неструктурированных сетках с использованием модели отсоединенных вихрей / А.С. Козелков, В.В. Курулин, О.Л. Пучкова, Е.С. Тятюшкина // Математическое моделирование. – 2014. – Т. 26. – №8. – С. 81-96.
4. **Козелков, А.С.** Численная схема для моделирования турбулентных течений несжимаемой жидкости с использованием вихререзающих подходов / А.С. Козелков, В.В. Курулин // Вычислительная математика и математическая физика. – 2015. – Т. 55. – № 7. – С. 135-146.
5. **Spalart, P.R.** A new version of detached – eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities / P.R. Spalart, S. Deck, M.L. Shur, K.D. Squires, M. Strelets, A. Travin // Theoretical and computational fluid dynamics. – 2006. – V. 20. – № 3, – P. 181-195.

6. **Spalart, P.R.** Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach / P.R. Spalart, W.H. Jou, M. Strelets, S.R. Allmaras // Proceedings of first AFOSR international conference on DND/LES, 1997.
7. **Garbaruk, A.** Jet noise computation based on enhanced DES formulations accelerating RANS-TO-LES transition in free shear layers / A. Garbaruk, M. Shur, P.R. Spalart, M. Strelets // Proceedings of the Third International Workshop «Computational Experiment in Aeroacoustics» Sept. 24-27, 2014, Svetlogorsk, Russia, – P. 123-127.
8. **Travin, A.** Physical and numerical upgrades in the detached-eddy simulation of complex turbulent flows / A. Travin, M. Shur, M. Strelets, P.R. Spalart // Fluid Mechanics and its Application, V.65. Advances in LES of Complex Flows, R. Friedrich, W. Rodi, (editors) / Proceedings of Euromech Coll. 412. Kluwer-Boston-London, 2002, – P. 239-245.
9. **Probst, A.** Detached – eddy simulation of aerodynamic flow using a Reynolds – stress background model and algebraic RANS/LES sensor / A. Probst, R. Radespiel, T. Knopp // AIAA Paper № 3206, 2011.
10. **Travin, A.** Physical and numerical upgrades in the detached-eddy simulation of complex turbulent flows / A. Travin, M. Shur, M. Strelets, P.R. Spalart // Fluid Mechanics and its Application, V.65. Advances in LES of Complex Flows, R. Friedrich, W. Rodi, (editors) / Proceedings of Euromech Coll. 412. Kluwer-Boston-London, 2002, – P. 239-245.
11. **Probst, A.** Detached – eddy simulation of aerodynamic flow using a Reynolds – stress background model and algebraic RANS/LES sensor / A. Probst, R. Radespiel, T. Knopp // AIAA Paper № 3206, 2011.
12. **Schmidt, S.** Detached Eddy Simulation of Flow around an Airfoil / S. Schmidt, F. Thiele // Flow, Turbulence and Combustion. – 2003. – V. 71. – P. 261-278,
13. **Стрелец, М.Х.** Метод моделирования отсоединенных вихрей для расчета отрывных турбулентных течений: предпосылки, основная идея и примеры применения / М.Х. Стрелец, А.К. Травин, М.Л. Шур, Ф.П. Спаларт // Научно-технические ведомости 2' 2004 «Проблемы турбулентности и вычислительная гидродинамика (к 70-летию кафедры «Гидроаэродинамика»)».
14. **Wokoeck, R.** RANS Simulation and Experiments on the Stall Behaviour of an Airfoil with Laminar Separation Bubbles / R. Wokoeck, N. Krimmelbein, R. Radespiel, V. Ciobaca, A. Krumbein // AIAA Paper № 0244, 2006.
15. **Wilcox, D.C.** Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence model / D.C. Wilcox // AIAA Journal. – 1988. – V. 26(11). – P. 1299-1310.
16. **Cecora, R.-D.** Differential Reynolds stress modeling for aeronautics / R.-D. Cecora, B. Eisfeld, A. Probst, S. Crippa, R. Radespiel // AIAA Paper № 0465, 2012.
17. **Jakirlic, S.** A new approach to modeling near – wall turbulence energy and stress dissipation / S. Jakirlic K. Hanjalic // Journal of fluid mechanics. – 2002. – V. 459. – P. 139-166.
18. **Menter, F.R.** Explicit Algebraic Reynolds Stress Models for Anisotropic Wall-Bounded Flows / F.R. Menter, A.V. Garbaruk, Y. Egorov // Journal of Computational Physics. – 2011. – V. 3. – P. 89-104.
19. **Жучков, Р.Н.** Объединение дифференциальной модели рейнольдсовых напряжений SSG/LRR- ω с моделями отсоединенных вихрей и ламинарно-турбулентного перехода / Р.Н. Жучков, А.А. Уткина // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2016. – Т. 51. – № 6. – С. 25-35.
20. **Deryugin, Yu.N.** Specific features of the chimera calculation methodology implemented for unstructured grids / Yu.N. Deryugin, A.V. Sarazov, R.N. Zhuchkov // Mathematical Model and Computer Simulations. – 2017. – V. 9. – Issue 5. – P. 587-597.
21. **Галанов, Н.Г.** Моделирование теплокомфорта человека средствами программного комплекса ЛОГОС / Н.Г. Галанов, Р.Н. Жучков // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. – 2018. – № 2. – С. 62-71.
22. **Deryugin, Yu.N.** On flow field of the system of supersonic jets in the Mars atmosphere / Yu.N. Deryugin, D.K. Zelensky, R.N. Zhuchkov, Y.V. Yemelyanova, G.A. Pavlov, A.L. Smirnov // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2019. – V. 134. – P.1084-1090.
23. **Стрелец, Д.Ю.** Исследование трансзвукового обтекания летательных аппаратов с использованием различных численных моделей турбулентности / Д.Ю. Стрелец, А.В. Корнев, А.С. Козелков, Д.А. Останко, А.А. Уткина // Журнал «Полет». – 2017. – № 9-10. – С. 12-19.
24. **Уткина, А.А.** Применение схемы с гибридной диссипацией в решении задач вычислительной аэроакустики / А.А. Уткина, Р.Н. Жучков, Ю.Н. Дерюгин, Я.В. Емельянова // Журнал Вычислительной математики и математической физики. – 2018. – Т 58, – № 9. – С. 1478-1487.
25. **Погосян, М.А.** Применение отечественных суперкомпьютерных технологий для создания перспективных образцов авиационной техники / М.А. Погосян, Е.П. Савельевских, Р.М. Шагалиев,

- А.С. Козелков, Д.Ю. Стрелец, А.А. Рябов, А.В. Корнев, Ю.Н. Дерюгин, В.Ф. Спиридонов, К.В. Циберев // Журнал ВАИТ, сер. Математическое моделирование физических процессов. – 2013. – Вып. 2. – С. 3-17.
26. **Betelin, V.B.** Mathematical simulation of hydrogen–oxygen combustion in rocket engines using LOGOS code / V.B. Betelin, R.M. Shagaliev, S.V. Aksenov, I.M. Belyakov, Yu.N. Deryugin, A.S. Kozelkov, D.A. Korchazhkin, V.F. Nikitin, A.V. Sarazov, D.K. Zelenskiy // *Acta Astronautica*. – 2014. – V. 96. – P. 53–64.
27. **Menter, F.R.** Zonal two – equation $k - \omega$ turbulence models for aerodynamic flows / F.R. Menter // AIAA Paper № 2906, 1993.
28. **Garbaruk, A.** Jet noise computation based on enhanced DES formulations accelerating RANS-TO-LES transition in free shear layers / A. Garbaruk, M. Shur, P.R. Spalart, M. Strelets // Proceedings of the Third International Workshop «Computational Experiment in Aeroacoustics» Sept. 24-27, 2014, Svetlogorsk, Russia. – P. 123-127.
29. **Comte-Bellot, G.** Simple Eulerian time correlation of full- and narrow-band velocity signals in grid-generated, isotropic turbulence / G. Comte-Bellot, S. Corrsin // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1971. – V. 48, – No. 2, – P. 273-337.
30. **Henshaw, M. J. de C.** M219 cavity case. In: «Verification and validation data for computational unsteady aerodynamics» / M.J. de C. Henshaw. – P. 453-472, Tech. Rep. RTO-TR-26, AC/323(AVT)TP/19, QinetiQ, UK, 2002.
31. **Haase, W.** DESider – A European Effort on Hybrid RANSLES Modelling / W. Haase, M. Braza, A. Revell // Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design. – V. 103, Springer, 2009.
32. **Benderskiy, L.A.** Investigation of flow parameters and noise of subsonic and supersonic jets using RANS/ILES high resolution method / L.A. Benderskiy, D.A. Lyubimov // Proceedings of 29th congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. Sept. 7-12, St. Petersburg, Russ., 2014.
33. **Bridges, J.** Parametric Testing of Chevrons on Single Flow Hot Jets / J. Bridges, C.A. Brown // AIAA Paper № 2824, 2004.
34. **Liu, J.** Large-Eddy Simulations of a supersonic heated jet / J. Liu, K. Kailasanath, D. Munday, H. Nick, E. Gutmark // AIAA Paper № 2884, 2011.
35. **Bridges, J.** Establishing Consensus Turbulence Statistics for Hot Subsonic Jets / J. Bridges, M. Wernet // AIAA Paper № 3751, 2010.
36. **Jenkins, L.N.** Characterization of unsteady flow structures around tandem cylinders for component interaction studies in airframe noise / L.N. Jenkins, M.R. Khorrami, M.M. Choudhari, C.B. McGinley // AIAA Paper 2005-2812, 2005.
37. **Jenkins, L.N.** Measurements of unsteady wake interference between tandem cylinders / L.N. Jenkins, D.H. Neuhart, McGinley C. B., Khorrami M.R. // AIAA Paper 2006-3202, 2006.
38. **Neuhart, D.H.** Measurements of the flowfield interaction between tandem cylinders / D.H. Neuhart, L.N. Jenkins, M.M. Choudhari, M.R. Khorrami // AIAA Paper 2009-3275, 2009.
39. **Hutcheson, F.V.** Noise radiation from single and multiple rod configurations / F.V. Hutcheson, T.F. Brooks // AIAA Paper 2006-2629, 2006.
40. **Lockard, D.P.** Summary of the tandem cylinder solutions from the benchmark problem for airframe noise computations-I workshop / D.P. Lockard // AIAA Paper 2011-353, 2011
41. **Bres, G.A.** Flow and noise predictions for the tandem cylinder aeroacoustic benchmark / G.A. Bres, D. Freed, M. Wessels, S. Noelting, F. Perot // *Journal Physics of Fluids*. – 2012. – V. 24(3). – P. 036101-1-25.

*Дата поступления
в редакцию: 18.05.2020*

A.A. Utkina^{1,2}

**SSG/LRR- ω RSM MODEL APPLICATION
FOR TRANSITIONAL DETACHED FLOW MODELLING**

Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics
(RFCN–VNIIEF)¹

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev²

Purpose: This paper discusses results of a numerical investigation of unsteady separated turbulent flows' characteristics modeling and the acoustic fields generated by them using a detached-eddy turbulence model based on the SSG/LRR- ω model.

Design/methodology/approach: The study is based on the SSG/LRR- ω /EDES model which combines the detached-eddy model (EDES) with the SSG/LRR- ω model.

Results: The numerical simulations of benchmarks with separated flows were carried out. It was shown that the results obtained using the SSG/LRR- ω /EDES model are in good agreement with the experimental data and with the calculations results obtained using the known detached-eddy turbulence models based on SA and SST models.

Area of applicability: The specifics of unsteady separated turbulent flows characteristics modeling and the acoustic fields generated by them using a detached-eddy turbulence model based on the SSG/LRR- ω model.

Key words: SSG/LRR- ω RSM turbulence model, detached-eddy simulation, SSG/LRR- ω /EDES, cavity M219, jet SMC000, tandem cylinder.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.039.534

А.В. Безносков, Т.А. Бокова, П.А. Боков, А.Р. Маров, А.В. Львов, Н.С. Волков

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ РЕАКТОРНОГО КОНТУРА УСТАНОВОК БРС-ГПГ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ С ТЯЖЕЛЫМ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ ДЛЯ НАЗЕМНЫХ И ПЛАВУЧИХ АЭС

Нижегородский государственный технический университете им. Р.Е. Алексеева

Представлен анализ научно-технической информации по опыту создания и эксплуатации реакторной установки (РУ) со свинец-висмутовым теплоносителем и опыту проектирования РУ БРЕСТ и СВБР со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителем соответственно. Приведены результаты научно-теоретических и экспериментальных исследований в рамках разрабатываемых в НГТУ РУ малой и средней мощности «Быстрый реактор свинцовый с горизонтальными парогенераторами» (БРС-ГПГ). Представлены описания основных узлов и агрегатов установки, обоснован выбор вида теплоносителя. Предлагаемая структурная схема реакторного контура позволяет достигать максимального эффекта естественной циркуляции Pb или PbBi, что гарантирует обеспечение надежности, безопасности и расширения эксплуатационных возможностей РУ. Анализ результатов работ по моделированию одной из наиболее потенциально опасных аварий в РУ с ТЖМТ – «большая течь парогенератора» дает понимание о необходимости изменения традиционной компоновки парогенерирующих поверхностей (РУ АПЛ, БРЕСТ, СВБР). Такая компоновка позволяет исключить попадание воды в АЗ реактора, переопрессовку первого контура, срыв крышки бака реакторной установки и др. Рассмотрены варианты систем технологии свинцового и свинцово-висмутового теплоносителей применительно к реакторным установкам с ТЖМТ. Обоснована целесообразность применения характеристик активной зоны применительно к РУ БРС-ГПГ, аналогичным принятым для РУ СВБР или БРЕСТ-ОД-300. Предложена система расхолаживания реактора и обеспечения стояночных режимов РУ, исследуются ее характеристики, отрабатываемые на стендах НГТУ.

Ключевые слова: быстрый реактор, ТЖМТ, БРС-ГПГ, аварийная ситуация «Течь ПГ», естественная циркуляция, естественная безопасность, технология теплоносителя, плавучая атомная станция.

Введение

В настоящее время растет интерес к атомным станциям с реакторами малой и средней мощности применительно к труднодоступным и малоосвоенным регионам. Этот факт инициирует теоретические и экспериментальные работы по разработке эволюционных, передовых проектных и эксплуатационных решений энергетических установок с реакторами четвертого поколения на быстрых нейтронах, охлаждаемых расплавами Pb и PbBi. Данные решения основываются на уникальном отечественном опыте создания и эксплуатации наземных стендов-прототипов (27ВТ, 27ВТ-5, КМ1), опытных (АПЛ пр. 645) и серийных (АПЛ пр.705 и 705К) РУ со свинцово-висмутовым теплоносителем, а также опыте работ, направленных на создание энергоблоков атомных станций различного назначения со свинцовым (БРЕСТ) [1] и свинцово-висмутовым (СВБР) [2] теплоносителями. Эти эволюционные решения дают возможность реализовать принципы «естественной безопасности» [1] к перспективным РУ с ТЖМТ. Определение принципа естественной безопасности было приведено в «Стратегии развития атомной энергетики России в первой половине XXI в.», одобренной Правительством РФ 25 мая 2000 г. Преимущества реакторных установок четвертого поколения по сравнению с другими продемонстрированы в научных работах сотрудников ведущих предприятий и институтов атомной отрасли, в том числе – НГТУ [1-6].

В НГТУ продолжают исследования в подтверждение разработанных технических решений и начальный этап проработки установки с реактором на быстрых нейтронах с горизонтальными парогенераторами (БРС-ГПГ), охлаждаемыми свинцовым или свинцово-висмутовым теплоносителем в мощном диапазоне от 50 до 250 МВт (эл.), в том числе – и для плавучих атомных станций.

В настоящей работе представлены результаты анализа и комплекса исследований, направленных на обоснование новых, нетрадиционных технических решений РУ БРС-ГПГ (схемы циркуляции в реакторном контуре, тип парогенераторов, отвод тепловыделений от реакторного контура в стояночных и аварийных режимах и др.)

Выбор теплоносителя для БРС-ГПГ

Применение свинца в качестве теплоносителя энергетического реактора малой и средней мощности (такого, как БРС-ГПГ) является более обоснованным, чем эвтектики свинец-висмут, исходя из критериев безопасности и экономичности. Эвтектика, по сравнению со свинцом, имеет высокий уровень активности при работе РУ по ^{210}Po , где полония в 20 000 раз больше [5]. Наличие полония при нормальной эксплуатации и герметичном контуре никакой опасности не несет, однако при перегрузках АЗ, плановых ремонтных работах и аварийных ситуациях с разгерметизацией контура возникают угрозы радиоактивного загрязнения окружающей среды и здоровью персонала [7]. Работа энергетического реактора со свинцом в этом смысле более безопасна, хотя для исследовательских РУ и ускорительно-управляемых систем данный фактор несущественен ввиду того, что в них образуется и множество других существенно более биологически опасных материалов.

Свинцово-висмутовый теплоноситель также имеет меньший потенциал окислительно-восстановительных реакций по сравнению со свинцовым теплоносителем. Особенно остро эта проблема стоит при снижении эксплуатационных температурных интервалов до 250-300 °С, что актуально для ускорительно-управляемых систем. В силу этого в РУ со свинцом-висмутом тяжелее поддерживать оптимальную термодинамическую активность кислорода в теплоносителе, что может вызывать аварийное раскисление или забивание оксидами контура [5, 7], что недопустимо с точки зрения безопасной эксплуатации. Помимо этого, висмут имеет в десятки раз большую стоимость, чем у свинца.

При всех недостатках эвтектический сплав свинец-висмут более совместим с водой в качестве рабочего тела в цикле Ренкина. Температура плавления эвтектики свинец-висмут – 123 °С. При данной температуре давление насыщенного пара составляет 0,23 МПа. Это позволяет надежно отводить тепло водой при давлении более 0,3 МПа без замораживания эвтектики от всего оборудования РУ с данным теплоносителем. В свою очередь, это дает возможность расхолаживать реакторную установку и при необходимости обогревать элементы контура водой и паром в стояночных и переходных режимах с исключением застывания эвтектического теплоносителя. В реакторной установке со свинцовым теплоносителем при отводе тепла в переходных, стояночных и ремонтных режимах необходимо поддерживать давление воды, которым отводится это тепло, выше 12,3 МПа, так как при данном давлении вода находится на линии насыщения при температуре 326 °С – температура плавления свинца [6]. Снижение давления приводит к «замерзанию» теплоносителя. Поддерживать такое высокое давления по воде в полостях парогенератора или в иных теплообменниках в переходных, стояночных и ремонтных режимах очень сложно и практически невозможно. Для преодоления данной трудности коллектив НГТУ предлагает некоторые технические решения, о которых будет сказано далее. Богатый опыт работы на статических и циркуляционных стендовых установках с расплавами свинца и эвтектики свинец-висмут показывает, что нет принципиальной разницы в их эксплуатации при поддержании определенных уровней температур контуров электрическим обогревом.

По прочим характеристикам свинцовый и свинцово-висмутовый теплоносители реакторных установок практически одинаковы.

Особенности циркуляционной схемы теплоносителя реакторного контура

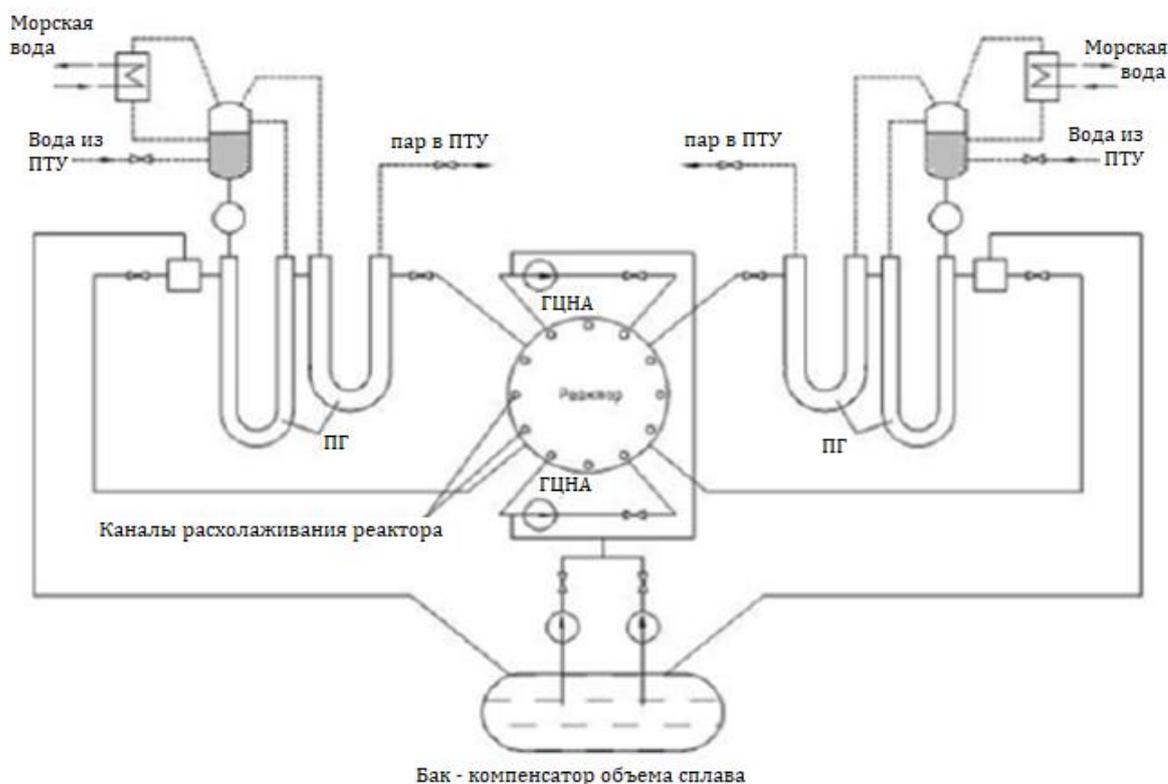


Рис. 1. Принципиальная схема РУ проекта 705К

Реакторные установки стандов-прототипов и АПЛ со свинцово-висмутовым теплоносителем были выполнены в петлевой компоновке (рис. 1), что создавало высокие гидравлические сопротивления по всему контуру, проблемы с забиванием относительно малых проходных сечений многочисленных трубопроводов, парогенераторов (ПГ), активной зоны (АЗ) и пр. контура шлаками и «замершим» теплоносителем. В связи с этим возникли задачи проектирования главных циркуляционных насосов (ГЦН) с большим напором и малым расходом, прежде всего – центробежных, введения бака-компенсатора объема, что еще больше увеличивало сопротивление. Появилась необходимость разработки методов поддержания технологии теплоносителя, обогрева контура в стояночных и переходных режимах. Также маловероятна или невозможна естественная циркуляция теплоносителя.

Существующие проекты БРЕСТ и СВБР со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями соответственно имеют баковую (интегральную) компоновку контура (рис. 2, 3), что позволяет значительно уменьшить общее гидравлическое сопротивление трассы циркуляции, а также многократно повысить возможность естественной циркуляции теплоносителя. Имеется возможность использовать осевые или диагональные ГЦН с низким напором и большим расходом. Такие насосы имеют намного меньшие массогабаритные характеристики по сравнению с центробежными насосами при одинаковом расходе. Упрощается задача обогрева одного большого корпуса РУ по сравнению с многочисленными трубопроводами петлевой РУ. Снижается вероятность забивания шлаками больших проходных сечений интегрального контура, относительно малых проходных сечений петлевого контура. Нет необходимости введения отдельного бака-компенсатора объема, так как в баке реакторной установки имеется свободный уровень теплоносителя, из-за чего бак сам по себе является компенсатором.

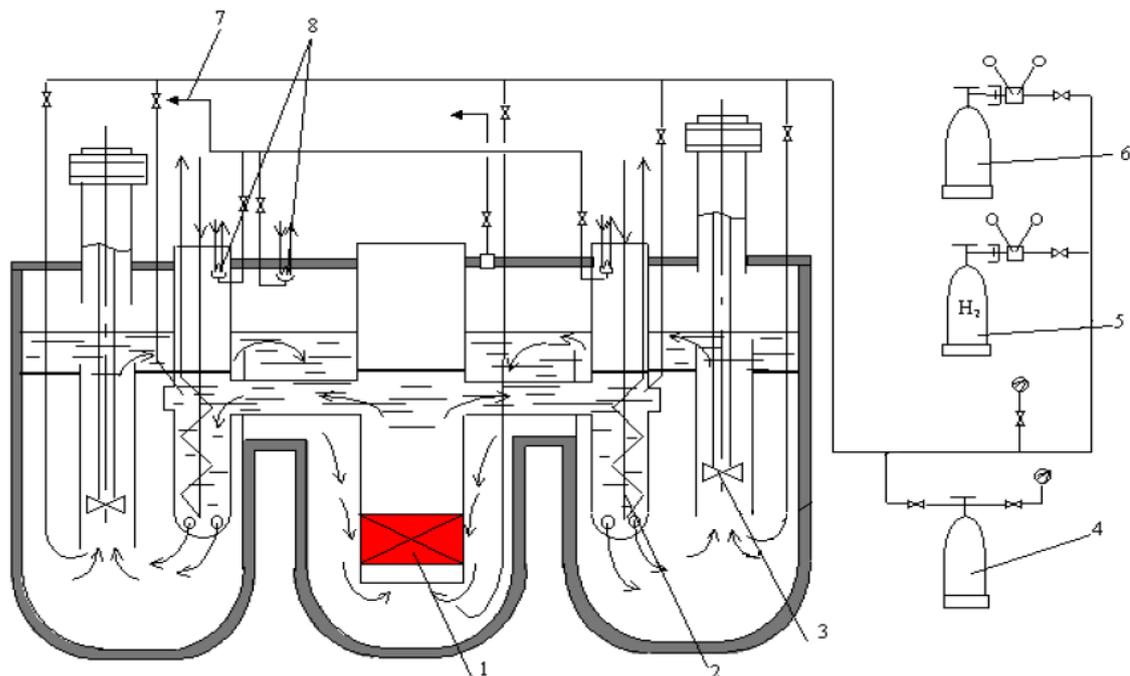


Рис. 2. Принципиальная схема реакторного контура РУ БРЕСТ-ОД-300 [1]

- 1 – активная зона; 2 – парогенератор; 3 – главный циркуляционный насос;
 4 – баллон с газовой смесью; 5 – баллон с водородом; 6 – баллон с аргоном;
 7 – линия отвода конденсата в цистерну «грязных вод»; 8 – конденсаторы водяного пара

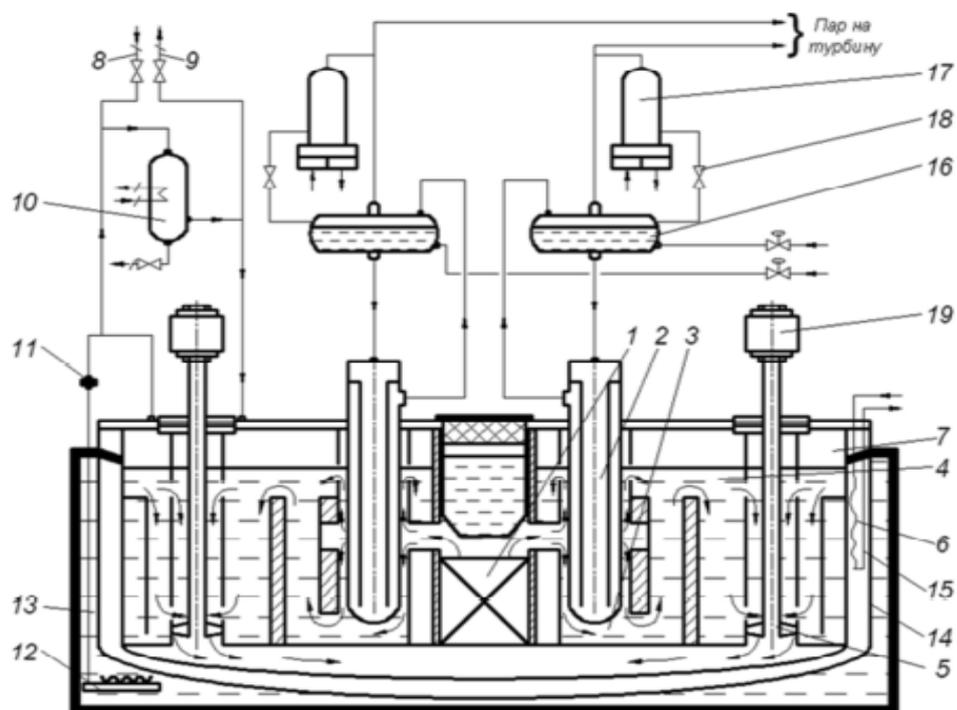


Рис. 3. Принципиальная схема реакторного контура РУ СВБР-100 [4]

- 1 – АЗ; 2 – ПГ; 3 – нижний коллектор ПГ; 4 – верхний коллектор ПГ;
 5 – главный циркуляционный насос; 6 – свободный уровень теплоносителя;
 7 – газовый объем блока; 8 – трубопровод подвода газа; 9 – трубопровод сброса газа;
 10 – аварийный конденсатор; 11 – разрывная мембрана; 12 – барботажное устройство;
 13 – водяной объем бака системы пассивного отвода тепла; 14 – страховочный кожух;
 15 – оборудование парового обогрева; 16 – сепаратор; 17 – конденсатор расхолаживания;
 18 – запорно-регулирующий клапан; 19 – электродвигатель насоса

Компоновка предлагаемой РУ имеет предпосылки улучшения гидравлических характеристик контура по сравнению с контурами современных РУ с ТЖМТ, что позволяет снизить гидравлическое сопротивление контура циркуляции.

Если сравнивать БРЕСТ, СВБР и БРС-ГПП, очевидно преимущество последнего за счет того, что контур циркуляции на каждой петле теплообмена имеет только по одному подъемному и опускному участку движения теплоносителя [8]. Такое техническое решение позволяет качественно снизить общее гидравлическое сопротивление трассы. Тогда как в РУ БРЕСТ и СВБР имеется по два таких участка контура циркуляции, что увеличивает его гидравлическое сопротивление. Количественная оценка данного выигрыша будет проведена в будущем. Циркуляция теплоносителя осуществляется следующим образом. Проходя активную зону, теплоноситель аккумулирует теплоту, заключенную в топливе, далее расплав свинца направляется в парогенератор, который разделен на две секции – пароперегревательную и испарительную, где имеется свободный уровень Рв, где отдает тепло. Далее он идет через ГЦН обратно в активную зону, и контур замыкается (рис. 4-б).

Предложенный авторами вариант конструкции первого контура позволяет развивать эффективную естественную циркуляцию, что повышает безопасность РУ, поскольку обеспечивает гарантированный теплосъем остаточных энерговыделений активной зоны. Также можно говорить и о повышении экономичности установки в целом за счет увеличения ее удельной мощности, так и за счет снижения массогабаритных свойств РУ БРС-ГПП.

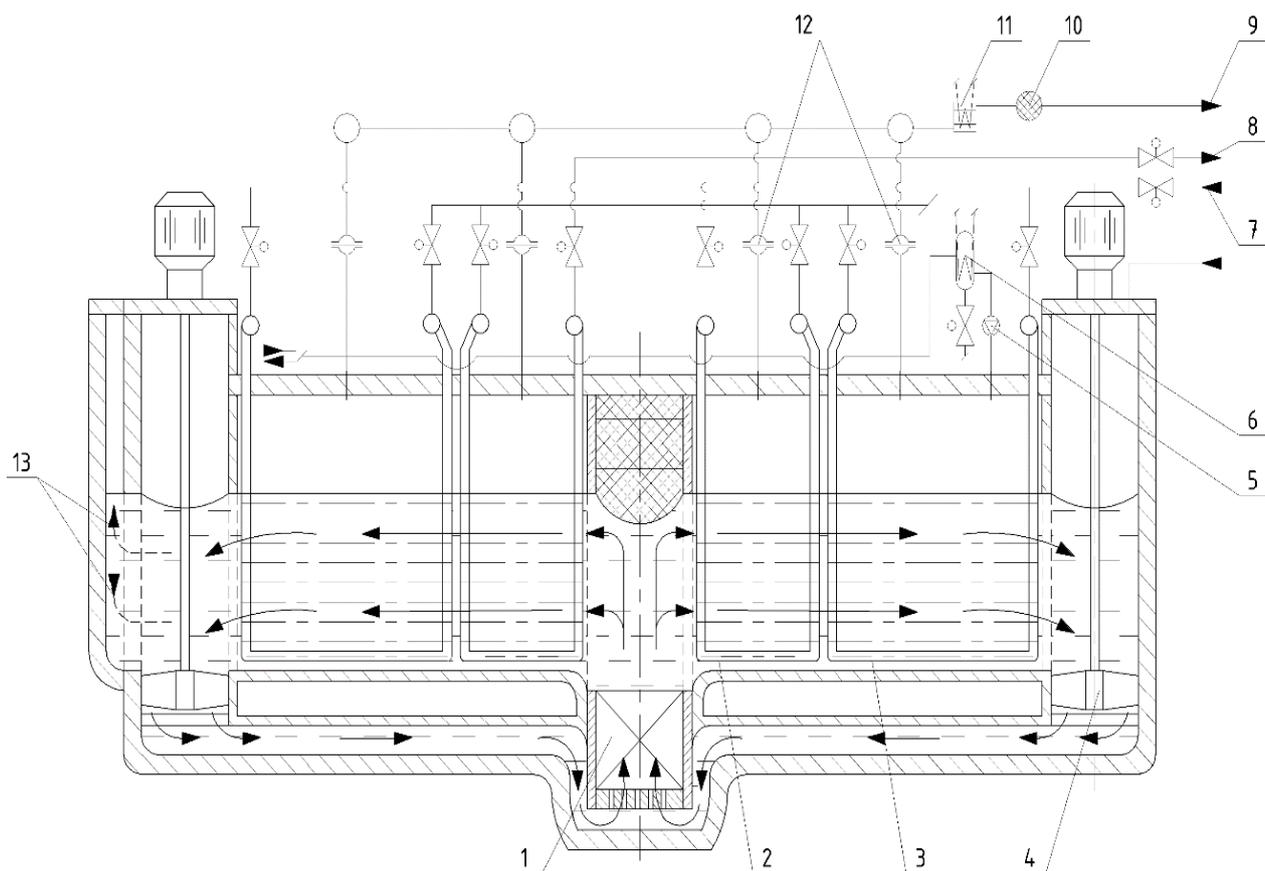


Рис. 4. Конструктивная схема БРС-ГПП [6]

- 1 – АЗ; 2 – пароперегреватель; 3 – испаритель; 4 – главный циркуляционный насос;
 5 – газодувка; 6 – аварийный конденсатор; 7 – подвод питательной воды;
 8 – пар на турбину; 9 – сброс газа в атмосферу; 10 – фильтр; 11 – конденсатор;
 12 – мембрана разрывная; 13 – к системе стоячного и аварийного теплоотвода

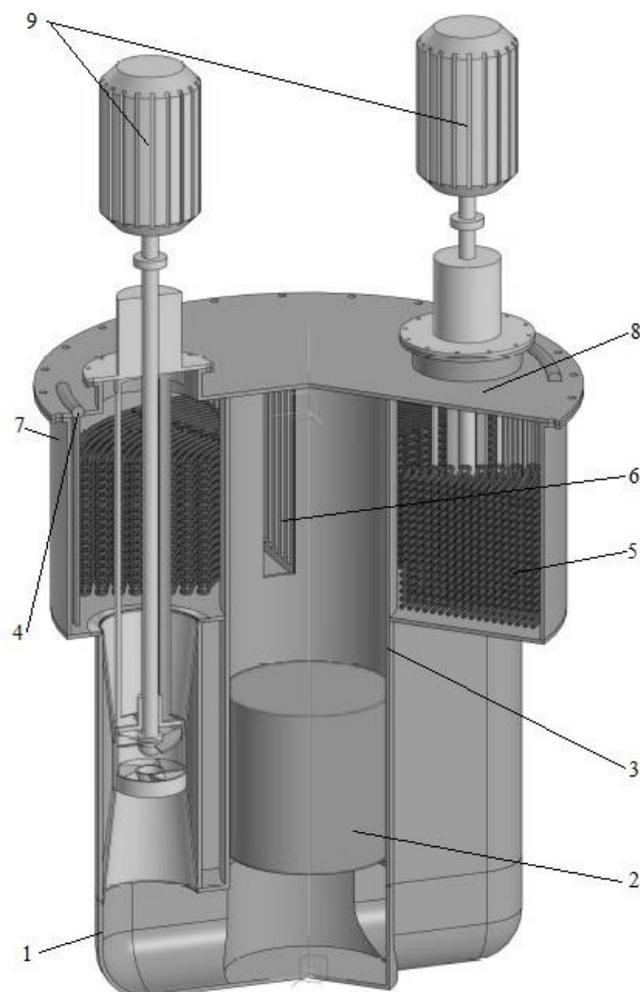


Рис. 5. Модель реакторного контура БРС-ГПГ

1 – корпус реактора; 2 – активная зона; 3 – шахта активной зоны;
4 – система стояночного и аварийного отвода тепла; 5 – секция ПГ;
6 – раздаточный коллектор; 7 – обечайка ПГ; 8 – крышка РУ; 9 – ГЦН

Обеспечение безопасности ядерной энергетической установки при аварийной ситуации «Большая неплотность ПГ»

В 2007-2013 гг. в НГТУ проводился ряд научно-технических работ по определению характеристик «легкой» фазы (вода, пар, аргон, водород и др.) при вводе ее с различными расходами под свободный уровень расплавов свинца и эвтектического сплава свинец-висмут. При этом сопло истечения заглублялось на большие глубины в условиях эксперимента (до четырех метров). Перепад давления в сопле достигался значений восемь Мпа, температура теплоносителя при проведении испытаний – 600 °С.

Экспериментами было зафиксировано, что «лёгкая» фаза создаёт прямой канал истечения от сопла истечения до свободного уровня теплоносителя (кризис барботажа второго рода), вне зависимости от параметров исходной циркуляции ТЖМТ [4, 9]. При этом скорость фронта раздела ТЖМТ и «легкой фазы» на удалении от места истечения достигала 30 м/с. Во время экспериментов возникали большие динамические нагрузки на конструктивные элементы стенда, которые в некоторых случаях приводили к их разрушению.

Анализируя результаты проведенных работ одной из наиболее потенциально опасных аварий в реакторных установках с ТЖМТ – «большая течь парогенератора», можно сделать вывод, что данная авария может привести к разрушениям при высоте столба ТЖМТ 1,5 м и выше, по ходу которого пароводяная смесь может «разогнаться» до опасных скоростей. Такая ситуация может возникнуть в РУ БРЕСТ и СВБР, где парогенерирующие блоки расположены вертикально. Что бы избежать «разгона» смеси «ТЖМТ – пароводяная смесь» в РУ БРС-ГПГ предлагается конструкция горизонтального парогенератора, в котором змеевики находятся под минимальным уровнем теплоносителя (мин. 1,0 м), а объем газовой полости над свободным уровнем превышает или равен объему жидкого металла [10]. Такое решение в случае аварийного разрушения («большой течи») трубной системы ПГ даже при наибольшем расходе аварийного потока пара обеспечивает минимальные последствия при самоорганизации парового канала от места разрыва трубной системы до газового (парогазового) объема, находящегося над свободным уровнем свинца. Далее пар из аварийного парогенератора через разрывную мембрану направляется в конденсатор. Образованный конденсат удаляется через систему «грязных вод», а газ удаляется через систему газоочистки в атмосферу [5, 9].

Эти и многие другие технические решения вопросов безопасности придают БРС-ГПГ новые более высокие уровни безопасности, которые другие РУ не имеют.

Конструктивные особенности парогенератора

Отличительной чертой компоновок U-образного типа парогенераторов транспортных РУ было продольное обтекание труб этого теплообменника. Парогенератор проекта СВБР имеет трубки Фильда [2]; а ПГ РУ БРЕСТ – змеевиковые с малым угломгиба змеевика. Такие ПГ имеют вертикальную компоновку с достаточно большим заглублением труб (рис. 2, 3). При такой компоновке авария «большая течь ПГ» становится наиболее опасной, так как столб пароводяной смеси на большом заглублении может иметь достаточный запас энергии для срыва крышки бака реакторного блока. «В парогенераторах реакторных установок БРС-ГПГ конструкция трубной системы парогенератора имеет максимальное заглубление под свободный уровень ТЖМТ, например, в виде системы плоских змеевиков. Концы труб секций парогенератора заделываются в трубные доски водяных и паровых камер верхней плиты реакторного блока. В НГТУ выполнены работы по экспериментальному определению характеристик теплообмена горизонтальной трубной системы, при обтекании ее высокотемпературным свинцовым теплоносителем» [6].

Авторами предложены компоновочные и технические решения парогенераторов для плавучих атомных станций, судов и кораблей с РУ БРС-ГПГ [11]. В НГТУ предлагается компоновка парогенераторов, при которой теплообменная поверхность «затоплена» теплоносителем полностью и ограничена сверху крышкой, т. е. над ПГ нет свободной поверхности теплоносителя. Над активной зоной выше коллектора, из которого теплоноситель поступает в парогенераторы, расположена свободная поверхность, через которую проходят элементы конструкций СУЗ реактора. В кессонах насосов так же имеется свободный уровень, расположенный выше крышки парогенератора, из которого теплоноситель поступает в насосы. Оси двух насосов располагаются в диаметральных плоскостях ядерной энергетической установки и плавучих атомных станций, судов и кораблей.

В совокупности предложенные решения позволяют уменьшить площадь свободной поверхности по сравнению с наземными РУ БРС-ГПГ, исключить возможность осушения парогенератора и активной зоны и ограничить осушение элементов насосов до приемлемых пределов при качках и ограниченных дифферентах. Это, в свою очередь, позволит сделать ядерную энергетическую установку плавучих атомных станций, судов и кораблей более безопасной.

Для обеспечения безопасности при аварии «большая течь ПГ» крышку над полностью затопленными секциями ПГ выполняются в виде мембраны, над которой имеется газовая полость, сообщенная через разрывную мембрану с конденсатором, газовый объем которого сообщен с атмосферой через систему газоочистки. При этом отсутствует вероятность силового воздействия на крышку реакторного блока. При аварии «малая течь ПГ» мембрана не разрывается, а малый объем пароводяной смеси скапливается под мембраной и с потоком ТЖМТ уносится на свободную поверхность теплоносителя над кессоном насоса, газовая полость которой сообщена аварийными конденсаторами пара и газодувкой.

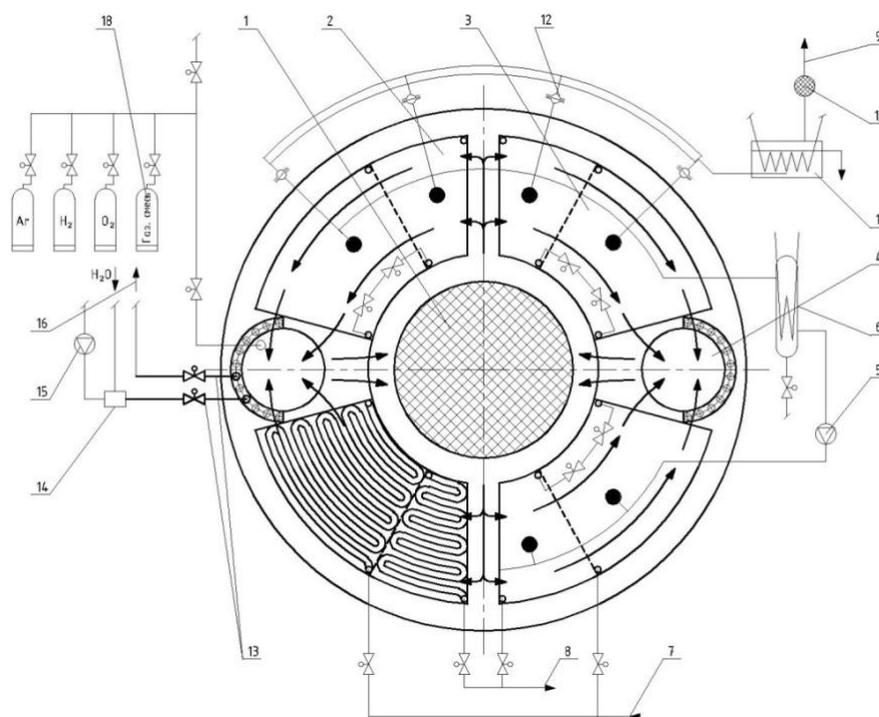


Рис. 6. Принципиальная схема реакторного контура БРС-ГПГ вид сверху

- 1 – активная зона; 2 – пароперегреватель; 3 – испаритель;
 4 – главный циркуляционный насос; 5 – газодувка; 6 – аварийный конденсатор;
 7 – подвод питательной воды; 8 – пар на турбину; 9 – сброс в атмосферу; 10 – фильтр;
 11 – конденсатор; 12 – мембрана разрывная; 13 – к системе стоячного и аварийного теплоотвода; 14 – смеситель; 15 – компрессор; 16 – отвод воздушно-паровой смеси

Система поддержания качества теплоносителя

Данная система необходима для соблюдения технологии теплоносителя, и заключается в сохранении и поддержании необходимой термодинамической активности кислорода в теплоносителе. Существуют различные методики поддержания нужного количества кислорода в контуре. В прорабатываемой в НГТУ реакторной установке БРС-ГПГ предлагается ввод газа в циркуляционный поток теплоносителя реакторного контура в специальном устройстве формирования струй, брызг, капель потока ТЖМТ, при падении на свободную поверхность теплоносителя формирующие пузырьки газа с дальнейшим захватом их в объем жидкого металла. Это устройство размещается во входных камерах главных циркуляционных насосов [12].

Устройство, представленное на рис. 7, позволит выполнять как восстановление оксидов теплоносителя, так и добавления кислорода в контур для поддержания необходимой толщины защитных оксидных покрытий. Применение устройства не требует ввода в конструкцию РУ дополнительных байпасных контуров. Подробное описание устройства представлено в [16].

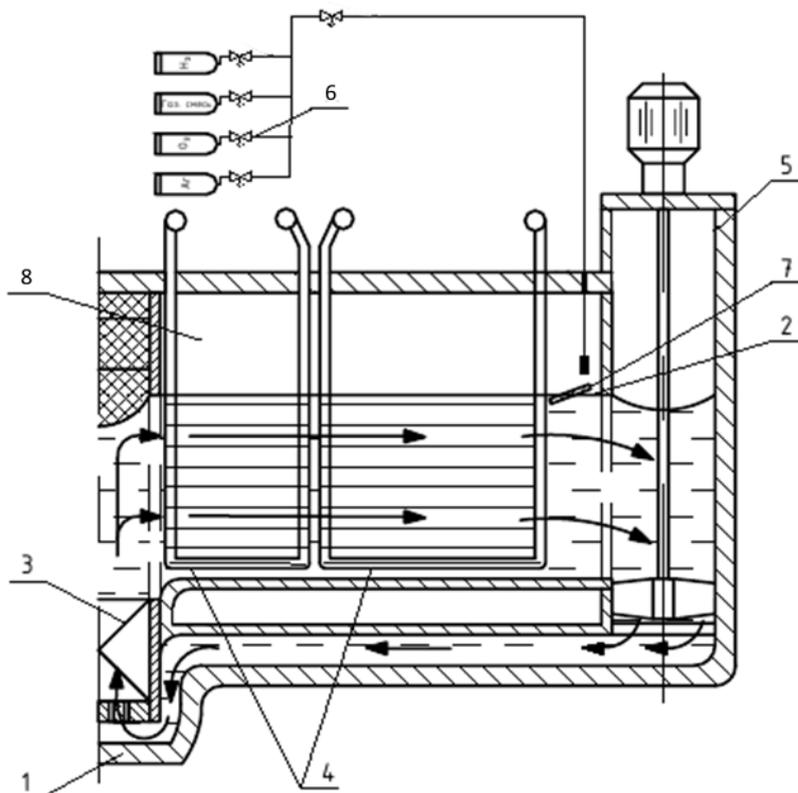


Рис. 7. Схема размещения устройства формирования участков струй, брызг и капель потока ТЖМТ в ядерной энергетической установке

1 – корпус реактора; 2 – свободный уровень ТЖМТ; 3 – активная зона;
4 – секции парогенератора; 5 – ГЦН; 6 – система подвода окислительных
и восстановительных газовых смесей; 7 – пластина – возбудитель потока;
8 – газовый объем реактора

Также предлагается использование конструкции газового массообменника, успешно отработанной в НГТУ на высокотемпературных циркуляционных стендах (рис. 8) [12]. В отличие от выше описанной установки, для работы газового массообменника необходим ввод в контур байпасных трубопроводов, но его конструкция позволяет более эффективно вводить газовую фазу в поток теплоносителя и более точно регулировать количество газа, вводимое в контур. Конструкция отличается своей простотой в исполнении и отсутствием движущихся частей. Использование в РУ устройств регулирования содержания кислорода различных видов позволит точно и своевременно обеспечивать требуемую технологию ТЖМТ. Подробное описание работы массообменника, а также экспериментально подтвержденные показатели эффективности его работы представлены в [17].

Активная зона реактора БРС-ГПГ

Для активной зоны РУ БРС-ГПГ, как и для других РУ с ТЖМТ, характерно то, что и свинцовый, и свинцово-висмутовый теплоносители имеют малые замедление и поглощение нейтронов, что позволяет без заметного ухудшения баланса нейтронов увеличить шаг твэлов и проходное сечение активной зоны, уменьшить максимальную скорость и, соответственно, напор ГЦН и обеспечить высокий уровень естественной циркуляции. В данном случае при использовании большого шага решетки твэлов может применяться бесчехловая ТВС.

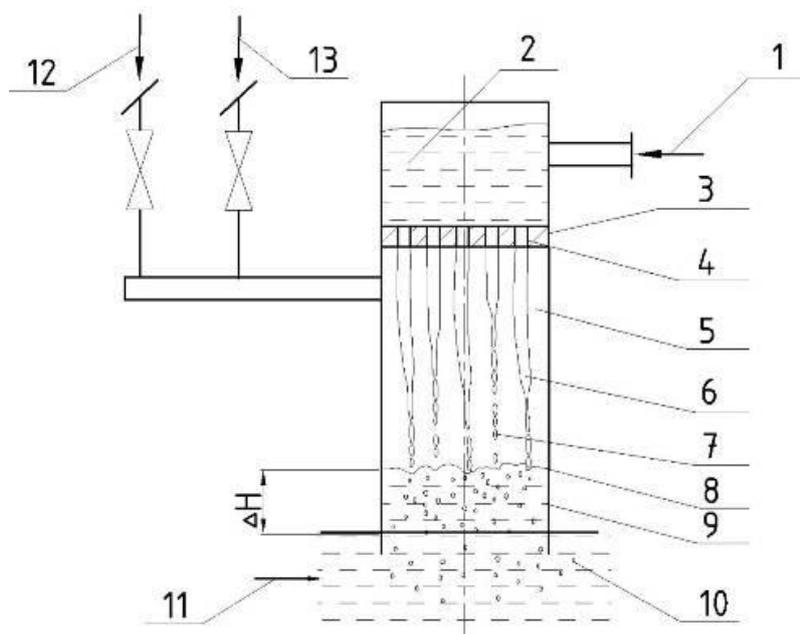


Рис. 8. Конструктивная схема газового массообменника

1 – подача ТЖМТ; 2 – напорная камера; 3 – перфорированная решетка;
 4 – отверстие истечения; 5 – газовый объем; 6 – струя ТЖМТ; 7 – капли ТЖМТ;
 8 – возможные положения свободного уровня ТЖМТ; 9 – корпус; 10 – газ, эжектируемый падающими каплями теплоносителя; 11 – поток ТЖМТ в контуре; 12 – газ из газового объема реакторного блока; 13 – окислительные и восстановительные газовые смеси из системы газа

Использование высокоплотного и теплопроводного моноснитридного топлива в реакторе на быстрых нейтронах без уранового blankets позволяет [1]:

- исключить быстрый разгон за счет снижения пустотного и мощностного эффектов реактивности и других эффектов;
- уменьшить среднюю рабочую температуру топлива, уменьшить выход осколков газовой составляющей, снизить давление на оболочку ТВЭЛов, повысить надежность ТВС в номинальных и аварийных режимах;
- обеспечить полное воспроизводство топлива в активной зоне и компенсировать изменение при выгорании.

Замедление и спад потока нейтронов в отражателе ТЖМТ уменьшает радиационные повреждения элементов конструкции реактора. На настоящем этапе авторы предполагают рассматривать применительно к РУ БРС-ГПГ характеристики активной зоны, аналогичные принятым для реакторных установок СВБР или БРЕСТ.

Целесообразно на последующих стадиях проработок БРС-ГПГ рассматривать возможность перегрузки ядерного топлива целиком в составе активной зоны, учитывая ограниченность ее размеров и имеющийся отечественный опыт перегрузки активных зон транспортных РУ, а также рассмотреть возможность размещения в корпусе реакторов блоков труб с материалами биологической защиты из гидрида металлов, что позволит уменьшить массогабаритные характеристики реакторного блока.

Остановка реактора и обеспечение стояночных режимов РУ

Главной задачей при остановке реактора является снижение фактической тепловой мощности реактора. Технически это достигается соответствующими системами. Для РУ с ТЖМТ проблема заключается в том, что температура кристаллизации свинца выше чем у любого из применяемых в настоящее время теплоносителей. В связи с этим требуются спе-

цифические технические решения для снятия тепла, что необходимо для безопасной работы установок в режиме расхолаживания. На высокотемпературных стендах специалистами НГТУ созданы и эффективно используются устройства регулирования температуры контура. В данных теплообменных устройствах для охлаждения используется воздушно-водяная смесь. Регулирование количества отводимой теплоты производится за счет изменения количества подаваемой воды в составе смеси, которое зависит от показаний ДАК и перепада температур на входе и на выходе из теплообменника. Характеристики такой системы исследуются и отрабатываются на стендах НГТУ, включая стенд ФТ-4 НГТУ для отвода тепла, вносимого электродвигателем модели ГЦН РУ БРЕСТ-ОД-300 [14]. В БРС-ГПП рассматриваются размещение автономных воздушно-водяных теплообменников в корпусах ПГ, либо использование поверхностей испарителей ПГ в воздушно-водяном режиме [6].

В НГТУ экспериментально и расчетно-теоретически обосновывается принципиальная возможность эксплуатации РУ с замороженным на внутреннюю поверхность корпуса реактора слоем свинца системой, используемой также при расхолаживании реактора [15]. Такое решение исключает вытекание ТЖМТ из реакторного блока при его разрушении или при аварийной ситуации «разгерметизация реакторного корпуса».

Заключение

В результате расчетно-теоретических и экспериментальных исследований на высокотемпературных циркуляционных и статических стендах в НГТУ с расплавами свинца и свинца-висмута в качестве теплоносителей предложены новые нетрадиционные технические решения (компоновка оборудования и циркуляция ТЖМТ в реакторном контуре, горизонтальном парогенераторе, отвод тепловыделений и др.) реакторных установок малой и средней мощности, применимых к РУ БРС-ГПП [6].

Библиографический список

1. Белая книга ядерной энергетики / Под общ.ред. проф. Е.О.Адамова / М.: Изд-во ГУП НИКИЭТ, 2001.
2. **Джангобеков, В.В.** Реакторная установка СВБР-100 для модульных станций малой и средней мощности. Доклад на четвертой конференции «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях» (ТЖМТ-2013) / В.В. Джангобеков, В.С. Степанов, А.В. Дедуль, Н.Н. Климов, С.Н. Болванчиков, М.П. Вахрушин // АО «ГЦН РФ ФЭИ», г.Обнинск, РФ, 2013.
3. **Безносков, А.В.** Тяжелые жидкометаллические теплоносители в атомной энергетике / А.В. Безносков, Ю.Г. Драгунов, В.И. Рачков. – М.: ИздАТ, 2007. – 433 с.
4. **Безносков, А.В.** Технологии и основное оборудование контуров реакторных установок, промышленных и исследовательских стендов со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями / А.В. Безносков, Т.А. Бокова, П.А. Боков. – Н. Новгород, Литера, 2016. – 488 с.
5. **Безносков, А.В.** Оборудование энергетических контуров с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями в атомной энергетике / А.В. Безносков, Т.А. Бокова. – Н. Новгород: Литера, 2012. – 536 с.
6. **Безносков, А.В.** Обоснованные технические решения реактора установок БРС-ГПП малой и средней мощности со свинцовыми свинец-висмутовым теплоносителями / А.В. Безносков, Т.А. Бокова, А.Г. Мелузов, П.А. Боков, Н.С. Волков, А.А. Карбышев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – №2. – 2017.
7. **Громов, Б.Ф.** Создание РУ со свинцово-висмутовым теплоносителем для АПЛ. Краткая история. Обобщенные итоги эксплуатации / Б.Ф. Громов [и др.] // Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях. ТЖМТ-98: докл. конф. ГНЦ РФ ФЭИ. – Обнинск. 1998.
8. Патент РФ на изобретение №2320035РФ. Ядерная энергетическая установка / А.В. Безносков, А.А. Молодцов, Т.А. Бокова, и др., Бюл.№8, опублик. 20.03.2008.
9. **Безносков, А.В.** Экспериментальные исследования процессов, сопровождающих межконтурную неплотность парогенератора со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителем и оптимизация

- его конструкции. / А.В. Безносков, Т.А. Бокова, А.А. Молодцов // Известия вузов. Ядерная энергетика. РФ, Обнинск, 2006, №4. С. 3-11.
10. Патент РФ на изобретение №2313143РФ Ядерная энергетическая установка / А.В. Безносков, А.А. Молодцов, Т.А. Бокова и др. Бюл.№35, опубл. 20.12.2007.
 11. Патент РФ на полезную модель заявка № 2019121678/07РФ Ядерная энергетическая установка на быстрых нейтронах с охлаждением тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями плавучих атомных станций, судов и кораблей / А.В. Безносков, Т.А. Бокова, П.А. Боков, А.Р. Маров, Е.Н. Кашина Дата подачи заявки 11.07.2019.
 12. **Безносков, А.В.** Регулирование качества свинцового теплоносителя реакторной установки БРС-ГПГ / А.В. Безносков, Н.С. Волков, А.Р. Маров, Т.А. Бокова, П.А. Боков // 21-я международная конференция молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам // Сборник докладов. ОКБ «Гидропресс». – Подольск, 2019.
 13. Патент RU24748U1. Ядерная энергетическая установка / А.В. Безносков, Т.А. Бокова, С.С. Пинаев, Назаров А.Д. Бюл.№23 опуб. 20.08.2002.
 14. **Безносков, А.В.** Определение характеристик теплообмена в теплообменниках низкого давления, применительно к контурам, охлаждаемым свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями / А.В. Безносков, А.С. Черныш, А.Д. Зудин, Т.А. Бокова, Э.Г. Новинский // Атомная энергия . – 2015. – Vol. 118. – No. 5. – P.266-271.
 15. Патент RU2339096C1. Ядерная энергетическая установка / А.В. Безносков, М.С. Кустов, С.Ю. Савинов Бюл.№32опуб. 20.11.2008.
 16. **Безносков, А.В.** Регулирование содержания кислорода в свинцовом теплоносителе реакторной установки БРС-ГПГ / А.В. Безносков, Т.А. Бокова, П.А. Боков, А.И. Шумилков, Н.С. Волков, А.Р. Маров // Вопросы атомной науки и техники. Серия: ядерно-реакторные константы. – 2017. – № 5.
 17. **Безносков, А.В.** Контроль концентрации кислорода в свинцовом теплоносителе за счет падающих струй и капель на его свободную поверхность / А.В. Безносков, П.А. Боков, Н.С. Волков, О.Р. Журавлева // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2017. – № 4.

A.V. Beznosov, T.A. Bokova, P.A. Bokov, A.R. Marov, A.V. Lvov, N.S. Volkov

SUBSTANTIATION OF TECHNICAL SOLUTIONS OF THE REACTOR CIRCUIT OF THE BRS-GPG UNITS OF SMALL AND MEDIUM POWER WITH A HEAVY LIQUID METAL COOLANT FOR GROUND AND FLOATING NPPs

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

Purpose: The development of reactor facilities of the 4th generation of low and medium power with heavy liquid metal coolants.

Design/methodology/approach: The analysis is carried out on the basis of the experience in the creation and operation of reactor installations with lead-bismuth coolant, the design experience of reactor installations BREST and SVBR with lead and lead-bismuth coolant and research, primarily experimental, performed at the Nizhny Novgorod State Technical University (NNSTU) in rationale of small and medium power fast lead reactor with horizontal steam generators (BRS-GPG).

Findings: The paper presents the scientific and technical substantiation of the main components and assemblies of the installation, justifies the choice of coolant.

Research limitations/implications: With the proposed arrangement of the reactor circuit, the maximum possible natural circulation is achieved, which significantly increases the safety of reactor installation. The results of studies (simulations) of one of the most potentially dangerous accidents in reactor installation with HLMC – «large steam generator leak» allows to qualitatively reduce the consequences of the accident when using the design of a horizontal steam generator in which the pipe system is placed with minimal burial of pipes under the level of HLMC, which eliminates the flow of water into the reactor core, re-pressurization of the reactor loop, etc. The system options for technology of lead and lead-bismuth coolants are considered of the proposed reactor installation. It is probably advisable to consider in relation to the BRS-GPG characteristics of the core, similar to those adopted for the SVBR or BREST-OD-300 reactor installations. A system is proposed for cooling the reactor and providing shutdown modes, its characteristics are studied and tested at the NNSTU stands.

Originality/value: An original layout of the reactor installation equipment is proposed, which differs from the traditional layout solutions of reactor installations with HLMC. Thanks to it safety and profitability of BRS-GPG increases.

Keywords: fast neutron reactor, heavy liquid metal coolant (HLMC), BRS-GPG, steam generator, large steam generator leak, natural circulation, core, natural safety, coolant technology, floating nuclear power plant.

УДК 621.039.53

М.И. Ершова, Л.Т. Крюков

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МИКРОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОХРУПЧИВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ РЕАКТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты использования параметров микропластической деформации для оценки охрупчивания сталей при радиационном воздействии на металлические конструкции во время эксплуатации реакторных установок. Проведены исследования на предмет предотвращения охрупчивания путем проведения циклической гомогенизации с измельчением аустенитного зерна и значительным снижением микронеоднородности распределения хрома и никеля в твердом растворе. Благодаря применению параметров микропластической деформации, установлена чувствительность мартенситностарееющих сталей к обратимой отпускной хрупкости. Исследованы методы повышения радиационной стойкости сталей посредством подавления обратимой отпускной хрупкости. Установлено сходство процессов при развитии обратимой отпускной хрупкости и радиационном охрупчивании сталей. Сделаны выводы о способах моделирования радиационного воздействия на стали путем инициирования развития обратимой отпускной хрупкости.

Ключевые слова: реакторная установка, ЯЭУ, радиационное воздействие, параметры микропластической деформации, ударная вязкость, охрупчивание сталей, обратимая отпускная хрупкость.

Для обеспечения высокой эксплуатационной надежности и безопасности ответственных конструкций ЯЭУ сталь должна обладать высокой стойкостью к эксплуатационной повреждаемости структуры за весь период функционирования реакторной установки и соответствовать определенным требованиям прочности, пластичности, сопротивления хрупкому разрушению, циклической трещиностойкости, радиационной стойкости. В связи с этим, для обеспечения надежной работы и безопасной эксплуатации реакторного оборудования актуально проведение исследований на предмет охрупчивания сталей.

Целью работы является установление зависимости между процессами охрупчивания сталей, связанными с развитием обратимой и необратимой отпускной хрупкости и изменением параметров микропластической деформации в условиях радиационного облучения.

В данной работе поставлены следующие задачи:

- оценить охрупчивание сталей в результате радиационного воздействия по параметрам микропластической деформации;
- изучить факторы, влияющие на предотвращение развития обратимой отпускной хрупкости;
- исследовать возможность повышения радиационной стойкости стали в результате подавления обратимой отпускной хрупкости;
- провести анализ способов определения критической температуры хрупкости с целью изучения перехода стали в хрупкое состояние, а также динамики и условий зарождения и развития хрупкой трещины.

Под хрупкостью в данной работе понимается свойство материалов разрушаться под действием внешних сил без остаточных деформаций.

Исследование различных видов хрупкого разрушения сталей, показало, что параметры микропластической деформации целесообразно использовать для оценки процесса охрупчивания, рассматривая изменение параметра $A = \frac{(\Delta\sigma_2^s)^2}{\sigma_2^s}$, где σ_2^s – значения верх-

ней границы области минимальных необратимых пластических деформаций, $\Delta\sigma_2^0$ – интенсивность деформаций. Параметр A характеризует склонность к хрупкому разрушению стали, определяется при очень малых деформациях и не зависит от конкретно реализуемого способа разрушения материала [1].

Различные относительные изменения значений КСУ (ударной вязкости) и A при охрупчивании сталей можно проиллюстрировать на примере обратимой отпускной хрупкости. При проведении исследования образцы сталей после высокого отпуска (650 °С) с целью получения «вязкого» состояния охлаждались в воде, для получения «хрупкого» состояния обрабатывались по режимам, приведенным в табл. 1. Охрупчивание сталей оценивалось по отношению $КСУ/КСУ_x$ и A/A_x , где КСУ и A – значения параметров для «вязкого» состояния, а $КСУ_x$ и A_x – соответствующие величины для каждой из охрупчивающих обработок.

Таблица 1

Влияние охрупчивающих обработок сталей на относительное изменение параметров КСУ и A

Охрупчивающая обработка, отпуск	Параметр оценки охрупчивания	Марка стали							
		37ХН3А	40Х	45Г2	18Х2Н4МА				5ХНТ
					А	Б	В	Г	
1. 650 °С, 1 час, охлаждение 2. с печью	$\frac{КСУ}{КСУ_x}$	1,74	1,00 [1,35]	1,26	1,11	1,15	1,05	0,97	1,04
	$\frac{A}{A_x}$	1,35	1,48	1,20	1,07	1,13	1,07	0,94	0,95
2. 650 °С, 1 час, охлаждение в воде +525 °С, 5 часов, охлаждение на воздухе	$\frac{КСУ}{КСУ_x}$	1,90	1,01 [1,16]	1,25	1,17	1,12	1,04	0,99	1,02
	$\frac{A}{A_x}$	1,73	1,51	1,20	1,14	1,10	1,06	0,96	1,01

Как следует из табл. 1, для всех сталей, кроме стали 40Х, оба оценочных параметра ($КСУ/КСУ_x$ и A/A_x) показали качественно одинаковые результаты: стали 37ХН3А, 45Г2 имеют существенную склонность к обратимой отпускной хрупкости; сталь 18Х2Н4МА (А, Б, В) имеет незначительную склонность к обратимой отпускной хрупкости; а стали 18Х2Н4МА (Г) и 5ХНТ – не охрупчиваются. Следует отметить, что относительное изменение ударной вязкости стали 37ХН3А после обеих охрупчивающих обработок больше, чем параметра A , а для других марок сталей эти величины примерно равны. Это означает, что для всех приведенных марок сталей (кроме 40Х) охрупчивание стали может быть установлено по любому из использованных параметров оценки.

Особое место в ряду исследованных марок сталей занимает сталь 40Х, широко используемая в атомной промышленности, содержащая 0,84 % Cr. Это содержание хрома является граничным, ниже которого стандартные ударные испытания не обнаруживают развития обратимой отпускной хрупкости, а выше – фиксируют ее. Как следует из табл. 1, по относительному изменению КСУ сталь 40Х не подвержена обратимой отпускной хрупкости, в то время как параметр A при обеих охрупчивающих обработках уменьшается примерно в 1,5 раза, указывая на существенное развитие охрупчивающих процессов.

Для проверки этого положения была повышена «жесткость» напряженного состояния образцов при испытании на ударный изгиб путем уменьшения ширины надреза с 2 мм до 0,25 мм, в результате чего «удельная» работа разрушения образцов снизилась в 1,35 и 1,16 раза после соответствующих охрупчивающих обработок 1 и 2. Эти результаты приведены в табл. 1 в квадратных скобках. Следовательно, в случае стали 40Х, оценка ее охрупчи-

вания по параметрам микропластической деформации оказалась более объективной, чем по изменению КСУ при стандартных испытаниях. Таким образом, при использовании параметров микропластической деформации в качестве индикатора охрупчивания, была установлена чувствительность к обратимой отпускной хрупкости некоторых мартенситностареющих сталей, считавшихся не чувствительными к этому виду хрупкости.

Сталь 18Х2Н4МА используется для изготовления ответственных деталей ЯЭУ, трубопроводов, опор трубопроводов, сепараторов-пароперегревателей, комплектующих к ним и другого оборудования. Рассмотрим поведение параметров КСУ/КСУХ и А/АХ для стали 18Х2Н4МА (с точки зрения оценки ее склонности к обратимой отпускной хрупкости) при измельчении величины зерна и уменьшении химической микронеоднородности матрицы. В этом случае оба оценочных параметра дают близкие по величине результаты. Как следует из табл. 1, наибольшей склонностью к обратимой отпускной хрупкости обладает литая сталь 18Х2Н4МА (состояние Б), а также горячедеформированная сталь (состояние А). Проведение для литой стали циклической гомогенизации при 1050 °С (состояние В) делает сталь 18Х2Н4МА практически не склонной к обратимой отпускной хрупкости, а после циклической гомогенизации при 1250°С (состояние Г) «охрупчивающие» обработки даже несколько увеличивают вязкость стали по сравнению с «вязким» состоянием – после охлаждения в воде (КСУ/КСУХ и А/АХ).

Таким образом, предотвращение развития обратимой отпускной хрупкости в стали 18Х2Н4МА в результате проведения циклической гомогенизации связано с измельчением аустенитного зерна и значительным снижением микронеоднородности распределения хрома и никеля в твердом растворе [2]. Кроме того, такая обработка значительно повышает радиационную стойкость литой стали 18Х2Н4МА, что, наряду с имеющимися в литературе указаниями [3], подтверждает схожесть процессов при развитии обратимой отпускной хрупкости и при радиационном охрупчивании сталей. Это обстоятельство может позволить при разработке методов оценки свойств облученных материалов моделировать радиационное воздействие иницированием развития обратимой отпускной хрупкости, а также использовать методы подавления обратимой отпускной хрупкости для повышения радиационной стойкости сталей.

Сопоставление температурных зависимостей КСУ(Т) и А(Т) для всех испытанных сталей показывает, что обе зависимости имеют пороговый характер (рис. 1 и 2). Особенностью кривых А(Т) является то, что для наименее прочных (малоуглеродистых) сталей при повышении температуры от (-20 °С) до +20 °С отмечается снижение параметра А, в то время как величина КСУ остается практически постоянной. Такое снижение параметра А может быть объяснено протеканием деформационного старения при статической деформации, интенсивность которого уменьшается с понижением температуры. Этот эффект проявляется наиболее сильно в образцах армко-железа и почти не заметен в сталях с большим содержанием углерода, что связано с более высокой плотностью структурных дефектов в сталях, связывающих частично атомы внедрения и ослабляющих тем самым интенсивность деформационного старения [4].

Близость кривых температурных зависимостей КСУ(Т) и А(Т) позволила оценить наличие корреляции между параметрами КСУ и А. Результаты оценки приведены в табл. 2. Как следует из таблицы, во всех случаях, исключая сталь 45 и армко-железо с отпуском при 650 °С, между указанными параметрами имеется достаточно четкая линейная корреляция.

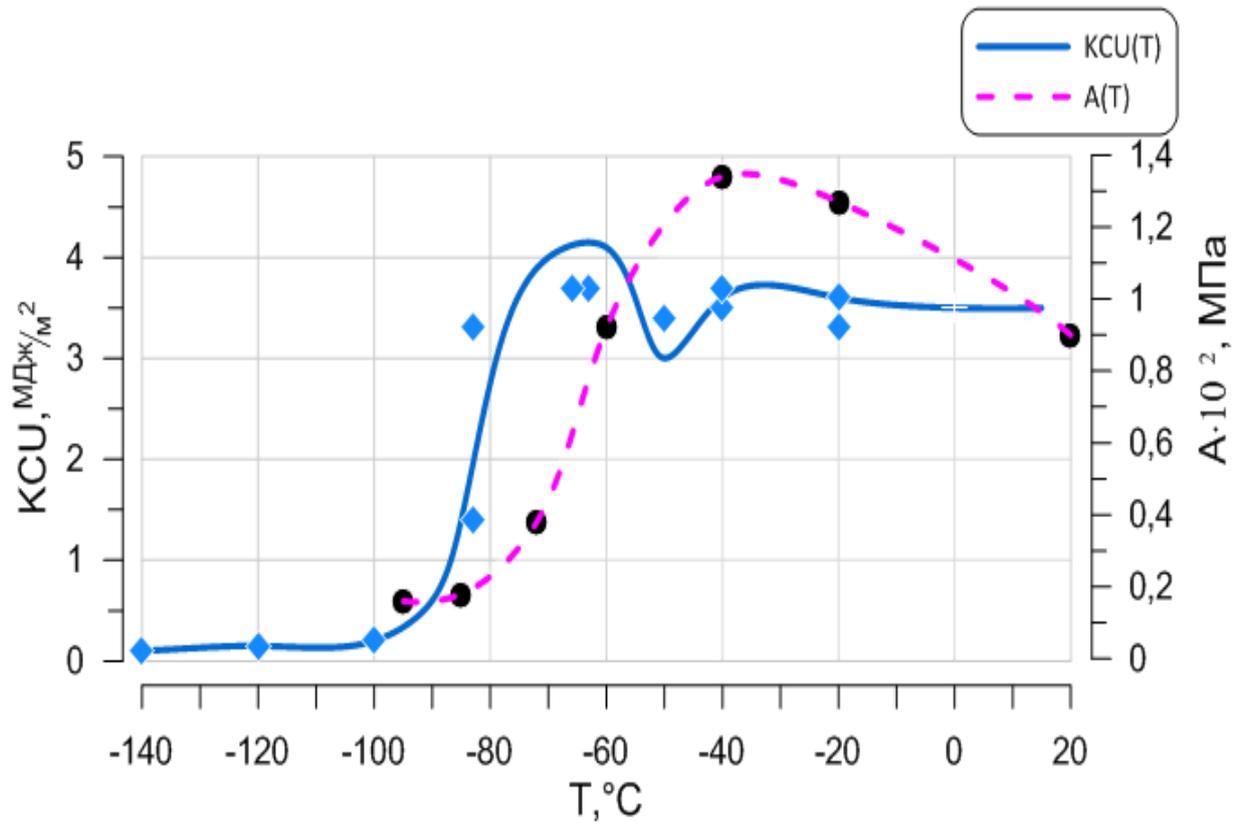


Рис. 1. Зависимость KCU (T) и A (T) армко-железа при отпуске 450 °C

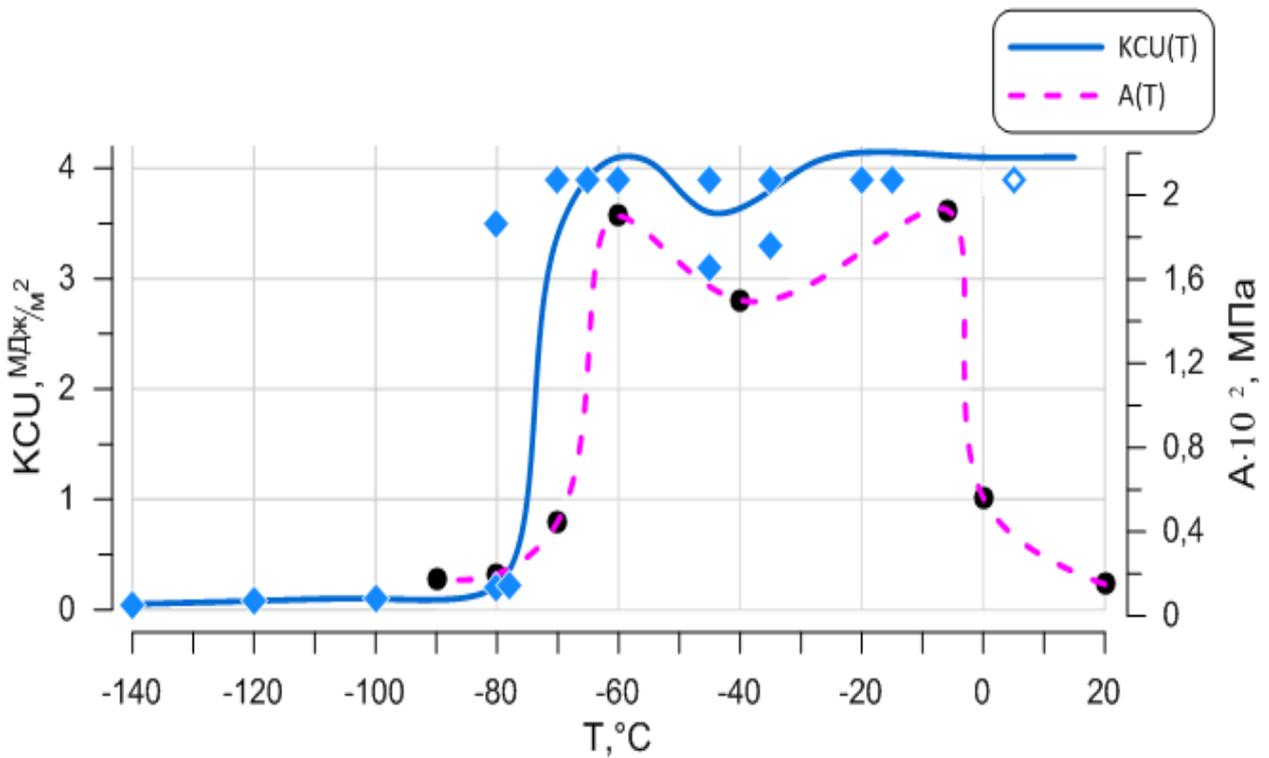


Рис. 2. Зависимость KCU (T) и A (T) армко-железа при отпуске 650 °C

Таблица 2

Значение ударной вязкости (X) и параметра A (Y) для сталей

Марка стали (температура отпуска)	Параметры	Уравнение регрессии								Коэффициент корреляции «r»	
		X	X	X	X	X	X	X	X		Y
Армко-Fe (450°C)	X	3,5	3,6	3,6	3,0	0,6	0,2	-	-	$Y = 0,02 + 0,29 \cdot X$	0,84
	Y	1,27	1,34	0,92	0,38	0,18	1,6	-	-		
Армко-Fe (650°C)	X	3,9	3,9	3,6	0,39	2,4	0,1	0,1	-	$Y = 0,64 + 0,16 \cdot X$	0,37
	Y	0,56	1,93	1,5	1,9	0,45	0,2	0,18	-		
20 (300°C)	X	2,45	2,54	2,55	2,5	2,0	1,55	1,37	0,8	$Y = 0,05 + 0,09 \cdot X$	0,78
	Y	0,31	0,31	0,27	0,23	0,17	0,28	0,16	0,1		
20 (450°C)	X	2,55	2,54	2,53	2,43	2,33	2,3	2,2	1,5	$Y = 0,27 + 0,25 \cdot X$	0,99
	Y	0,38	0,37	0,4	0,37	0,326	0,32	0,318	0,12		
45 (300°C)	X	0,8	0,56	0,54	0,52	0,33	0,36	-	-	$Y = 0,13 + 0,43 \cdot X$	0,48
	Y	0,425	0,36	0,6	0,29	0,34	0,14	-	-		
45 (450°C)	X	0,78	0,65	0,58	0,29	0,45	0,25	0,15	-	$Y = 0,39 + 0,88 \cdot X$	0,36
	Y	0,38	1,87	1,18	0,9	0,27	0,56	0,37	-		
У8 (550°C)	X	0,17	0,13	0,13	0,15	0,11	0,08	-	-	$Y = -0,06 + 1,85 \cdot X$	0,93
	Y	0,24	0,2	0,15	0,24	0,14	0,07	-	-		
У8 (650°C)	X	0,34	0,27	0,12	0,12	0,11	0,05	-	-	$Y = 0,22 + 2,01 \cdot X$	0,94
	Y	0,99	0,61	0,45	0,51	0,49	0,20	-	-		
У10 (550°C)	X	0,19	0,08	0,07	0,05	0,03	0,03	0,02	-	$Y = 0,11 + 1,19 \cdot X$	0,98
	Y	0,35	0,23	0,17	0,16	0,16	0,15	0,15	-		
У10 (650°C)	X	0,25	0,12	0,06	0,05	0,03	0,03	0,02	-	$Y = 0,16 + 2,08 \cdot X$	0,96
	Y	0,67	0,4	0,35	0,34	0,19	0,18	0,16	-		

Таблица 3

Значения ударной вязкости (X) и параметра А (Y) для сталей и титановых сплавов

Марка стали	Параметры	Значения ударной вязкости (X) и параметра А (Y)										Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции «г»
45	X	0,25	0,17	0,27	0,31	0,49	0,61	0,73	0,85	1,11	1,41	$Y = 0,51 + 0,91 \cdot X$	0,96
	Y	0,88	0,76	0,53	0,75	0,87	1,02	1,11	1,41	1,46	1,79		
У8	X	0,17	0,27	0,24	0,36	0,37	0,30	0,41	0,55	0,56	-	$Y = 0,71 + 4,11 \cdot X$	0,94
	Y	0,47	0,67	0,52	0,68	0,82	1,03	0,99	1,18	1,58	-		
У10	X	0,22	0,30	0,28	0,27	0,30	0,37	0,44	0,46	0,55	0,62	$Y = 0,44 + 3,55 \cdot X$	0,98
	Y	0,40	0,40	0,50	0,56	0,74	0,87	1,08	1,25	1,59	1,70		
30ХГСА	X	0,56	0,55	0,45	0,47	0,65	0,79	0,72	0,77	1,77	1,80	$Y = 0,17 + 0,27 \cdot X$	0,95
	Y	0,32	0,25	0,28	0,30	0,43	0,42	0,32	0,64	0,64	0,65		
40X	X	1,02	1,15	1,06	0,82	0,95	1,24	1,18	1,13	1,40	-	$Y = 0,66 + 0,99 \cdot X$	0,69
	Y	0,24	0,35	0,31	0,27	0,28	0,40	0,35	0,78	0,90	-		
15X2HMA	X	0,74	0,73	0,74	0,82	0,82	0,93	1,05	1,77	-	-	$Y = 3,67 + 1,56 \cdot X$	0,71
	Y	0,91	0,97	0,97	0,98	0,98	1,06	1,04	1,60	-	-		
5XHT	X	0,16	0,27	0,39	0,41	0,54	0,75	0,92	0,77	-	-	$Y = 0,13 + 0,5 \cdot X$	0,92
	Y	0,24	0,35	0,27	0,30	0,37	0,50	0,68	0,47	-	-		
18X2H4MA (A)	X	1,35	1,26	0,62	0,43	0,35	0,52	1,77	1,79	-	-	$Y = 0,87 + 0,23 \cdot X$	0,82
	Y	1,28	1,05	0,98	0,90	0,96	1,11	1,17	1,41	-	-		
18X2H4MA (Б)	X	1,28	1,06	1,02	0,79	0,86	1,11	1,38	1,72	-	-	$Y = 0,2 + 0,65 \cdot X$	0,96
	Y	1,08	0,96	0,91	0,66	0,77	0,87	1,03	1,33	-	-		
18X2H4MA (B)	X	1,21	0,82	0,84	0,73	0,81	0,97	1,19	1,58	-	-	$Y = 0,33 + 0,75 \cdot X$	0,95
	Y	1,36	1,00	0,93	0,89	0,89	0,95	1,27	1,45	-	-		
18X2H4MA (Г)	X	1,10	0,90	0,85	0,78	0,82	1,11	1,37	1,66	-	-	$Y = 0,26 + 0,56 \cdot X$	0,95
	Y	0,81	0,73	0,81	0,74	0,69	0,91	0,97	1,25	-	-		
X19H2Г5Т	X	0,20	0,20	0,36	1,60	1,80	-	-	-	-	-	$Y = 0,97 + 0,46 \cdot X$	0,90
	Y	1,20	0,80	1,24	1,83	1,67	-	-	-	-	-		
BT3-1	X	0,48	0,21	0,17	0,18	0,18	0,25	-	-	-	-	$Y = 0,55 + 1,4 \cdot X$	0,98
	Y	1,21	0,87	0,78	0,75	0,75	0,92	-	-	-	-		
BT22	X	0,32	0,17	0,22	0,28	-	-	-	-	-	-	$Y = 2,23 \cdot X$	0,99
	Y	0,71	0,38	0,49	0,63	-	-	-	-	-	-		

Следует отметить, что коэффициент «К» в уравнениях регрессии (табл. 2) для высокоуглеродистых сталей (У8, У10) значительно выше, чем для сталей с меньшим содержанием углерода, что указывает на более высокую чувствительность параметра A к изменению вязкости прочных материалов по сравнению с ударной вязкостью. Аналогичные испытания были проведены при комнатной температуре, результаты которых представлены в табл. 3.

Если расположить значения коэффициента «К» в уравнениях регрессии, выведенных в результате испытаний при комнатной температуре, в зависимости от средней величины ударной вязкости (KCU_{cp}) каждой стали, определенной как среднее минимального и максимального значения KCU , полученных при испытаниях (табл. 3), то выявляется общая тенденция: с уменьшением KCU_{cp} растет коэффициент «К» (рис. 3). Это означает, что с уменьшением запаса вязкости материала стандартная характеристика KCU перестает адекватно регистрировать изменение его свойств с изменением структуры, в то время как параметр A остается структурно-чувствительным.

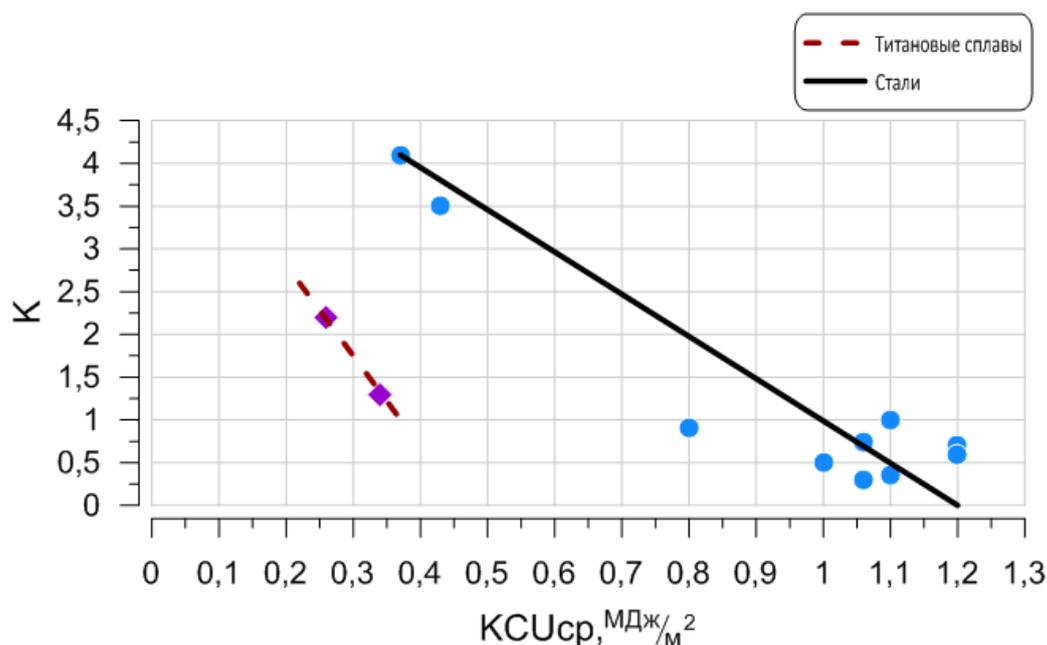


Рис. 3. Зависимость между средним значением ударной вязкости сталей и коэффициентом K

Проведенные исследования оценки охрупчивания сталей при радиационном воздействии на металлические конструкции во время эксплуатации реакторных установок по параметрам микропластической деформации позволяют сделать следующие выводы.

1. При использовании параметров микропластической деформации в качестве индикатора охрупчивания в результате радиационного воздействия, была установлена чувствительность к обратимой отпускной хрупкости мартенситностареющих сталей, считавшихся ранее не чувствительными к этому виду хрупкости.

2. Оценка данного вида охрупчивания по параметру микропластической деформации стали 40Х, является более объективной, чем по изменению параметра ударной вязкости.

3. Предотвращение развития обратимой отпускной хрупкости, вследствие, радиационного воздействия на сталь 18Х2Н4МА можно достигнуть путем проведения циклической гомогенизации с измельчением аустенитного зерна и значительным снижением микронеоднородности распределения хрома и никеля в твердом растворе.

4. При измельчении величины зерна и уменьшении химической микронеоднородности матрицы стали 18Х2Н4МА параметры $KCU/KCUX$ и A/AX дают близкие по величине результаты.

5. Циклическая гомогенизация значительно повышает радиационную стойкость литой стали 18Х2Н4МА, что позволяет моделировать радиационное воздействие на материал иницированием развития обратимой отпускной хрупкости.

6. Зависимости КСУ(Т) и А(Т) для всех испытанных сталей имеют пороговый характер.

Близость кривых данных температурных зависимостей позволила оценить наличие корреляции между параметрами КСУ и А.

7. Параметр А обладает более высокой чувствительностью к изменению вязкости облученных материалов по сравнению с параметром ударной вязкости, в связи с более высоким коэффициент «К» в уравнениях регрессии для высокоуглеродистых сталей, чем для сталей с меньшим содержанием углерода.

8. Параметр А остается структурно чувствительным при уменьшении запаса вязкости материала, в отличие от параметра ударной вязкости КСУ, который перестает адекватно регистрировать изменение свойств металла при изменении структуры.

Библиографический список

1. **Крюков, Л.Т.** Контроль механических свойств материалов реакторного оборудования по параметрам микропластической деформации / Л.Т. Крюков, М.И. Ершова // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – 2019. – №3 (126). – С. 67-72.
2. **Garrison, W.M.** The Effects of Silicon and Nickel Additions on the Mechanical Properties of a 0.4 Carbon Low Alloy Steel // Scr. met. – 1982. – №16. – P. 877-880.
3. **Карк, Г.С.** Связь между радиационным охрупчиванием и отпускной хрупкостью низколегированной стали / Г.С. Карк, А.А. Астафьев, С.И. Марков // ФММ. – 1984. – №3 (57). – С. 592-598.
4. **Wozniak, Y.** Stanoveni kriticke teploty krehkosti pricneho rozsireni zkusebniho teliska zkousky razem ohybu / Y. Wozniak, M. Yakob // Kovove materialy – 1983. – № 2. – P. 206-212.

*Дата поступления
в редакцию: 29.03.2020*

M.I. Ershova, L.T. Kryukov

USING PARAMETERS OF MICROPLASTIC DEFORMATION TO EVALUATE EMBRITTLMENT OF REACTOR EQUIPMENT MATERIALS

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

The purpose of the research: is to substantiate the use of microplastic deformation parameters for evaluating the embrittlement of steels under radiation exposure to metal structures during operation of reactor plants.

Approach: studies have been conducted to prevent embrittlement by conducting cyclic homogenization with grinding of austenitic grains and significantly reducing the micro-uniformity of the distribution of chromium and nickel in a solid solution. Methods of increasing the radiation resistance of steels by suppressing the reversible release brittleness are investigated.

Results and their application: microplastic deformation Parameters should be used as an indicator of steel embrittlement. Due to the application of microplastic deformation parameters, the sensitivity of martensitic-aging steels to reversible release brittleness was established. The similarity of processes in the development of reversible release brittleness and radiation embrittlement of steels was established.

Conclusions: conclusions are made about methods of modeling radiation effects on steel by initiating the development of reversible release brittleness.

Key words: reactor plant, nuclear power plant, radiation exposure, parameters of microplastic deformation, impact strength, embrittlement of steels, reversible release brittleness.

УДК 621.316.925

И.Т. Титов¹, А.В. Бычков², Н.А. Дони²**УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ОТКРЫТОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ НА ПАРАМЕТРЫ
СРАБАТЫВАНИЯ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ**Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова¹
Научно-производственное предприятие «ЭКРА»²

Рассмотрены существующие подходы к расчету сопротивления электрической дуги при выборе уставок дистанционной защиты (ДЗ). Проведено моделирование участка электрической цепи с дуговым коротким замыканием (КЗ) в среде Matlab / Simulink с учетом накопленного годами теоритического опыта в исследовании открытой электрической дуги. Проведен анализ влияния параметров дуги на собственное сопротивление и определены закономерности между исследуемыми параметрами. Полученные результаты позволяют более точно учитывать переходное сопротивление при выборе уставок ДЗ по сравнению с имеющимися эмпирическими формулами, что важно для современной релейной защиты.

Ключевые слова: дистанционная защита, переходное сопротивление, открытая электрическая дуга.

Введение

Значение электрической дуги для промышленности весьма велико: достаточно упомянуть дуговые электрические печи и дуговую электросварку. В то же время для выключателей и некоторых других электрических аппаратов, электрических распределительных устройств и линий электропередачи дуга представляет собой крайне нежелательное явление, способное вызывать большие разрушения. В области релейной защиты возникающие дуговые явления могут оказать негативное влияние на ее работу. Например, на дистанционную защиту. При коротких замыканиях на линиях электропередачи среднего и высокого напряжения дистанционная защита должна точно определять сопротивление (или дистанцию) до места повреждения линии. Точное значение сопротивления определяется путем измерения напряжения и тока в начале линии – в месте установки устройств релейной защиты (УРЗ) [1]. Обычно короткие замыкания сопровождаются возникающими электрическими дугами, вносящими в контур короткого замыкания активное (как принято считать) сопротивление, поэтому при расчетах необходима оценка величины этого сопротивления [2]. Существующие подходы расчета сопротивления [3-5] заключаются в усреднении множества параметров и потому не всегда позволяют получить значение, близкое к истинному.

Расчет параметров ДЗ

Сопротивление электрической дуги в схеме замещения электрической цепи при КЗ находится в месте повреждения. При выборе уставок быстродействующих ступеней ДЗ в направлении R необходимо учитывать активное сопротивление воздушной линии (ВЛ) или кабельной линии (КЛ), а также переходное сопротивление в месте короткого замыкания, которое включает в себя сопротивление дуги [3].

Наличие переходного сопротивления в месте повреждения напрямую влияет на замер сопротивления ДЗ. На рис. 1 изображена характеристика срабатывания ДЗ и отмечена точка КЗ – $Z_{КЗ}$. В случае металлического КЗ замер сопротивления совпадает с этой точкой (1):

$$Z_{изм} = Z_{КЗ}. \quad (1)$$

Наличие переходного сопротивления при КЗ на линии смещает замер сопротивления вправо на величину ΔZ_{Π} , которая в случае линии, работающей в режиме холостого хода равна R_d (2):

$$Z_{\text{изм}} = Z_{\text{КЗ}} + R_d, \quad (2)$$

что может привести к неправильному действию ДЗ. Это ведет к необходимости учета сопротивления дуги при выборе установок ДЗ.

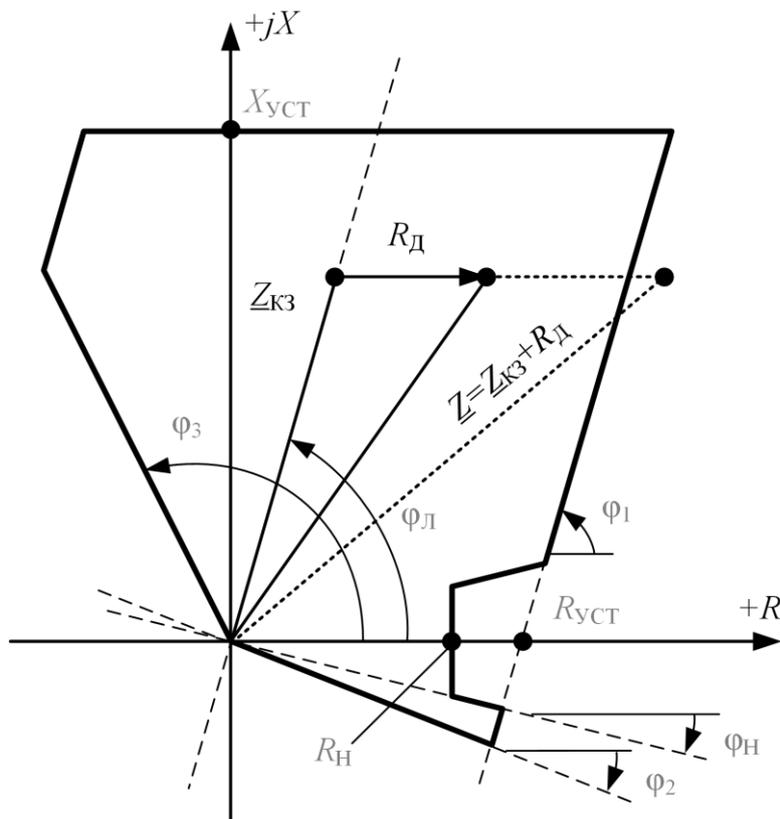


Рис. 1. Характеристика срабатывания ДЗ

Электрическая дуга характеризуется следующими основными параметрами: градиент напряжения в створе дуги (E , В/м); постоянная времени дуги (τ , с); длина дуги (l_d , м); ток дуги (I_d , А). Одной из важнейших зависимостей, характеризующих электрические свойства дуги, является вольт-амперная характеристика (ВАХ) [6]. Процесс горения дуги является не только нелинейным, что выражается в нелинейности ее ВАХ, но и нестационарным, так как длина дуги изменяется во времени из-за действующих на нее сил: электродинамических, ветра.

Оценить величину сопротивления дуги можно по эмпирическим формулам. В литературе встречаются различные подходы к расчету переходного сопротивления дуги (3):

$$R_d = 1050 \frac{l_d}{I_d} \text{ - в России [4],}$$

$$R_d = 2500 \frac{l_d}{I_d} \text{ - в Германии [3],} \quad (3)$$

$$R_d = 28700 \frac{l_d}{I_d^{1.4}} \text{ - в США [5],}$$

где l_d – длина дуги, [м];

I_d – действующее значение тока, [А].

Переходное сопротивление дуги R_d является средним значением за определенный промежуток времени. Однако для исследований и проведения анализа работы быстродействующих УРЗ необходимо знать мгновенные значения сопротивления дуги, т.е. функциональную зависимость изменения сопротивления во времени $R_d = f(t)$.

Модель электрической дуги

Рассмотрение вопросов влияния переходного сопротивления дуги в месте КЗ на работу релейной защиты возможно только путем моделирования переходных процессов в электрической сети совместно с решением дифференциальных уравнений открытой электрической дуги.

Электрическая дуга, образующаяся в установках высокого напряжения и, в частности, на линиях электропередачи, представляет собой самостоятельный разряд в воздухе при атмосферном давлении между металлическими электродами. Необходимая эмиссия электронов здесь обеспечивается высокой температурой катодного пятна, а приэлектродные падения напряжения из-за значительной длины дуги не играют существенной роли. Определяющим для такого рода «длинных» дуг является так называемый положительный столб дуги. Диапазон токов дуги охватывает широкую область значений от 10^{-3} до 10^4 А и более. Основные результаты многочисленных работ по электрическим дугам, изложенные в обобщающих монографиях [7-9], охватывают элементарные процессы, теорию термической плазмы, теорию столба дуги и приэлектродных областей. Хотя накопленный экспериментальный материал очень велик, однако основные измерения были выполнены с угольными дугами, с небольшой величиной тока, спокойный характер горения которых облегчает постановку опытов. Дуги со значительными токами между металлическими электродами для удобства анализа приходилось стабилизировать, что делало их существенно отличными от представляющей здесь интерес открытой электрической дуги.

Столб дуги как целое принято анализировать в виде каналовой модели определенного радиуса с постоянным значением температуры и имеющей зону с температурой, постепенно приближающейся к температуре окружающего пространства, в которой происходят потери энергии. Подобная идеализация основана на том, что внутри столба дуги перемешивание плазмы облегчено высокой температурой и соответственно низкой плотностью, а также тем обстоятельством, что на «поверхности» дуги имеет место резкий спад проводимости, определяемый степенью ионизации, существенно зависящей от температуры газа.

Если предварительно принять допущение об изменении температуры в переходной зоне, определяющей рассеяние энергии в форме теплопроводности, то результатом такого рассмотрения является вольт-амперная характеристика дуги, т.е. зависимость напряжения вдоль столба дуги от ее тока. Экспериментальное определение вольт-амперной характеристики открытой электрической дуги связано с рядом трудностей, обусловленных главным образом неустойчивостью столба, стремящегося свернуться в спираль. Следствием этого является петлеобразование, происходящее со скоростями, близкими к скорости звука.

Одно из первых научных исследований дуги [10] ставило своей целью определение критической длины дуги с помощью вольт-амперной характеристики в диапазоне 10-1000 А, но указанные выше препятствия не позволили установить необходимые численные соотношения с достаточной точностью. Позднее Ю.В. Буткевичу [11] в отдельных случаях удавалось достигнуть при помощи той же методики лучших результатов.

В основу этих двух исследований была положена предпосылка, что при переменном напряжении в момент максимума тока дугу переменного тока можно приближенно рассматривать как дугу постоянного тока. Для этого момента времени вычисляется ток, а по нему по вольт-амперной характеристике определяется градиент напряжения горения дуги, кото-

рый затем сопоставляется с действительным градиентом напряжения на дуге, близким в момент гашения к градиенту холостого хода установки. Этот метод требует достоверных данных о вольт-амперной характеристике дуги, особенно в области относительно малых токов. Такие данные были получены А.С. Майкопаром [12, 13] на специальной опытной установке.

В области весьма больших токов имеются данные Штрома [14] для дуги длиной 30- 120 см, образующаяся между латунными электродами. Эти данные имеют существенный разброс, однако в значительном диапазоне они совпадают с результатами Бургсдорфа [15].

Следующая серия опытов Итона, Пека и Данхэма [16] выполнена для дуги длиной 30 см между латунными электродами при токах 50 А. Наконец, для токов порядка 1-10 А имеются данные А.М. Залесского [17] и Сьютса [18]. При построении вольт-амперной характеристики приведенные выше результаты могут быть объединены, что позволяет иметь непрерывную зависимость в широком диапазоне токов. Полученная обобщенная ВАХ приведена на рис. 2.

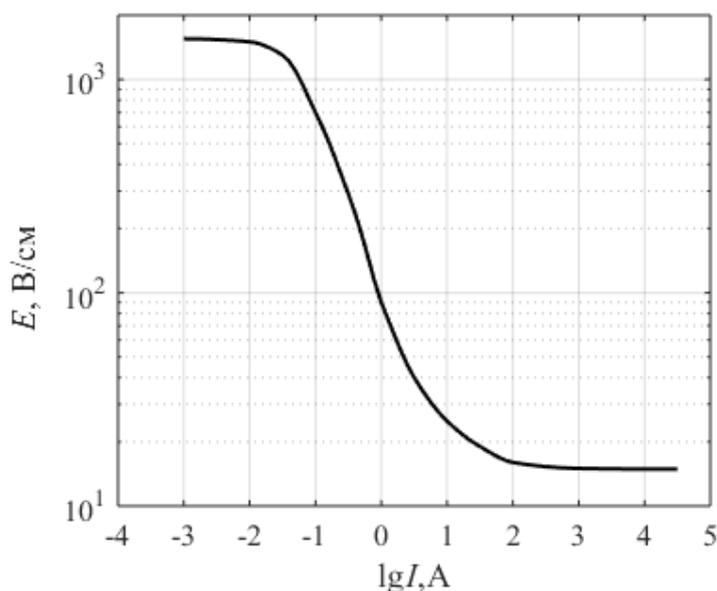


Рис. 2. ВАХ электрической дуги в воздухе при атмосферном давлении

Динамическое состояние дуги описывается уравнением (4):

$$\frac{dQ}{dt} = Ei - W, \quad (4)$$

где Q – теплосодержание единицы длины столба дуги, [ВА·с/м];

E – градиент напряжения дуги, [В/м];

i – ток дуги, [А];

t – время, [с];

W – мощность, рассеиваемая столбом дуги на единицу длины, [ВА/м].

Решение уравнения (4) зависит от механизма теплоотдачи от столба дуги: тепловое излучение, теплопроводность, свободная конвекция. Если рассматривать электрическую дугу в установившемся режиме, то согласно [19], теплоотдача излучением составляет лишь 5-10 % от общей теплоотдачи и ее можно не учитывать.

Теплоотдача теплопроводностью характерна для открытой электрической дуги с относительно небольшими токами (1-50 А), в условиях слабых конвективных потоков. Данная область описывается дифференциальным уравнением электрической дуги типа Майера и используется для определения условий самопогасания дуги [20].

Первая и вторая ступени ДЗ имеют малую выдержку времени на срабатывание, поэтому их работа происходит в начальные моменты времени КЗ. Токи КЗ при этом максимальны. В этом случае для дуги характерна теплоотдача конвекцией, когда сам столб дуги

создает вокруг себя конвективные потоки, охлаждающие канал дуги. Согласно экспериментально полученной ВАХ дуги, рисунок 2, теплоотдача конвекцией (область III) характерна для дуг с токами 100-20000 А, рис. 3 [19].

При больших токах градиент напряжения в дуге практически постоянный и он равен 15 В/см. При токах 0,1-100 А наблюдается падающий характер ВАХ, а при токе менее 0,1 А происходит постепенное замедление роста кривой и переход к неизменному градиенту 1,5 кВ/см для токов 0,05-0,001 А. При еще меньших токах формирование дуги затрудняется недостаточным разогревом электродов.

Природа изгибов ВАХ в области 100 и 0,1 А объясняется условиями отвода энергии столбом дуги.

При отдаче тепла от столба дуги свободной конвекцией уравнение (4) принимает вид (уравнение Кассии) [21] (5):

$$-\frac{1}{R} \frac{dR}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{E^2}{E_0^2} - 1 \right), \quad (5)$$

где R – сопротивление единицы длины столба электрической дуги, [Ом/м];

τ – постоянная времени, [с];

E_0 – характеристический градиент напряжения столба дуги, [В/м];

E – мгновенное значение градиента столба дуги, [В/м].

Примечание – значения τ , E_0 определяются экспериментально и приводятся в [19].

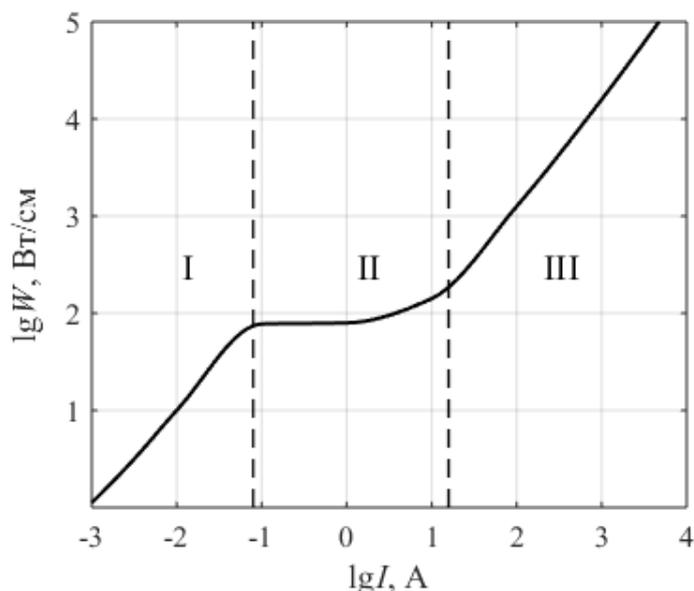


Рис. 3. Мощность, рассеиваемая дугой в зависимости от тока дуги и виды теплоотдачи. I – свободная конвекция (4000 К), II – теплопроводность (~6000 К), III – свободная конвекция (~6500 К)

Подставив в выражение (5) значение $E = iR$, получим уравнение типа Бернулли (6):

$$\frac{dR}{dt} - \frac{1}{\tau} R = -\frac{i^2}{\tau E_0^2} R^3. \quad (6)$$

Интегрируя с заменой переменных, [22] получим линейное дифференциальное уравнение первого порядка (7):

$$\frac{dr}{dt} + \frac{2}{\tau} r = \frac{2}{\tau E_0^2} i^2 \quad (7)$$

и его решение (8):

$$r = e^{-\frac{2}{\tau}t} \left[\frac{2}{\tau E_0^2} \int i^2 e^{\frac{2}{\tau}t} dt + C \right]. \quad (8)$$

Раскрывая скобки, необходимо обратить внимание на слагаемое с постоянной интегрирования уравнения (8). Учитывая скорость затухания функции $Ce^{-\frac{2}{\tau}t}$ при значении $\tau = 0,85 \cdot 10^{-3}$ с, будем пренебрегать данным слагаемым [19], а также будем иметь в виду, что сопротивление дуги при $t = 0$ часто равняется нулю (наброс, атмосферный разряд, схлест проводов и т.д.).

Зная мгновенное сопротивление электрической дуги можно определить его среднее значение. Для синусоидального тока, получим следующее выражение (9):

$$R_{\text{ср}} = 2200 \frac{l_d}{I_d}. \quad (9)$$

Формула (9) является приближенной, так как в расчетах не учитывалась теплоотдача излучением и теплопроводностью. Экстремальные значения $R_{\text{ср}}$: $R_{\text{мин}} = 1070 \frac{l}{I_d}$;

$$R_{\text{макс}} = 8160 \frac{l}{I_d}.$$

Однако минимального, максимального и промежуточного значения сопротивления дуги не всегда достаточно при решении реальных практических расчетов релейной защиты.

Исследования зависимости сопротивления дуги от различных параметров, таких как длина дуги, ток дуги, напряжение источника проводились в среде имитационного моделирования Simulink [23, 24]. Модель электрической дуги описывалась уравнением дуги типа Касси. Постоянные величины, входящие в дифференциальное уравнение, выбирались по экспериментальной ВАХ (рис. 2) [19]. Поскольку действие релейной защиты происходит в начальные моменты КЗ, когда ток дуги значителен, характеристический градиент дуги примем равным $E_0 = 15$ В/см. Так как большинство дуговых замыканий происходит при перекрытии изоляторов, минимальная длина дуги выбиралась по количеству и строительной высоте самих изоляторов. Следует отметить, что при расчете начальной длины дуги для учета ее формы следует брать длину изолятора с запасом 50 % [3].

Результаты расчетов

Исследование проводилось на имитационной модели воздушной ЛЭП при однофазном КЗ. Одновременно с замыканием, мгновенные значения тока пересылались в подпрограмму решения дифференциального уравнения дуги. Результатом такого совместного моделирования является функциональная зависимость изменения сопротивления дуги во времени. В процессе моделирования функция $R_d = R(t)$ играет роль переходного сопротивления, так как входит в контур КЗ. На рис. 4 приведена полученная при совместном решении уравнения дуги и режима модели энергосистемы динамическая ВАХ дуги, начальная длина которой $l_d = 0,7$ м.

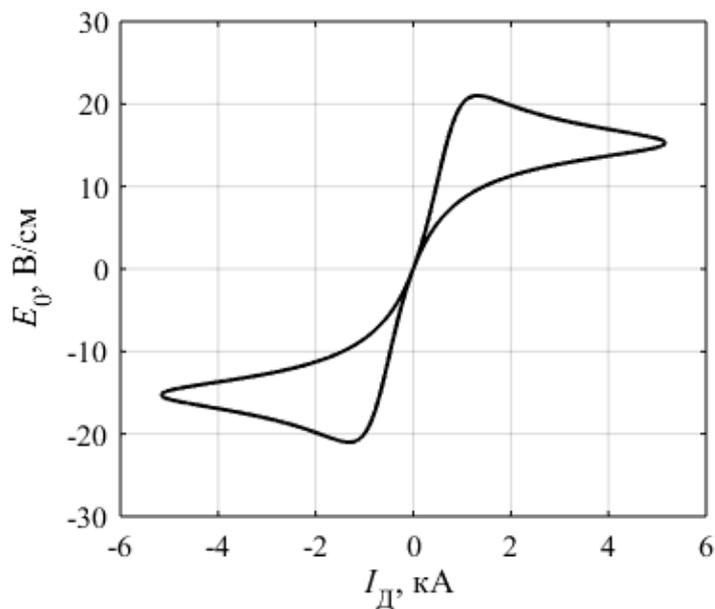


Рис. 4. Динамическая ВАХ открытой электрической дуги

На практике встает вопрос о выборе уставок ДЗ. Для более точной отстройки от переходного сопротивления дуги, зная отношение $I_{д}/l_{д}$, по рис. 5 можно определить среднее сопротивление на дуге при синусоидальном токе, где $l_{д}$ — начальная длина дуги, м; $I_{д}$ — ток дуги, А.

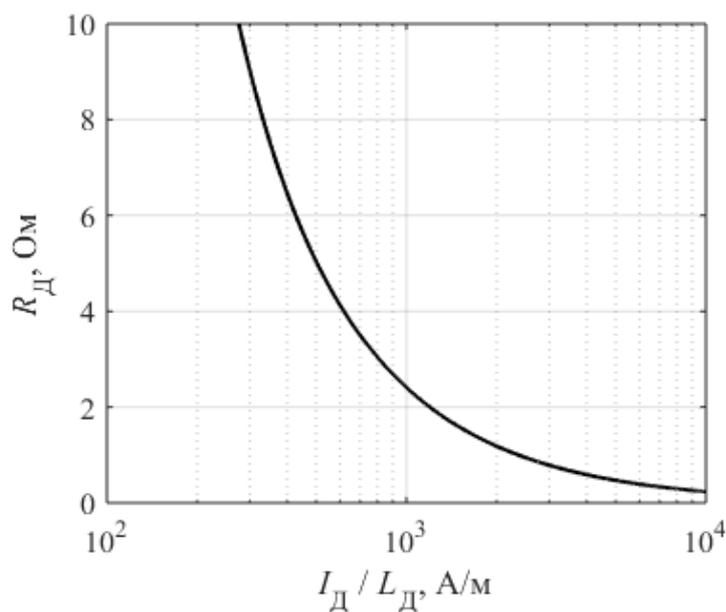


Рис 5. Диаграмма сопротивлений при различных соотношениях $I_{д}/l_{д}$, полученная при моделировании

Для сравнения в табл. 1 приведены примеры расчетных коэффициентов для уравнений (3).

Таблица 1

Результаты моделирования

$l_d, \text{ м}$	$I_d, \text{ А}$	$R_{cp}, \text{ Ом}$	K	I_d / l_d
0,3	3741,0	0,188	2338,13	12470,00
0,7	3644,0	0,451	2345,69	5205,71
1,5	3446,0	1,028	2361,66	2297,33
3,0	3063,0	2,357	2405,99	1021,00
6,0	2253,0	6,943	2607,25	375,50

Примечание – K – коэффициент в уравнениях (3)

Анализируя полученные зависимости можно отметить, что, используемые выражения (3), согласуются с данными, полученными при моделировании электрической дуги. Однако результаты моделирования на рис. 5 позволяют более точно определить среднее сопротивление дуги в широком диапазоне длин и токов дуги.

Выводы

1. Совместный процесс решения дифференциальных уравнений электрической дуги и моделирования аварийных режимов энергосистем позволяет провести анализ влияния переходного сопротивления дуги на работу релейной защиты.

2. Данный подход позволяет построить зависимости средних значений сопротивлений, по которым возможно более точное определение сопротивления электрической дуги, чем по выражениям (3) при расчетах параметров ДЗ.

Библиографический список

1. Колесов, Л.М. Выполнение ступени дистанционной защиты с использованием информации о токах питающих концов линии с ответвлением / Л.М. Колесов, В.В. Можухина // Вестник ИГЭУ. – 2019. – №4. – С. 44-53.
2. Гарке, В.Г. Расчет уставок современной дистанционной защиты / В.Г. Гарке, Е.А. Конова // Релейная защита. – 2011. – №3. – С. 50-56.
3. Циглер, Г. Цифровая дистанционная защита: принципы и применение / Г. Циглер. – М.: Энергоиздат. 2005.
4. Федосеев, А.М. Основы релейной защиты / А.М. Федосеев. – ГЭИ, 1961.
5. Walter, M. Der Selektivschutz nach dem Widerstandsprinzip; Verlag Von Oldenbourg, Munchen / M. Walter. – Berlin, 1933 (in German).
6. Lu, Q. Analysis of the Effects of Arc Volt-Ampere Characteristics on Different Loads and Detection Methods of Series Arc Faults / Q. Lu, Z. Ye, Y. Zhang, T. Wang, Z. Gao // J. Energies. – 2019. – № 12(323). – P. 1-16.
7. Энгель, А. Физика и техника газового разряда / А. Энгель, М. Штеенбек. – ОНТИ, 1935.
8. Weizel, W. Theorie Electricischer Bogen und Funken / W. Weizel, R. Rompe, Leipzig, 1949.
9. Финкельбург, В. Электрические дуги и термическая плазма / В. Финкельбург, Г. Меккер. – Издательство иностранной литературы, 1961.
10. Третьяк, Г.Т. Открытые дуги переменного тока в установках высокого напряжения / Г.Т. Третьяк, Е.Л. Кондор, В.В. Каплан // Труды Всесоюзной электротехнической ассоциации. – №1. – 1935.
11. Буткевич, Ю.В. Гашение открытой дуги переменного тока в установках высокого напряжения / Ю.В. Буткевич // Электричество. – №3. – 1950.
12. Майкопар, А.С. Гашение открытой электрической дуги / А.С. Майкопар // Электричество. – №4. – 1960.

13. Майкопар, А.С. Электрическая дуга с током 10^{-3} - 10^1 А и перекрытие загрязненной изоляции / А.С. Майкопар // Электричество. – №12. – 1964.
14. Strom, A. Long 60-cycle arcs in air / A. Strom. El. Eng. – № 3. – 1946.
15. Бургсдорф, В.В., Открытые электрические дуги большой мощности / В.В. Бургсдорф, // Электричество. – №10. – 1948.
16. Eaton, J. Experimental studies of arcing faults on a 75 kV transmission system / J. Eaton, J. Peak, J. Dunham // Tr. AIEE. 1931. – P. 1469.
17. Залесский, А.М. Исследование вольтовой дуги переменного тока / А.М. Залесский // Вестник электротехники. – №6. – 1930.
18. Suits, C. High pressure arcs in free convection / C. Suits // Phys. Rev. – №6, 1939.
19. Майкопар, А.С. Дуговые замыкания на линиях электропередачи / А.С. Майкопар // Энергия, 1965.
20. Гарке, В.Г. К вопросу о сопротивлении электрической дуги / В.Г. Гарке // Изв. АН ЛССР, серия физ. и техн. наук. – №1. – 1971.
21. Cassie, A. Arc rupture and circuit severity: a new theory / A. Cassie // Bd. And Allied Ind., Res Association, G/X-179, 1939.
22. Анго, А. Математика для электро- и радиоинженеров / А. Анго. – М.: Наука, 1964.
23. Merkushev, A. Implementation of electric arc model in Simulink/SimPowerSystems / A. Merkushev, J. Triaskin // 2014 International Conference on Computer Technologies in Physical and Engineering Applications (ICCTPEA). 2014. DOI: 10.1109/ICCTPEA.2014.6893310.
24. Ghiormez, L. Parameters influence in electric arc modeling / L. Ghiormez, O. Prosteau // 2013 IEEE 8th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI), 2013. – DOI: 10.1109/SACI.2013.6608969.

*Дата поступления
в редакцию: 23.01.2020*

I.T. Titov¹, A.V. Bychkov², N.A. Doni²

TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF THE OPEN ELECTRIC ARC ON THE REMOTE PROTECTION OPERATION PARAMETERS

Chuvash State University n.a. I.N. Ulyanov¹
Research and production enterprise EKRA²

Purpose. For short circuits on medium and high voltage power lines, the remote protection must accurately determine the resistance (or distance) to the short circuit location. Usually, short circuits are accompanied by electric arcs that occur and introduce an active resistance into the short circuit; therefore, it is necessary to estimate the value of this resistance. However, the existing empirical formulas for calculating these resistances differ in scientific sources. The purpose of this article is to derive and refined dependence of the electric arc resistances on some of its parameters, which will allow for more accurate consideration of the arc resistance when calculating remote protection settings.

Methodology. The study uses the Matlab/Simulink, which simulates arc short circuit on a power line. The arc short circuit model is based on solving the differential equations of an open electric arc together with the modeling of emergency modes of the power system. The simulation model is constructed under the condition that the arc column as a whole is considered as a model of a certain radius with a constant temperature value and having a zone with a temperature gradually approaching the ambient temperature in which energy losses occur.

Findings. The results of joint modeling of the electric arc and emergency modes of the power system is a functional dependence of the arc resistance change over time.

Value. The results obtained in the simulation are consistent with the general theory of the open electric arc, which confirms the relevance of this approach in the study of physical processes that occur during arc short circuits. In addition, the results obtained allow us to more accurately calculate the parameters of remote protection in comparison with existing empirical formulas, which is important for modern relay protection.

Key words: remote protection, transfer resistance, the open electrical arc.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 629.336

А.М. Беляев¹, А.А. Васильев¹, Е.В. Жарков², В.С. Макаров¹, В.В. Беляков¹

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ШАССИ МОБИЛЬНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА С ГУСЕНИЧНО-МОДУЛЬНЫМ ДВИЖИТЕЛЕМ ПО ПЕСЧАНОМУ ОПОРНОМУ ОСНОВАНИЮ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹
ООО «Объединенный инженерный центр»²

Рассматривается процесс имитационного моделирования движения шасси мобильного робототехнического комплекса (МРК) с гусенично-модульным движителем по песчаному опорному основанию. Показаны фрагменты построения цифрового двойника МРК в программном комплексе Adams Tracked Vehicle (ATV) с учетом массовых и геометрических параметров шасси, а также характеристик деформируемого грунта. Приведены 3D виды разработанной модели МРК. Дано описание проведенного цифрового эксперимента с указанием типовых элементов движения. Показаны графики изменения моментов сопротивления по бортам шасси и суммарных сопротивлений движения при прямолинейном и криволинейном движении по песчаному пляжу. Получены следующие средние значения момента на одном борту при прямолинейном движении – 172 Н·м, при повороте с радиусом 5 м 195 и 217 Н·м соответственно для отстающего и забегающего бортов МРК; средние значения сопротивления движения при прямолинейном движении – 1606 Н, при повороте с радиусом 5 м 1943 Н. Исходными данными для характеристик опорного основания типа «песок» и данными для подтверждения результатов моделирования, а именно – значения сил сопротивления, были данные, полученные в НИЛ «Моделирование природных и техногенных катастроф» НГТУ им. Р.Е. Алексеева в рамках экспедиций на о. Сахалин м. Свободный в 2016 и 2017 гг. при испытании МРК для мониторинга прибрежной зоны.

Ключевые слова: подвижность, моделирование, гусеничный движитель, береговая зона, Adams, ATV, террамеханика, подвижность, цифровой двойник.

Введение

Мониторинг береговых зон может проводиться с помощью стационарных постов либо специальных мобильных робототехнических комплексов (МРК) [1-9]. Для решения задачи обеспечения подвижности последних необходимо выбрать шасси с параметрами, наиболее подходящими к условиям эксплуатации, а также требованиям, накладываемым перечнем выполняемых работ. В рамках научной школы Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева понятие подвижности рассматривается как интегральное эксплуатационное свойство транспортно-технологических машин, определяющее ее способность выполнять поставленную задачу с оптимальной адаптивностью к условиям эксплуатации и техническому состоянию самой машины, т.е., возможность машины противостоять внешним и внутренним факторам, препятствующим выполнению поставленной задачи [10-12]. Данное понятие выступает интегральным по отношению ко всем предыдущим и является одним из определяющих в теории подвижности В.В. Белякова [10-12].

Для оценки подвижности в зависимости от требуемых задач можно использовать различные математические аппараты. Одним из них является имитационное моделирование с применением программ MSC.ADAMS. Вместе с тем, для подтверждения расчетов требуется проверка на реальном объекте, в качестве которого в настоящем исследовании выступает МРК для мониторинга прибрежной зоны, разработанный в НИЛ «Моделирование природ-

ных и техногенных катастроф» НГТУ им. Р.Е. Алексеева [2, 7, 9, 13-15]. Отличительной особенностью данного МРК является возможность установки колесного, гусенично-модульного и роторно-винтового движителя. В данной статье рассмотрен вопрос моделирования движения шасси с модульно-гусеничным движителем.

Теоретические исследования

Для исследования МРК было использовано специализированное приложение для среды Adams, которое позволяет моделировать транспортные средства на гусеничном ходу. С помощью Adams Tracked Vehicle (ATV) проводится построение гусеничных машин, а также моделируется их движение с различными скоростями по твердому или деформируемому грунту.

Допущения. При создании цифрового двойника, моделирующего движение МРК с гусенично-модульным движителем по песчаному пляжу, были использованы следующие допущения:

- корпус, опорные катки, траки гусеничной цепи представлены в виде абсолютно жестких тел;
- гусеничная цепь состоит из траков, объединенных между собой силовым взаимодействием;
- корпус, траки и опорные катки взаимодействуют с опорным основанием;
- опорное основание описывается моделью Беккера;
- налипание грунта на корпус, траки и опорные катки отсутствует;
- траектория движения контролируется за счет PID-регулятора, в котором входным сигналом является расстояние между заданной траекторией движения и «контрольной точкой», привязанной к корпусу шасси, а выходным сигналом – крутящий момент на ведущих звездочках.

Основные уравнения в модели движения. Программный комплекс MSC.ADAMS создан для решения задач динамики твердого тела и использует систему дифференциальных уравнений. Моделирование гусеничных машин реализовано в данном комплексе за счет модуля MSC.ADAMS Tracked Vehicle(ATV). Модуль ATV включает в себя библиотеку элементов, встречающихся на гусеничной технике (балансиры, торсионы, опорные и поддерживающие катки, ленивец, трак, ведущие звезды и др.) Основной в данной программе является система уравнений, описывающих динамику системы твердых тел, находящихся под действием заданных сил и стесненных голономными связями – уравнения в форме Эйлера-Лагранжа с множителями.

Динамические уравнения Эйлера для поступательного движения (1):

$$\begin{aligned} m \, dV_x/dt &= \sum F_x \\ m \, dV_y/dt &= \sum F_y \\ m \, dV_z/dt &= \sum F_z \end{aligned} \quad (1)$$

Динамические уравнения Эйлера для вращательного движения (2):

$$\begin{aligned} I_x \, d\omega_x/dt + (I_z - I_y)\omega_y\omega_z &= M_x \\ I_y \, d\omega_y/dt + (I_x - I_z)\omega_x\omega_z &= M_y \\ I_z \, d\omega_z/dt + (I_y - I_x)\omega_x\omega_y &= M_z \end{aligned} \quad (2)$$

В зависимостях (1) и (2) m, I_i – масса и моменты инерции моделируемых тел относительно i -ой оси; $dV_i/dt, d\omega_i/dt, \omega_i$ – линейные и угловые ускорения, угловая скорость относительно i -ой оси, F_i, M_i – силы и моменты в направлении i -ой оси.

Создание цифрового двойника шасси МРК в ATV

МРК состоит из корпуса и четырех гусеничных модулей, включающих опорные катки, ведущую звезду и гусеничной цепи. Для формирования цифрового двойника МРК была использована конструкторская документация, разработанная на шасси. На рис. 1 показан чертеж общего вида шасси с гусенично-модульным движителем.

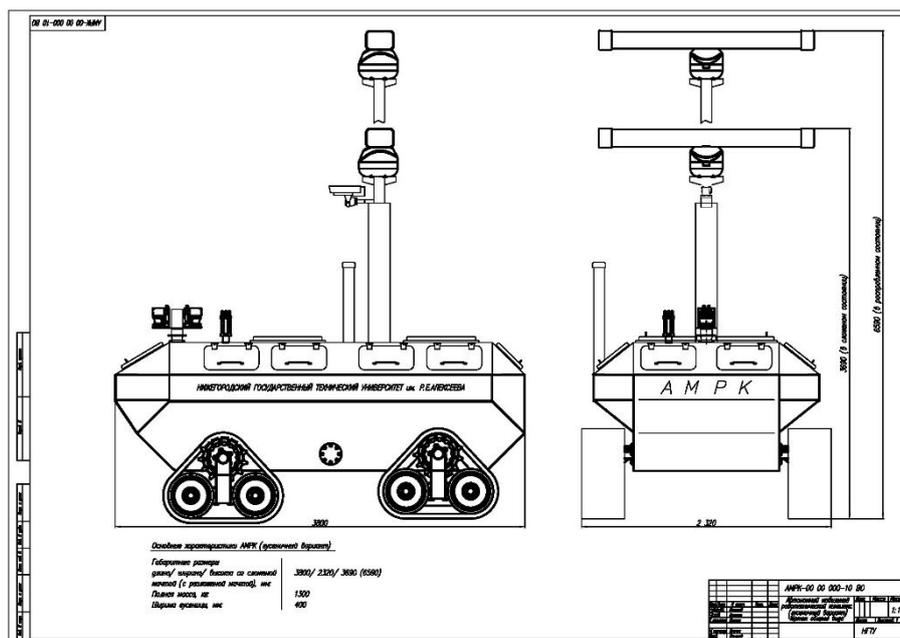


Рис. 1. Общий вид шасси МРК с гусенично-модульным движителем

В модели учитываются геометрические параметры и массо-инерционные характеристики корпуса, в том числе, положение центра тяжести. Ведущие звезды радиусом 215 мм приводят в движение гусеничный обвод по средствам зацепления с траками гусеницы. Зацепление ведущей звезды и траков происходит по средствам контактного взаимодействия с каждым из траков гусеничной цепи. На рис. 2 (слева) представлена визуализация ведущих звезд. Гусеничная цепь каждого модуля состоит из 29 траков с шагом 99 мм. На рис. 2 (справа) представлена визуализация трака.

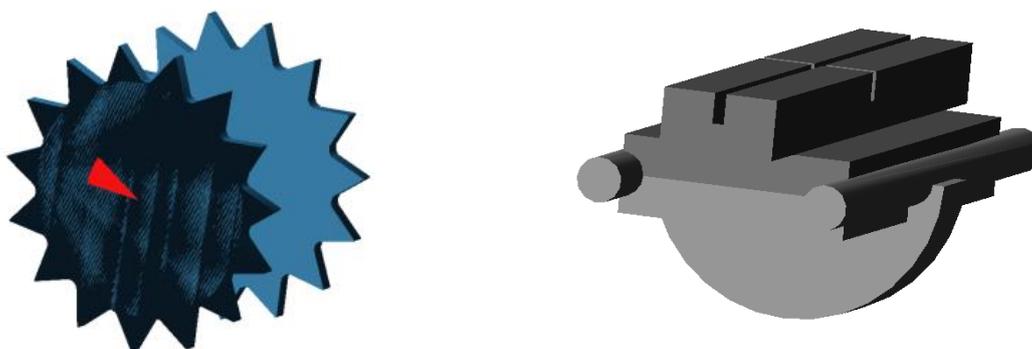


Рис. 2. Визуализация ведущей звезды и трака

В результате построения шасси МРК в среде ATV имеем следующий вид (рис. 3).

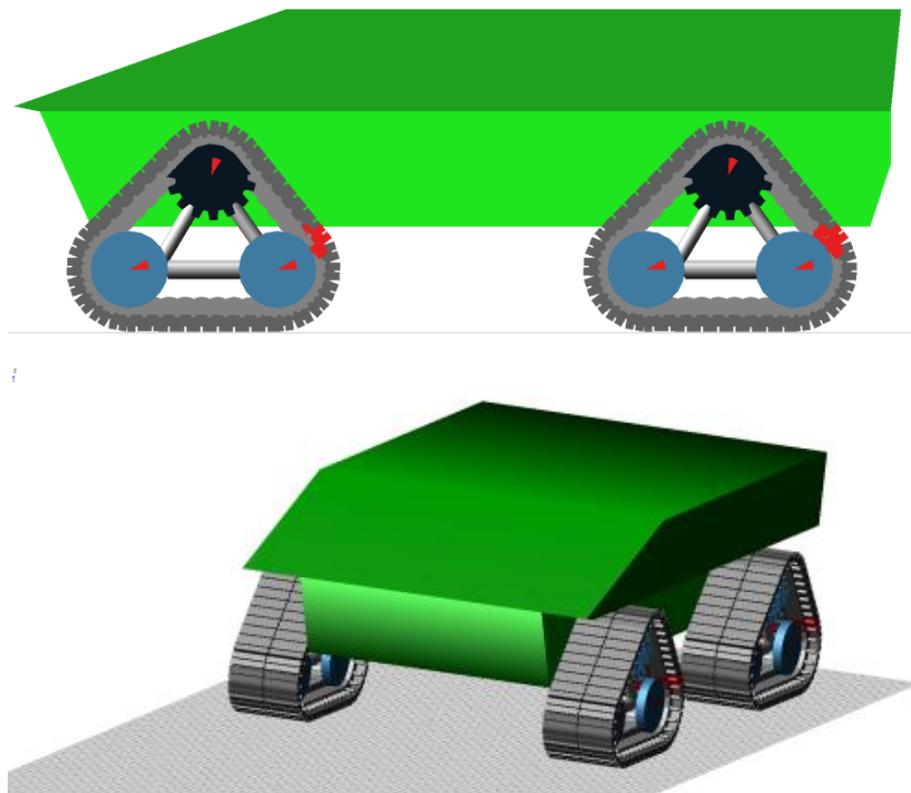


Рис 3. Модель МРК в ATV. Вид сбоку (сверху) и $\frac{3}{4}$ (снизу)

Создание деформируемого опорного основания в ATV

Модель деформируемого грунта имеет «память» и хранит в себе историю нагружения. В программном комплексе ATV модель деформируемого грунта визуализирована в виде прямоугольной сетки. Процесс создания деформируемого опорного основания в программном комплексе ATV сводится к выбору файла свойств грунта [16-20] с заданными характеристиками из базы данных.

Файл свойств деформируемого опорного основания представляет собой набор экспериментально полученных коэффициентов, описывающих тип грунта. В качестве исходных данных для моделирования были взяты данные с экспериментов, проведенных в рамках экспедиций на о. Сахалин м. Свободный в 2016 и 2017 гг. при испытании МРК для мониторинга прибрежной зоны. Основными исходными параметрами являются следующие: модуль упругости (E_y , Н/см²), угол внутреннего трения ($\varphi_{гр}$, °), удельное сцепление грунта ($C_{гр}$, МПа), плотность грунта (ρ , г/см³). При этом часть параметров связана между собой эмпирическими выражениями (3), и может быть вычислена через значение сопротивления пенетрации (E_w , Н/см²).

$$\begin{aligned} E_y &= 0,14 E_w + 4,47 \\ \varphi_{гр} &= 12,27 + 0,033 E_w \\ C_{гр} &= 0,0094 + 5,9 \cdot 10^{-5} E_w. \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, на основании данных [21, 22] для моделирования были выбраны следующие значения: $E_w = 60$ Н/см², $E_y = 12,87$ Н/см², $\varphi_{гр} = 14,25^\circ$, $C_{гр} = 12,94$ кПа, $\rho = 1,8$ г/см³.

В результате пересчетов и задания необходимых данных было создано песчаное опорное основание. МРК на деформируемом грунте (рис. 4).

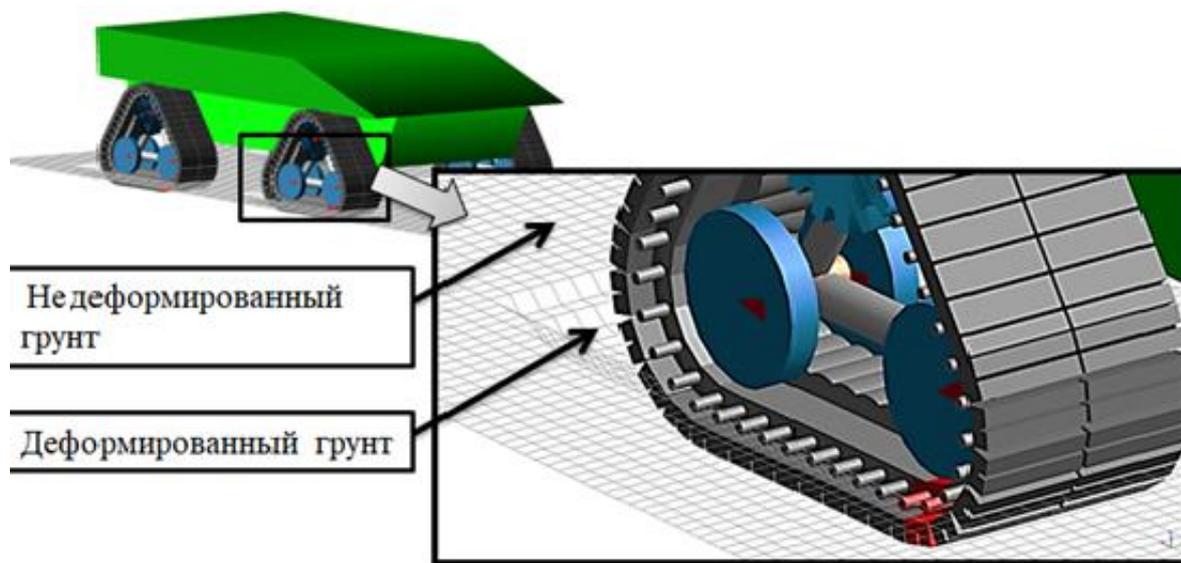


Рис. 4. МРК на деформируемом грунте

Моделирование движения МРК в ATV

Моделирование движения МРК было проведено по «С»-образной траектории с выделением следующих пяти характерных участков (рис. 5).

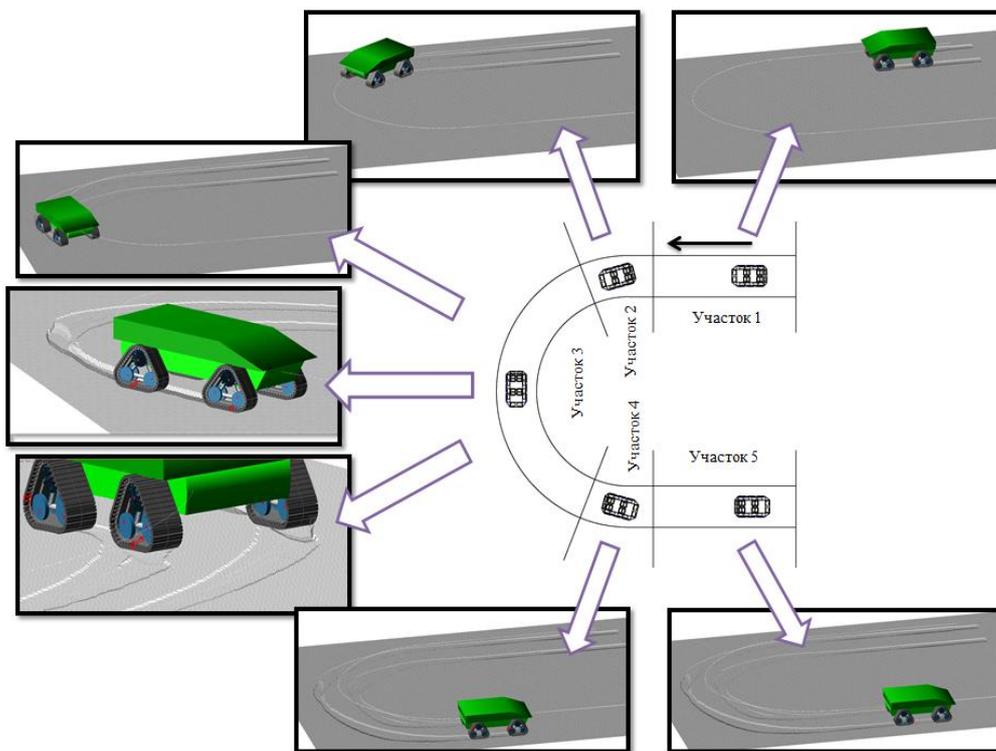


Рис. 5. Характерные участки моделирования криволинейного движения МРК по песчаному опорному основанию

На рис. 5 показаны следующие характерные участки:

- участок 1 – трогание и разгон до заданной скорости;
- участок 2 – вхождение в поворот;
- участок 3 – установившееся криволинейное движение с заданным радиусом;
- участок 4 – выход из поворота;
- участок 5 – прямолинейное установившееся движение.

При моделировании движение МРК задавалось по опорному основанию с характеристиками, соответствующими математическому ожиданию параметров для песчаного пляжа береговых зон. МРК на участке 1 разогнался до скорости 25 км/ч. Далее происходило вхождение в поворот (участок 2), с последующим равномерным криволинейным движением (участок 3) с радиусом поворота 5 м, выходом из поворота (участок 4) и равномерным прямолинейным движением (участок 5).

При моделировании фиксировались необходимые параметры, в том числе: моменты и мощности на ведущих звездах, буксование, положение, скорость и ускорение центра масс шасси, а также другие необходимые параметры. На рис. 6 показаны графики положения центра масс МРК в плане сверху, скорость на участке 1.

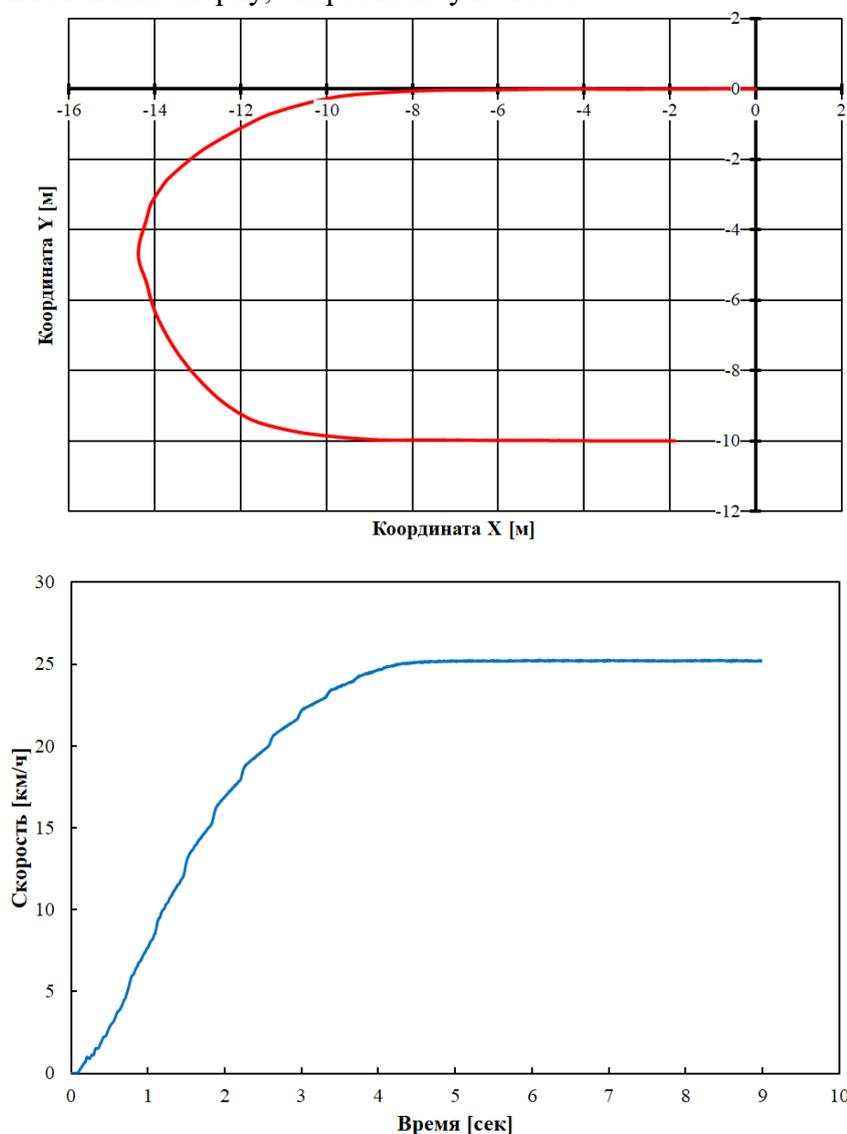


Рис. 6. Примеры положения центра масс МРК в плане сверху (сверху) и скорость на участке 1 (снизу)

На рис. 7 (сверху) приведены примеры изменения крутящего момента на ведущих звездах гусеничных модулей одного борта при прямолинейном движении, на рис. 7 (снизу) – моменты на ведущих колесах гусеничных модулей при повороте.

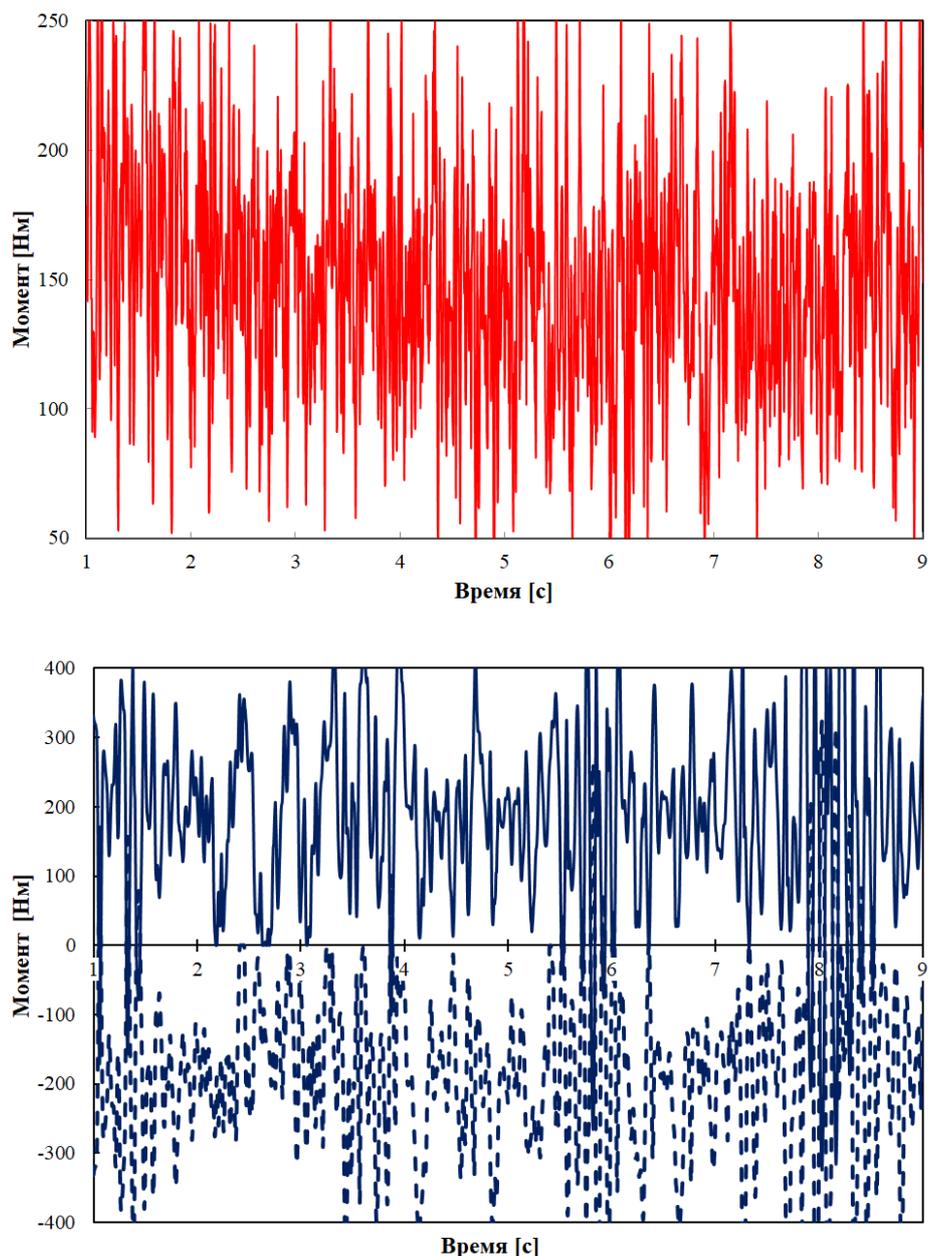


Рис. 7. Графики изменения крутящего момента на ведущих звездах при прямолинейном движении (сверху) и криволинейном (снизу)

На графиках на рис. 7 (снизу) положительные значения соответствуют моментам на внешней стороне МРК, отрицательные – на внутренней. Средние значения момента на одном борту при прямолинейном движении составили 172 Н·м, при криволинейном 195 и 217 Н·м, соответственно, для отстающего и забегающего бортов шасси. На рис. 8 показано изменение силы суммарной сопротивлению движению для случая прямолинейного (сверху) и криволинейного (снизу) движения. Средние расчетные значения при прямолинейном движении составили 1606 Н, при криволинейном – 1943 Н.

При моделировании значения моментов и сил имеют явные всплески. Это связано с тем, что гусеничная цепь моделируется как взаимодействие конечного числа траков,

и в каждый момент времени их число может быть различным. На практике данная неравномерность сглаживается в резинометаллических шарнирах, а также тем, что гусеничная цепь – не абсолютно жесткое тело. Для расчетов подвижности и эффективности МРК с гусенично-модульным двигателем достаточно использовать средние значения сил и моментов.

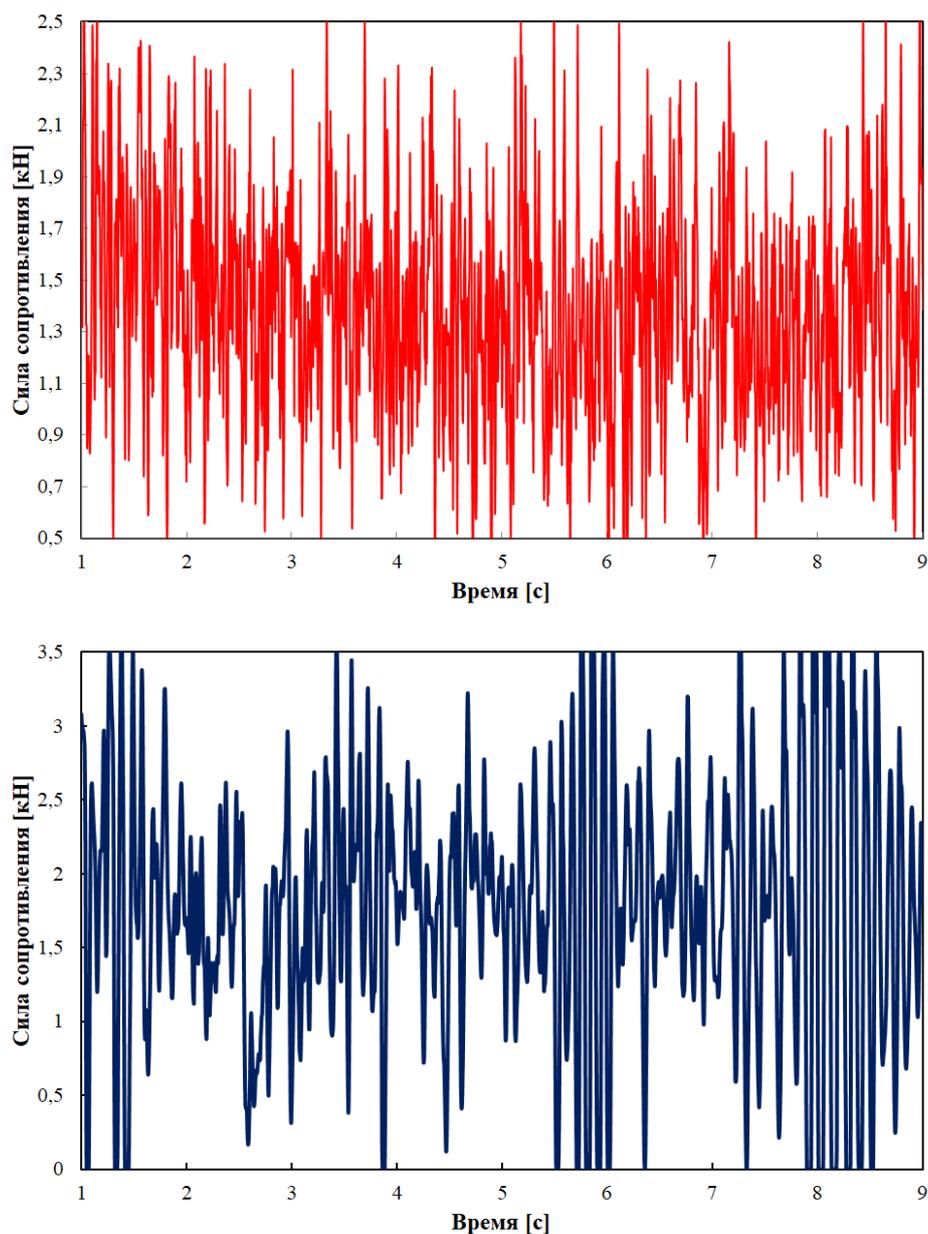


Рис. 8. Графики изменения силы сопротивления при прямолинейном (сверху) и криволинейном движении (снизу)

Для проверки адекватности разработанной цифровой модели движения МРК по песчаному грунту были сравнены данные математического моделирования с данными эксперимента, проведенного авторами работы в НИЛ «Моделирования природных и техногенных катастроф» НГТУ им. Р.Е. Алексеева в рамках экспедиций на о. Сахалин м. Свободный в 2016 и 2017 гг. при испытании МРК для мониторинга прибрежной зоны.

Экспериментальные исследования

Для выбора исходных данных для моделирования были проведены экспериментальные данные по замеру параметров опорной поверхности и сопротивления движения МРК [13-15, 21-26].

Определение параметров песчаного основания проводилось с применением поверенного оборудования для испытания грунтов, а именно – грунтового пенетromетра (ПГ-1), показанного на рис. 9 (слева). Для определения статистических характеристик сопротивления пенетрации грунта и связанных с ним модуля упругости, угла внутреннего трения, удельного сцепления грунта, было проведено более тысячи измерений. Дальнейшее увеличение измерений не влияло на величину средних значений и характер распределения. Плотность измерялась путем взвешивания мерных проб грунта в соответствии с ГОСТ 5180-84 методом режущего кольца с применением оборудования ПЛЛ-9. На исследуемую выравненную поверхность грунта устанавливалось режущее кольцо. Далее, оно вдавливалось в грунт на 5-10 мм глубже, чем верхний уровень опорной поверхности, при этом сжатие песка внутри кольца не допускалось. Затем специальной лопаткой грунт порезался ниже нижнего уровня режущего кольца; после чего части грунта, выходящего за мерный объем, аккуратно счищались ножом. Полученный образец помещался в специально подготовленный мерный стаканчик для последующего взвешивания и определения влажности.



Рис. 9. Определение параметров песчаного опорного основания [21]

В результате были получены характеристики грунта, вошедшие в модель грунта в ATV. Натурные испытания сопротивления движения производились на ровных горизонтальных участках местности. Во время исследований сила сопротивления движению (качению) определяется методом буксирования исследуемой машины. За трос с тензметрическим датчиком силы электронного динамометра ДОУ-3-20И транспортное средство буксировалось со скоростью 1 м/с автомобилем-тягачом. На рис. 10 показана схема определения силы сопротивления.

Разброс значений силы сопротивления был в пределах 1450-1710 Н. Среднее значение составило 1600 Н, максимальное отклонение составило не более 10 %. [21] Эти данные использовались для отладки цифровой модели МРК при прямолинейном движении по песчаному полотну пути.

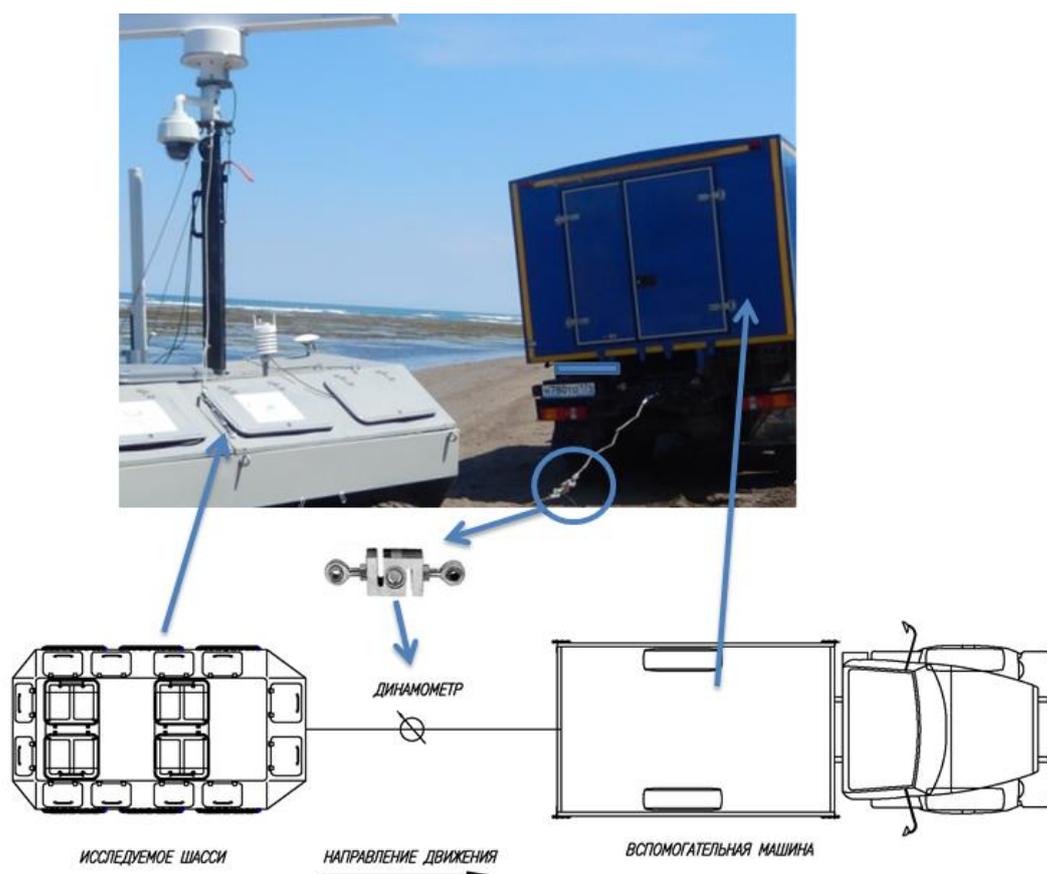


Рис. 10. Схема определения силы сопротивления движения МРК

Выводы

Создан цифровой двойник позволяющего производить моделирование движения шасси мобильного робототехнического комплекса с гусенично-модульным движителем по песчаному опорному основанию. Использован программный комплекс MSC.ADAMS Tracked Vehicle (ATV). Показаны основные уравнения движения используемые в ATV для моделирования движения машин. Приведены допущения, используемые в модели.

В качестве объекта исследования был выбран мобильный робототехнический комплекс (МРК) для мониторинга прибрежной зоны, разработанный авторами работы в НИЛ «Моделирования природных и техногенных катастроф» НГТУ им. Р.Е. Алексеева.

Построена модель МРК с гусенично-модульным движителем в программе ATV, учитывающая масово-габаритные характеристики реального объекта. На основании ранее проведенных исследований были получены основные характеристики (модуль упругости, угол внутреннего трения, удельное сцепление грунта, плотность) поверхности движения исследуемого МРК. Определен типовой участок для моделирования МРК, а именно: движение по «С»-образной траектории с выделением 5 характерных участков: участок 1 – трогание и разгон до заданной скорости; участок 2 – вхождение в поворот; участок 3 – установившееся криволинейное движение с заданным радиусом; участок 4 – выход из поворота; участок 5 – прямолинейное установившееся движение.

Проведено имитационное моделирование движения МРК по песчаному опорному основанию. Построены графики изменения параметров модели во времени. Установлено, что средние значения момента на одном борту при прямолинейном движении составили 172 Н·м, при повороте с радиусом 5 м 195 и 217 Н·м соответственно для отстающего и забегающего бортов шасси. Средние значения сопротивления движения при прямолинейном движении составили 1606 Н, при криволинейном 1943 Н. Таким образом, прирост сопротивления

движению (суммарного момента на ведущих звездах) при повороте с радиусом 5 м и при движении по песчаному опорному основанию составил порядка 20 %.

В рамках экспедиций на о. Сахалин м. Свободный в 2016 и 2017 гг. при испытании МРК для мониторинга прибрежной зоны были проведены экспериментальные исследования параметров песчаного опорного основания, которые легли в основу модели упругого грунта в ATV. Средние значения силы сопротивления, полученные на реальном объекте, составили 1600 Н и были использованы для отладки цифровой модели МРК при прямолинейном движении по песчаному полотну пути.

Дальнейшие исследования связаны с моделированием разворота машины с разными радиусами поворота, в том числе, на месте, движением по другим типам опорных оснований, оценке эффективности работы МРК в береговой зоне.

Работа проведена при финансовой поддержке грантов Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых ученых – докторов наук МД-226.2020.8.

Библиографический список

1. **Barber, D.M.** Vehicle based waveform laser scanning in a coastal environment / D.M. Barber, J.P. Mills // Proceedings of 5th International Symposium on Mobile Mapping Technology, Pradua, Italy, 2007.
2. **Beliakov, V.** Coastal monitoring of the Okhotsk Sea using an autonomous mobile robot / V. Beliakov, A. Zaytsev, P. Beresnev, V. Filatov, V. Makarov, D. Tyugin, D. Zeziulin, E. Pelinovsky, A. Yalciner, B. Yalciner, O. Oshmarina, A. Kurkin // Science of Tsunami Hazards. – 2017. – Vol. 36-1. – P.1-12.
3. **Bio, A.** Methods for coastal monitoring and erosion risk assessment: two Portuguese case studies / A. Bio [et al.] // Journal of Integrated Coastal Zone Management. – 2015. – Vol. 15-1. – P. 47-63.
4. **Didier, D.** Coastal Flood Assessment Based on Field Debris Measurements and Wave Runup Empirical Model / D. Didier [et al.] // J. Mar. Sci. Eng. – 2015. – Vol. 3. – P. 560-590.
5. **Incoul, A.** Mobile laser scanning of intertidal zones of beaches using an amphibious vehicle / A. Incoul [et al.] // INGENEO 2014: 6th international conference on engineering surveying, Prague, Czech Republic, 2014. – P. 87-92.
6. **Kramer, J.** Performance of the StreetMapper Mobile LiDAR Mapping System in «Real World» Projects» / J. Kramer, G. Hunter // Photogrammetric Week '07, 2007. – P. 215-225.
7. **Kurkin, A.** Autonomous Robotic System for Coastal Monitoring / A. Kurkin, E. Pelinovsky, D. Tyugin, A. Giniyatullin, O. Kurkina, V. Belyakov, V. Makarov, D. Zeziulin, K. Kuznetsov // Twelfth international conference on the Mediterranean coastal environment (MEDCOAST 15). – 2015. – Vols 1 and 2. –P. 933-943.
8. **Wübbold, F.** Application of an autonomous robot for the collection of nearshore topographic and hydrodynamic measurements / F. Wübbold [et al.] // Coastal Engineering Proceedings. – 2015. – № 1, – P.53.
9. **Zaytsev, A.** Coastal monitoring of the Okhotsk sea using an autonomous mobile robot / A. Zaytsev, V. Belyakov, P. Beresnev, V. Filatov, V. Makarov, D. Tyugin, D. Zeziulin, E. Pelinovsky, A. Yalciner, B. Yalciner, O. Oshmarina, A. Kurkin, // Science of Tsunami Hazards. – 2015. – Vol. 36. – Issue 1. – P. 1-12.
10. **Беляков, В.В.** Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, А.М. Беляев, М.Е. Бушуева, У.Ш. Вахидов, К.О. Гончаров, Д.В. Зезюлин, В.Е. Колотилин, К.Я. Лелиовский, В.С. Макаров, А.В. Папунин, А.В. Тумасов, А.В. Федоренко // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – № 3 (100). – С. 145-175.
11. **Беляков, В.В.** Подвижность наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, Д.В. Зезюлин, В.Е. Колотилин, В.С. Макаров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – № 4 (101). – С. 72-77.
12. Вездеходные транспортно-технологические машины. Основы теории движения. Научно-техническое издание (монография) / под общ. ред. В.В. Белякова и А.П. Куляшова. – Нижний Новгород: ТАЛАН, 2004. – 961 с.

13. **Kurkin, A.** Study of coastal soil surfaces of sakhalin island / A. Kurkin, V. Makarov, D. Zeziulin, P. Beresnev, V. Filatov, D. Porubov // Paper presented at the 13th International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation, MEDCOAST 2017. – 2017. – Vol. 2. – P.775-785.
14. **Kurkin, A.** Unmanned Ground Vehicles for Coastal Monitoring / A. Kurkin, E. Pelinovsky, D. Tyugin, O. Kurkina, V. Belyakov, V. Makarov, D. Zeziulin // International Journal of Imaging and Robotics. – 2017. – Vol. 17-1. – P. 64-75.
15. **Kurkin, A.** Autonomous Mobile Robotic System for Environment Monitoring in a Coastal Zone / A. Kurkin, D.Y. Tyugin, V.D. Kuzin, A.G. Chernov, V.S. Makarov, P.O. Beresnev, V.I. Filatov, D.V. Zeziulin // Procedia Computer Science. – 2017. – Vol. 103. – P. 459-465.
16. **Агейкин, Я.С.** Проходимость автомобилей / Я. С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
17. **Барахтанов, Л.В.** Проходимость автомобиля / Л.В. Барахтанов, В.В. Беляков, В.Н. Кравец. – Нижний Новгород: НГТУ, 1996. – 200 с.
18. Полотно пути транспортно-технологических машин. Учебник / под ред. В.В. Белякова, А.А. Куркина; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексева. – Н. Новгород, 2014. – 447 с.
19. **Bekker, M.** Theory of land locomotion / M. Bekker. – University of Michigan, Press, 1960. – 520 p.
20. **Wong, J.Y.** Terramechanics and Off-Road Vehicle Engineering / J.Y. Wong. – Elsevier, 2010. – 463 p.
21. **Макаров, В.С.** Разработка научно обоснованных технических решений по созданию подвижных комплексов мониторинга береговых зон. Диссертация... докт. техн. наук: 05.05.03 М: Моск. гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана, 2017.
22. **Makarov, V.** Study of trafficability conditions of typical soils of coastal zones of sakhalin island (Russian Federation) / V. Makarov, V. Filatov, U. Vahidov, A. Kurkin, V. Belyakov // Paper presented at the 19th International and 14th European-African Regional Conference of the ISTVS, 2017.
23. **Belyaev, A.M.** Field research of drag-and-traction characteristics of mobile robotic system in coastal zone / A.M. Belyaev, V.S. Makarov, A.I. Markovnina, V.V. Belyakov // Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1177(1) doi:10.1088/1742-6596/1177/1/012050.
24. **Belyaev, A.M.** Study of efficiency of a 6x6 all-terrain vehicle in coastal zone / A.M. Belyaev, V.V. Belyakov, V.S. Makarov // Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 709(4) doi:10.1088/1757-899X/709/4/044030.
25. **Belyaev, A.M.** Method of assessment of special wheel chassis mobility in cases of sand-gravel bases crossing // A.M. Belyaev, V.S. Makarov // Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 194(2) doi:10.1088/1755-1315/194/2/022019.
26. **Belyaev, A.M.** Analysis of the main bases of the coastal zone, as a pathway for the movement of special vehicle and monitoring complexes / A.M. Belyaev, A.A. Zakharov, V.S. Makarov, V.A. Zuyev, V.N. Kravets // Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 386(1) doi:10.1088/1757-899X/386/1/012002.

Дата поступления

в редакцию: 01.04.2020

A.M. Belyaev¹, A.A. Vasiliev¹, E.V. Zharkov², V.S. Makarov¹, V.V. Belyakov¹

RESEARCH OF THE MOVEMENT OF A CHASSIS OF A MOBILE ROBOTIC COMPLEX WITH A TRACK-MODULAR MOVER ON A SAND SURFACE

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev¹
LLC United Engineering Center²

Purpose: This article discusses the relevance of developing a digital twin of a mobile robotic complex with track-modular mover for modeling curved motion along a deformable sand surface.

Design / methodology / approach: The mathematical models used in the Adams Tracked Vehicle (ATV) are reviewed. The simulation of the movement along the "C" -shaped trajectory with the allocation of 5 characteristic sections. Theoretical and experimental data are compared.

Findings: As a result of the calculations, the following average values of the moment on one side were obtained with rectilinear movement - 172 Nm, when turning with a radius of 5 meters 195 and 217 Nm, respectively, for lagging and running sides of MRC; the average values of the resistance to movement in a rectilinear motion - 1606 N, when turning with a radius of 5 meters 1943 N. The increase in resistance to movement (total moment on the drive wheel) when turning with a radius of 5 meters and when moving along a sandy surface was about 20%.

Research limitations/implications: This study was carried out for MRC with a track-modular mover developed at the Laboratory of Modeling of Natural and Anthropogenic Disasters NNSTU n.a. R.E. Alekseev.

Originality/value: A new model of the digital twin of MRC is presented, which allows simulating the movement along a sandy support base. A new approach has been developed to identify new 5 typical sections of the «C» -shaped trajectory.

Key words: mobility, modeling, track mover, coastal zone, Adams, ATV, terra-mechanics, mobility, digital twin.

УДК 656.13

А.С. Вашурин, Ю.И. Молев, Д.Н. Прошин, Ю.П. Трусков

РАЗРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ К УСТОЙЧИВОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПРИ ЭКСТРЕННОМ ТОРМОЖЕНИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Разработана методика определения вероятности возникновения заноса автомобиля при экстренном торможении. Оценка данной вероятности выполнена на основе обработки экспериментальных данных, полученных при испытаниях техники производства ОАО «ГАЗ» в период с 2010 по 2018 гг. Изложены методики получения расчетных величин поперечных ускорений, возникающих при прямолинейном движении автомобиля, движении по криволинейному участку дороги и выполнении контраварийных маневров. Экспериментальные и теоретические данные обладают хорошей сходимостью. Проанализированы нормативные требования к аварийности дорожного движения. Полученные результаты позволяют изготовителю более обоснованно подойти к выбору параметров автомобилей для обеспечения безопасности дорожного движения.

Ключевые слова: автомобиль, поперечное ускорение, занос, безопасность дорожного движения, вероятность события.

Обоснование необходимости и цели работы

Одним из путей повышения безопасности дорожного движения является совершенствование требований к конструкции транспортного средства, в том числе – направленных на поддержание устойчивости транспортных средств при экстренном торможении. Широкое распространение автомобилей с антиблокировочной системой торможения (ABS) и системой стабилизации движения (ESP) не окончательно решают поставленную проблему, главным образом, потому, что около 50 % автомобилей на наших дорогах не имеют указанных систем. Кроме того, в условиях экстренного торможения системы помощи водителю не всегда действуют корректно в связи с тем, что процесс поведения машин в заносе до конца точно не смоделирован [1-6].

Термин «занос» определяется как проявление технической неустойчивости на конечном интервале времени [7, 8]. Он возникает, когда контактная сила достигает своего предельного значения, равного силе трения трогания. Это может происходить в двух случаях: при воздействии на автомобиль достаточно больших боковых сил и в ситуациях, когда продольные компоненты контактных сил велики при этом для возникновения бокового скольжения оси относительно малых боковых сил. Таким образом, необходимым условием заноса является наличие боковых сил. Отсутствие же заноса при торможении может быть обеспечено его устойчивостью – способностью системы сохранять текущее состояние при влиянии внешних воздействий [7].

Исследование условий возникновения заноса автомобилей связано с составлением и решением систем дифференциальных уравнений высокого порядка. При этом качественный анализ получаемых зависимостей является практически невозможным событием, а численное моделирование, особенно в реальном времени, затруднено значительным изменением параметров движения во времени. Это приводит к необходимости проведения интегрирования по времени процесса с малым шагом, в условиях, когда сам процесс от начала до конца длится более 3-10 с. Данный подход является, во-первых, чрезвычайно затратным, во-вторых, малопродуктивным, а для целей исследования изучения условий возникновения заноса – еще и избыточным. Приближенное моделирование заноса автомобиля является наиболее актуальным направлением научных исследований.



Рис. 1. Типичный характер заноса при экстренном торможении на дороге с низкими сцепными свойствами [12]

Необходимо отметить, что отсутствие статистических данных, несовершенство учета влияния технического состояния, конструкции автомобилей на установление причинно-следственной связи между ними и ДТП не позволяет в настоящее время выработать адекватные управленческие решения, направленные на снижение количества ДТП, обусловленных техническим состоянием транспортных средств. При этом эффективность таких решений, напрямую зависит от достоверности начальной информации. Отсутствие федерального учета аварийности, связанной с техническим состоянием различных марок и моделей транспортных средств, годов их выпуска, также отрицательным образом сказываются на анализе общей картины аварийности. Поэтому работа, направленная на повышение безопасности дорожного движения, методом статистической обработки данных, а также ее сравнение с параметрами технического состояния транспортных средств является в высшей степени актуальной.

Методика выполнения работы

В настоящее время в Российской Федерации действует ГОСТ 31507-2012 «Автомобильные транспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытаний» [8], согласно которому проводятся исследования транспортных средств на устойчивость при опрокидывании на стенде (п. 4.3.) при испытаниях «рывок руля» (п. 4.4.) и комплексные испытания совместно с управляемостью вида «поворот» и «переставка» (п. 4.5) и «пробег» (п. 4.7). Испытания проводят на дорогах как с сухим, так и с мокрым покрытием (пробег). Минимальный коэффициент сцепления при испытаниях

должен быть не менее 0,3 (п. 5.2.7). Определим, с каким расчетным боковым ускорением должен двигаться автомобиль по прямой дороге. Согласно ГОСТ 31507-2012, средняя угловая скорость корректирующих поворотов рулевого колеса при движении по полосе заданной ширины должна находиться в пределах от 7 до 14 $^{\circ}/с$ (п. 4.6.2). Считая величину передаточного отношения рулевого механизма равной от 16 до 25 (в среднем – 20), получим, что средняя скорость вращения колес автомобилей при движении по прямой будет находиться в пределах 0,5-0,6 $^{\circ}/с$ (для скорости движения 22,22 м/с данная величина составит 0,0225 $^{\circ}/м$). Величина «скорость поворота управляемых колес в зависимости от величины пробега автомобиля» определится зависимостью $\varpi = 0,0225 \cdot x$. Тогда максимальный угол поворота колес в зависимости от пробега будет равным $\alpha = 0,01125 \cdot x^2$. Полагая ширину коридора шире транспортного средства на 0,4 м (табл. 7 ГОСТ 31507-2012), получим полупериод колебания автомобиля в рамках допустимого коридора:

$$\frac{0,4}{2} = \int \sin \alpha dx = \int \alpha dx = 0,00375 \cdot x^3 \rightarrow x = \sqrt[3]{\frac{0,2}{0,00375}} = 3,76 \text{ м}$$

При этом максимальный угол поворота управляемого колеса при данном пробеге составит 0,16 $^{\circ}$. Радиус кривизны траектории автомобиля при указанном режиме движения

будет равным: $R = L / \text{tg} \alpha \approx 1000$ м, а величина поперечного ускорения – $a_y = \frac{v^2}{R}$ около

0,5 м/с 2 . Эти данные полностью соответствуют экспериментальным данным, полученным сотрудниками НГТУ им. Р.Е. Алексеева при испытаниях техники производства ОАО «ГАЗ» в период с 2010 по 2019 гг. в рамках выполнения работ по проекту «Создание высокотехнологичного производства модельного ряда автомобилей ГАЗель Next с новой электронной архитектурой электронных систем» по Соглашению № 075-11-2019-027 от 29.11.2019 (постановление Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218). (рис. 2). Испытания проводились на автомобильных дорогах общего пользования, как в городских, так и в загородных условиях (Нижний Новгород – Арзамас, Нижний Новгород – Павлово; Нижний Новгород – Красные Баки; Нижний Новгород – Лысково). Получаемые данные фиксировались с использованием датчиков системы RACELOGIC.

В связи со значительными колебаниями показателей датчиков (рис 2, 3 и 5) поперечное ускорение усреднялось в пределах 1 с записи (более жирная линия на графиках). При исследовании движения транспортных средств на автомагистралях величины боковых ускорений доходили до значений 0,08g, что связано с более высокими скоростями движения.

Геометрические параметры автомобильных дорог регламентируют величину поперечных ускорений автомобиля при движении со скоростью и радиусу кривизны траектории, установленными в качестве предельно допустимых. Согласно п. 3.5 ГОСТ 33475-2015 [9], исходя из зависимости, что центростремительное ускорение равняется величине:

$$a_y = \frac{v^2}{R}$$

, при движении по дорогам расчетные величины боковых ускорений не должны превышать величину 2,5 м/с 2 (рис. 3).

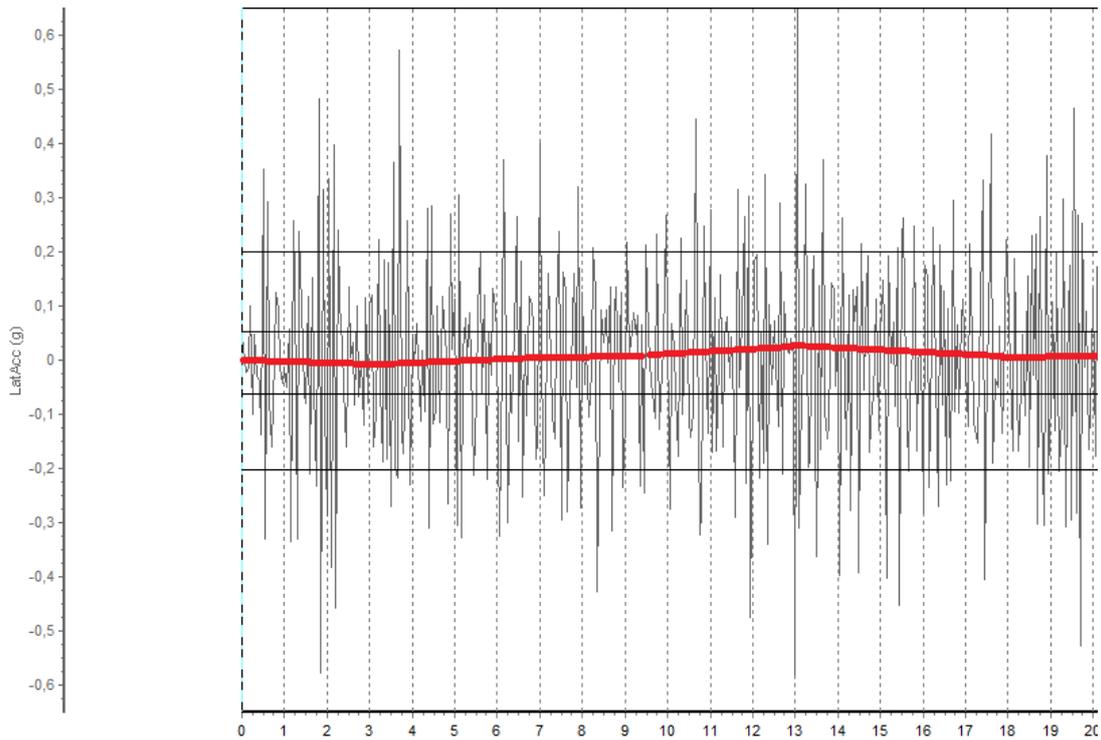


Рис. 2. Пример записи изменения поперечных ускорений автомобиля и фрагмент данной записи при движении по прямой горизонтальной дороге, полученный с использованием комплекса измерительной аппаратуры RACELOGIC

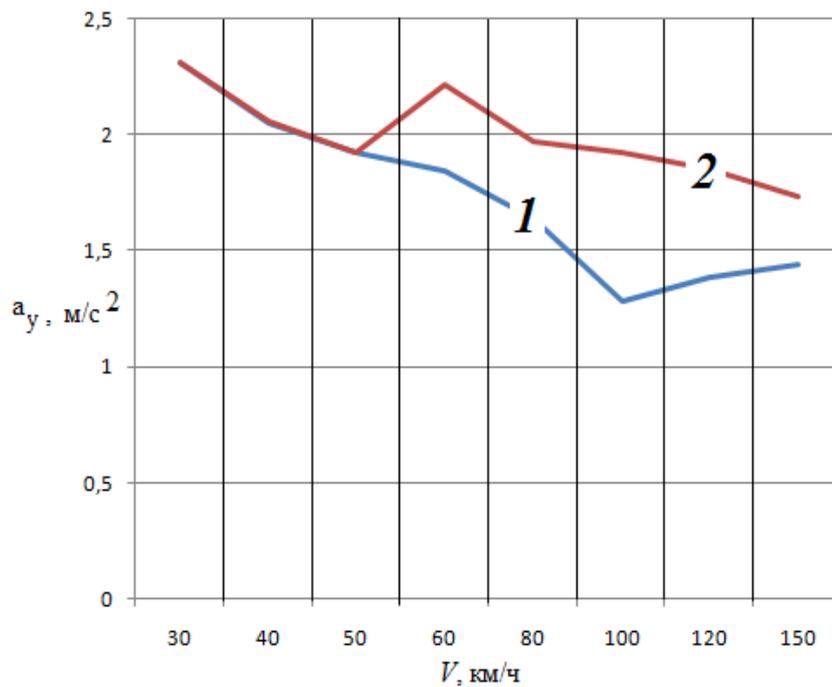


Рис. 3. Зависимость максимальных расчетных боковых ускорений, возникающих при движении по дорогам общего пользования с расчетными скоростями движения *1* – для обычных дорог, *2* – для горных дорог

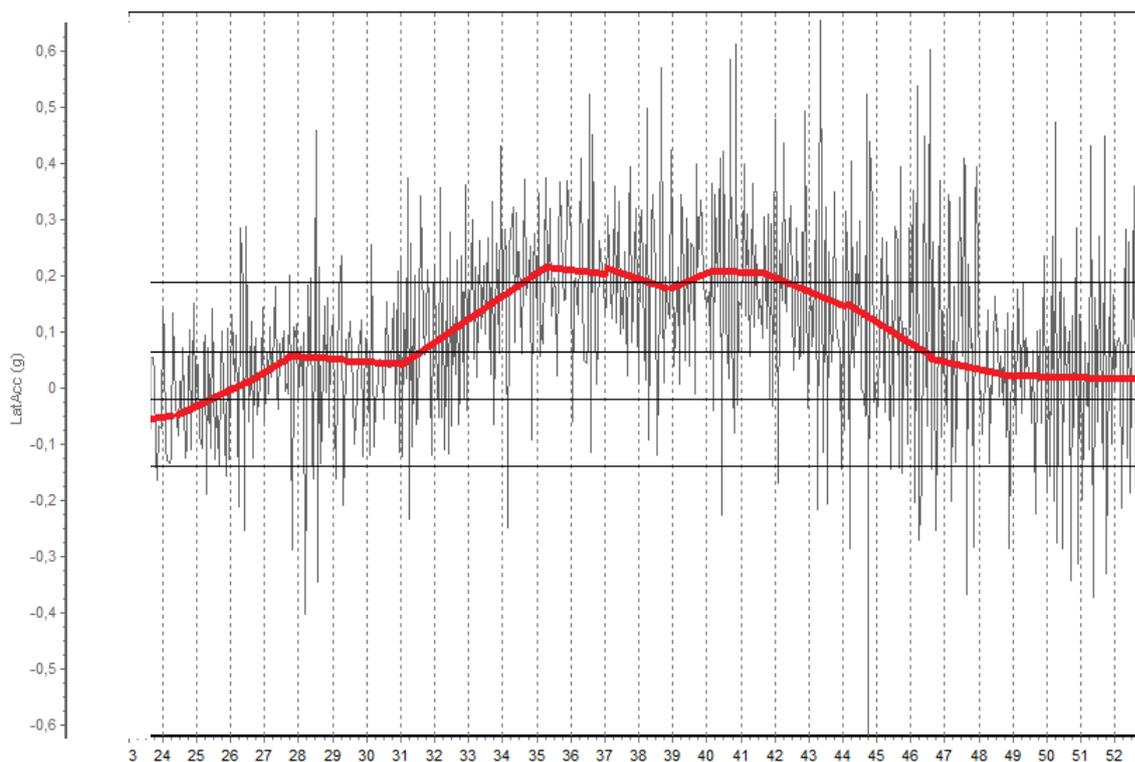


Рис. 4. Пример записи изменения поперечных ускорений автомобиля и фрагмент данной записи при движении по криволинейному участку дороги, полученный с использованием комплекса измерительной аппаратуры RACELOGIC

Согласно табл. 1. ОДМ 218.4.005-2010 «Рекомендации по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах» [11], к местам концентрации ДТП относят участки дорог, на которых интенсивность ДТП превышает значения 4 ДТП в год. Поскольку данные значения привязаны к интенсивности движения автомобилей и протяженностью участка, можно установить, какой пробег между ДТП нормативные документы считают минимально допустимым. Табл. 1 представляет собой исходную таблицу 5.3.1 из ОДМ 218.4.005-2010 «Рекомендации по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах» [11]. Умножая интенсивность движения на длину участка и деля на минимальное количество ДТП, получим модернизируемую таблицу, в которой в качестве показателя аварийности будет применяться пробег транспортных средств между ДТП.

Считая, что в одном ДТП в среднем участвуют 2, 3 автомобиля [11], получим минимально допустимый пробег автомобиля между авариями (табл. 2).

Таблица 1 [4]

Исходная таблица для определения предельно-допустимой аварийности автомобилей

Интенсивность движения, авт/сут	Минимальное количество ДТП за три года на участках их концентрации при длине участка, м				
	до 200	200-400	400-600	600-800	800-1200
3000-7000	3	3	3	4	4
7000-11000	3	3	4	4	5
11000-13000	3	3	4	4	5
13000-15000	3	4	4	5	6
15000-17000	3	4	5	5	6
17000-20000	4	4	5	6	7
более 20000	4	4	6	6	8

Таблица 2

**Модернизированная таблица для определения
минимально допустимого пробега автомобиля между авариями**

Интенсивность движения, авт/сут	Минимальное пробег автомобиля между двумя ДТП, км				
	до 200м	200-400	400-600	600-800	800-1200
3000-7000	95217	190434	285652	285652	428478
7000-11000	1110870	1110870	833152	833152	666521
11000-13000	1745652	1745652	1309239	1309239	1047391
13000-15000	2063043	1547283	1547283	1237826	1031522
15000-17000	2380435	1785326	1428261	1428261	1190217
17000-20000	2023370	2023370	1618696	1348913	1156211
более 20000	2380435	2380435	1586957	1586957	1190217

Полученные данные свидетельствуют, что с увеличением длины исследуемого участка полученные результаты асимптотически стремятся к показателям пробега одного автомобиля между ДТП, равной 500 000 км пробега. Согласно табл. 2, ОДМ 218.4.005-2010 «Рекомендации по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах» [11] при интенсивности движения меньшей 3000 авт/сутки к местам концентрации ДТП относят участки дорог, на которых интенсивность ДТП находится в пределах от 900 000 до 1 млн км пробега или 400 000 км на 1 автомобиль. Согласно табл. 5 ОДМ 218.4.005-2010 «Рекомендации по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах» [11] к особо опасным участкам дороги относят участки дорог, на которых частота ДТП превышает значения показатели 1 ДТП на 250-500 000 км пробега или 100 000 км пробега на один автомобиль. Исходя из указанного принципа, можно предположить, что автомобили, частота попадания в ДТП которых превышает 1 ДТП на 500 000 км пробега, следует считать опасными для движения. Если же частота попадания их в ДТП превышает 1 ДТП на 100 тысяч км пробега, то особо опасными.

Следует отметить, что в рассматриваемых случаях рассматриваются ДТП с пострадавшими, которых за 2019 г. в Российской Федерации произошло около 160 000 ДТП [12]. Вместе с тем, согласно данным РСА [13], общее количество ДТП составило 2,1 млн, т.е., на одно ДТП с пострадавшими приходится в среднем 13 ДТП только с материальным ущербом. Автомобили, частота попадания в ДТП без пострадавших которых превышает 1 ДТП на 50 000 км пробега, следует считать опасными для движения; если же частота попадания их в ДТП превышает 1 ДТП на 10 000 км пробега, то – особо опасными.

Результаты исследования

Рассматривая движение автомобиля по автомобильной дороге в условиях экстренного торможения при движении по криволинейной траектории, можно сделать вывод о том, что, кроме сил и моментов, стремящихся отправить автомобиль в занос, будут действовать и стабилизирующие усилия, стремящиеся сохранить заданную траекторию движения. Степень отличия отклонения реальных параметров движения автомобиля от параметров, задаваемых водителем, характеризует устойчивость транспортного средства на траектории, а отклонение данных параметров до значений, которые уже не могут обеспечить безопасность движения, следует классифицировать как занос. При этом причиной возникновения заноса могут быть любые неуравновешенные воздействия на автомобиль: торможение в условиях микста, когда сцепление левых и правых колес автомобиля отличаются друг от друга, резкий поворот рулевого колеса. В условиях низкого коэффициента сцепления колеса с дорогой причиной возникновения заноса могут являться и боковые порывы ветра, и наклон проезжей части дороги [10, 11]. Для того, чтобы стандартизировать все виды внеш-

них воздействий на автомобиль, приводящих к его заносу, было принято решение выделить один параметр, который достоверно и полностью описывал бы характер поведения автомобиля во время действия на него боковых сил. Исследование существующих подходов к решению поставленной задачи показало, что для оценки степени устойчивости движения автомобиля применяют различные критерии. Разнообразие критериев оценки устойчивости движения автомобиля на дороге связано с огромным количеством условий и комбинаций управляющего воздействия на автомобиль во время движения по опорной поверхности, отличающейся как физическими, так и геометрическими параметрами.

В работе [8] для количественной оценки степени сопротивляемости автомобиля к возникновению заноса рекомендуется применять соотношение между коэффициентами боковой устойчивости и тормозной силы, или соотношение между величиной продольной скорости и радиусом поворота автомобиля. Упрощая данные показатели, можно утверждать, что в наибольшей степени требованием к единому классификационному параметру, описывающему параметры возникновения заноса, является величина бокового ускорения, действующего на автомобиль. Данный параметр обладает физическим смыслом и может быть измерен, а его величина напрямую связана с устойчивостью движения автомобиля при экстренном торможении.

Статистический анализ экспериментальных данных показал, что вероятность воздействия той или иной боковой силы на движущийся автомобиль подчиняется зависимости вида (1):

$$f(a_y) = \frac{0,5}{0,71\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{a_y^2}{1,031}} \quad (1)$$

где 0,71 – среднее отклонение поперечного ускорения, 1,031 – удвоенное среднеквадратичное отклонение поперечного ускорения, а 0,5 – шаг измерения бокового ускорения.

Результаты расчета по полученной зависимости приведены на рис. 5.

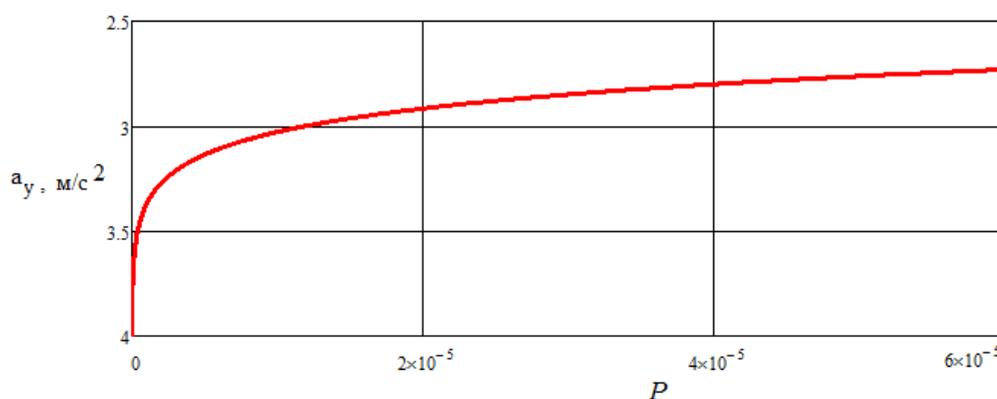


Рис. 5. Зависимость вероятности возникновения заноса при экстренном торможении от устойчивости автомобиля, выраженной предельной величиной бокового ускорения, при которой не происходит изменение параметров движения

Тогда, задавая допустимый уровень вероятности заноса автомобиля при экстренном торможении величиной P, получим, какие боковые ускорения должен выдерживать автомобиль (2):

$$P = 2 \int_{a_{доп}}^{\infty} f(a_y) = \frac{1}{0,71\sqrt{2\pi}} \int_{a_{доп}}^{\infty} e^{-\frac{a_y^2}{1,031}} da_y \quad (2)$$

Проанализировав вероятность торможений на дорогах получим, что она подчиняется экспоненциальному распределению вида (3):

$$f(\zeta) = be^{-b(\zeta)}, \quad (3)$$

где ζ – частота торможений (километров на одно торможение), а b – параметр масштаба, равный 0,4 удовлетворяет всем перечисленным критериям. Полученная зависимость показана на рис. 7.

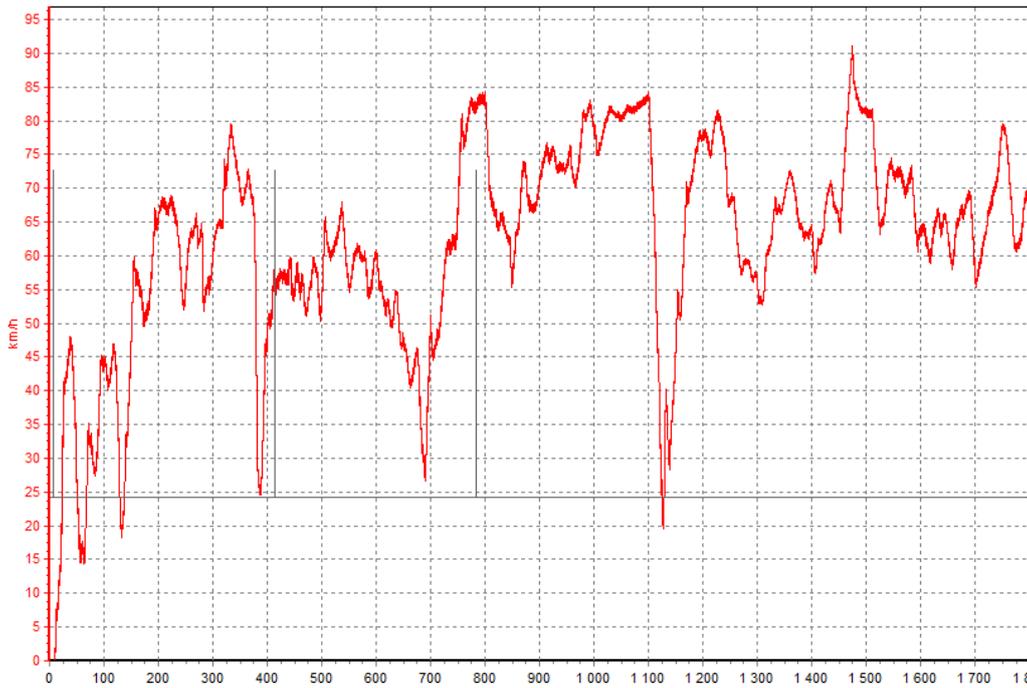


Рис. 6. Пример записи изменения скорости движения автомобиля на трассе

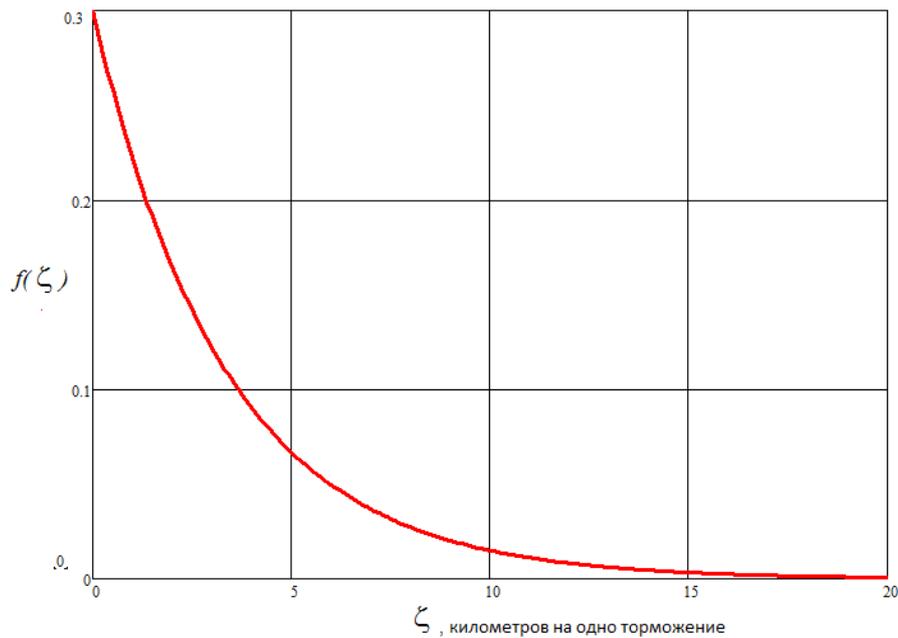


Рис. 7. Плотность распределения вероятности частоты торможений автомобилей

Полученные данные свидетельствуют о том, что на 10 000 км пробега автомобиль в среднем производит 250 неслужебных торможений, а на 50 000 – 1250. Автомобиль не будет считаться опасным, если частота возникновения заноса при экстренном торможении не будет превышать 1 занос на 1250 торможений. Подставляя данное значение вероятности в уравнение 2, получим, что при экстренном торможении автомобиль должен быть устойчив к боковому ускорению, равному $2,2 \text{ м/с}^2$. Если автомобиль неустойчив к ускорению, равному $1,9 \text{ м/с}^2$, он будет считаться особо опасным для эксплуатации. Приведенные данные справедливы при движении автомобилей по сухой асфальтовой дороге. В условиях движения по поверхности с недостаточным коэффициентом сцепления колеса с дорогой водители снижают скорость движения, тем самым снижая величину бокового ускорения. При этом изменяется и эффективность, и частота торможений. Поэтому транспортное средство, отвечающее критериям безопасности при движении по сухой асфальтовой дороге не обязательно будет считаться безопасным при движении по заснеженной дороге [10, 11]. Вопрос безопасности транспортных средств, двигающихся по поверхностям с низким коэффициентом сцепления, будет рассмотрен в дальнейших исследованиях.

Выводы

Полученные данные позволили разработать требования к автомобилю для обеспечения его безопасной эксплуатации на основе допустимой вероятности возникновения заноса при экстренном торможении в условиях движения по сухой асфальтовой дороге. Предложен единый критерий устойчивости автомобиля, а именно – предельное значение бокового ускорения, действующего на автомобиль, при котором транспортное средство не выходит за габариты трехметрового коридора при экстренном торможении на сухой асфальтовой дороге. Установлено, что автомобиль должен быть устойчив к боковому ускорению, равному $2,2 \text{ м/с}^2$. Если автомобиль не устойчив к ускорению, равному $1,9 \text{ м/с}^2$, он будет считаться опасным для эксплуатации.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках проекта «Создание высокотехнологичного производства модельного ряда автомобилей ГАЗель Next с новой электронной архитектурой электронных систем» по Соглашению № 075-11-2019-027 от 29.11.2019 (постановление Правительства Российской Федерации от 09 апреля 2010 года №218). Экспериментальные исследования выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования НГТУ «Транспортные системы».

Библиографический список

1. ОДМ 218.4.005-2010 Рекомендации по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах.
2. ОДМ 218.6.003-2011 Методические рекомендации по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах.
3. **Молев, Ю.И.** Обеспечение дорожной безопасности автомобильного транспорта в зимний период. Дисс. на соискание уч. степени доктора техн. наук. – Владимир: 2007. – 389с.
4. **Смирнов, И.А.** Математическое моделирование заноса автомобиля. Дисс. на соискание уч. степени кандидата физ.-мат. наук. – Москва: 2011. – 169с.
5. **Шапкин, В.А.** Улично-дорожная сеть Нижнего Новгорода как среда работы автомобильного транспорта / В.А. Шапкин, У.Ш. Вахидов, И.А. Ерасов, Ю.И. Молев. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2014. – 163 с.
6. Полотно пути транспортно-технологических машин / под общей редакцией В.В. Белякова, А.А. Куркина. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2014. – 447 с.
7. **Абгарян, К.А.** Введение в теорию устойчивости движения на конечном интервале времени. – М.: Наука, 1992. – 160 с.

8. ГОСТ 31507-2012 Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытаний.
9. ГОСТ 33475-2015 Дороги автомобильные общего пользования. Геометрические элементы. Технические требования.
10. Прошин, Д.Н. Методика определения степени влияния дорожных условий и конструкционных особенностей автомобилей на безопасность дорожного движения / Д.Н. Прошин, И.А. Ерасов, Н.А. Колесниченко, Ю.И. Молев, В.А. Шапкин // Мир транспорта и технологических машин. – 2015. – № 4 (51). – С. 82-88.
11. Вахидов, У.Ш. Подвижность колесных машин на заснеженном склоне / У.Ш. Вахидов // Современные проблемы науки и образования – 2012. – № 4. – С. 111.
12. Аварии на трассе. Выпуск от 10 января 2019. – Режим доступа: https://www.youtube.com/watch?v=nyFwTRwgk1M_
13. Показатели состояния безопасности. – Режим доступа: <http://stat.gibdd.ru/>.
14. Сайт Российского союза автостраховщиков. – Режим доступа: https://autoins.ru/novosti/tekushchie/?ELEMENT_ID=146261.

*Дата поступления
в редакцию: 27.01.2020*

A.S. Vashurin, Yu.I. Molev, D.N. Proshin, Yu.P. Trusov

DEVELOPMENT OF REQUIREMENTS FOR STABILITY OF VEHICLES UNDER EMERGENCY BRAKING

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

Purpose: The stage of interaction of the working body of a fire-fighting soil-throwing-strip-laying machine with soil is considered. It is noted that when developing forest fire engines, it is necessary to take into account the natural qualities of the soil, the geometric design features, as well as the operating modes of the unit.

Design / methodology / approach: The technique of simulation of the working environment in interaction with the working bodies of the unit is presented. The working bodies of the combined fire-fighting soil-throwing strip-spreading machine interact with the medium in several stages: first, the cutting edge of the spherical discs develops solid soil, separated soil layers are formed into the formed soil shaft, milling cutters, which also function in several stages, form a directed flow: separate the soil from a pre-formed loosened shaft, mechanically milling the soil layer with a cutting edge, and then giving a mechanical impulse already rotary blade. The process of separating the soil layer at the entrance to the work of active working bodies is carried out by the cutting edges of the working bodies.

Research implications: It is indicated that when simulating the physical and mathematical process of the operation of a forest fire fighting machine, it is of great importance to take into account in the model the physical and mechanical properties of soil, which are characterized by particle size distribution, density, porosity, moisture, cohesion, loosening, angle of repose, ductility, compressibility, strength, shear resistance, friction coefficients of the soil on steel and soil on the soil, abrasion, stickiness.

Keywords: wildfire, discrete element method, simulation, soil, milling thrower, spherical disks, interaction of planes, numerical integration.

УДК 630*432.1

М.В. Драпалюк¹, М.А. Гнусов¹, Д.Ю. Дручинин¹, В.Е. Клубничкин²**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ
ПОЧВОГРУНТА С РАБОЧИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ ЛЕСОПОЖАРНОГО
ГРУНТОМЕТА-ПОЛОСОПРОКЛАДЫВАТЕЛЯ**Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова¹
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)²

Рассмотрен этап взаимодействия рабочего органа лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя с грунтом. При разработке лесопожарных машин необходимо учитывать природные качества почвогрунта, геометрические особенности конструкции, а также режимы эксплуатации агрегата. Представлена методика имитационного моделирования рабочей среды при взаимодействии с рабочими органами агрегата. Рабочие органы комбинированного лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя взаимодействуют со средой в несколько этапов: вначале режущая кромка сферических дисков разрабатывает цельный грунт, отделенные почвенные пласты формируются в образующийся вал грунта, фрезы-метатели, функционирующие также в несколько этапов, производят формирование направленного потока: отделяют почвогрунт от заранее сформированного разрыхленного вала, механическим способом фрезеруя слой почвы режущей кромкой, а затем придавая механический импульс уже роторной лопаткой. Процесс отделения пласта почвогрунта в ходе выполнения работ активными рабочими органами выполняется режущими кромками рабочих органов. Обозначено, что при имитации физико-математического процесса работы грунтометательной лесопожарной машины большое значение играет учет в модели физико-механических свойств почвогрунтов, которые характеризуются гранулометрическим составом, плотностью, пористостью, влажностью, связностью, разрыхляемостью, углом естественного откоса, пластичностью, сжимаемостью, прочностью, сопротивлением сдвигу, коэффициентами трения почвогрунта о сталь и почвогрунту по почвогрунту, абразивностью, липкостью.

Ключевые слова: лесной пожар, метод дискретных элементов, имитационное моделирование, почвогрунт, фреза-метатель, сферические диски, взаимодействие плоскостей, численное интегрирование.

Введение

В последнее время во всем мире резко возросла вероятность возникновения и распространения лесных пожаров. За последние десятилетия ими уничтожены миллионы гектаров лесных массивов по всему миру. Леса являются важнейшим источником чистого воздуха на планете, их уничтожение негативно сказывается на здоровье и жизнедеятельности десятков миллионов людей и, кроме того, наносит значительный ущерб экономике многих стран. Пожар уничтожает надпочвенный покров, необходимый для защиты лесной почвы [1]. При уничтожении растительности почва становится незащищенной от высыхания и проникновения вредных микроорганизмов, что приводит к нарушению обмена питательными веществами в лесной экосистеме. В свою очередь, обильное количество выпавших осадков может вызвать наводнения и почвенную эрозию. Зола от пожара проникает в более глубокие слои почвы, создавая щелочную среду, непригодную для роста и развития растений.

В рамках решения актуальной проблемы предупреждения и ликвидации лесных пожаров в Воронежском государственном лесотехническом университете были проведены теоретические и практические научные изыскания по данному направлению [2]. Разработан экспериментальный образец лесопожарного комбинированного грунтомета-полосопрокладывателя [3]. Проведенные полевые испытания работоспособности машины включали в себя выбор движителя для разработанной конструкции. Лесопожарный комбинированный грунтомет-полосопрокладыватель навешивали на заднюю навеску трактора Т-150К и создавали минерализованную полосу с выбросом почвогрунта в двух направлениях. В целом, было от-

мечено, что конструкция образца позволяет работать с различными тракторами тягового класса 3, имеющими вал отбора мощности для передачи крутящего момента через редуктор для двух фрезерных головок-метателей (рис. 1).



**Рис. 1. Полевые испытания разработанного коллективом ученых ВГЛТУ
грунтомета-полосопрокладывателя, агрегируемого с трактором Т-150К**

С развитием технологий, позволяющих проводить разностороннее изучение различных явлений и процессов, появляется возможность имитировать взаимодействие рабочих органов разрабатываемого лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя с обрабатываемой средой еще до непосредственного создания лабораторной и экспериментальной установки. Появляется возможность изучения влияния структуры почвогрунтовых материалов на их механическое поведение при взаимодействии с рабочими органами [4-7]. Это особенно важно при реализации сложных задач, которые решаются при математическом описании работы проектируемого агрегата и, непосредственно, процесса придания механического импульса частицам почвогрунта для направленного движения на заданное расстояние при минимальных энергозатратах и оптимальных конструкторских решениях. Для описания этого процесса необходимы адекватные модели взаимодействия рабочих плоскостей рабочих органов с частицами почвогрунта и взаимодействия частиц друг с другом в процессе движения. Для решения этой задачи более предпочтительным методом является дискретный подход [4-6]. Использование данного метода позволяет получить полную визуализацию результатов исследований.

Описание взаимодействия элементов почвогрунта с рабочими поверхностями лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя

С целью теоретического исследования машины для тушения лесных пожаров разработана ее имитационная модель, позволяющая проводить компьютерные эксперименты. В ходе цикла экспериментов, реализуемых на ЭВМ, изменялся один из параметров разрабатываемого агрегата, тем самым устанавливался характер его влияния на выходные характеристики агрегата, что позволило подойти к выбору рекомендаций по определению оптимальных значений работоспособности конструкции.

Особенность рабочего процесса грунтометательной машины заключается в том, что рабочие органы не сразу выходят на требуемую глубину [7-9]. В модели этот факт учитывается требуемой величиной заглупления рабочих органов и вертикальной пондерацией в первые секунды движения агрегата. С учетом этого компьютерный эксперимент начинается после прихода грунтомета в равновесное положение.

В разрабатываемой модели для упрощения описания вводятся следующие допущения: форма почвогрунта шарообразная, плотность вокруг одного приближения почвогрунта постоянна, классическая механика лежит в основе движения элементов почвогрунта, вязкоупругий характер описывает механическое взаимодействие, рабочие органы разбиваются на треугольные поверхности для простоты расчетов [10-12].

При проведении компьютерных экспериментов рабочие органы агрегата при взаимодействии с моделируемым почвогрунтом совершают одновременно сложное поступательно-вращательное движение.

В процессе фокусирования потока почвогрунта треугольная поверхность рабочих органов взаимодействует со сферическими частицами с помощью упругих сил отталкивания или притяжения в случае связного почвогрунта, а также силы сухого и вязкого трения [13, 14]. На рис. 2 представлены возможные варианты взаимодействия сферических элементов почвогрунта *I* – с плоскостью; *II* – с ребром; *III* – с вершиной.

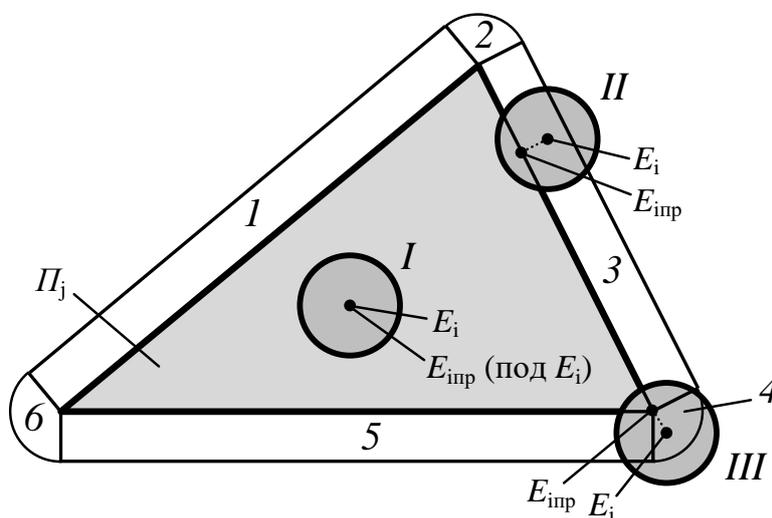


Рис. 2. Возможные варианты взаимодействия элемента почвогрунта с элементарной треугольной поверхностью рабочих поверхностей лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя

Когда частица почвогрунта оказывается в области *1*, *3* или *5*, шарообразный элемент контактирует с ребром треугольной плоскости. Если осуществляется взаимодействие с областями *2*, *4*, *6*, то контакт происходит с вершиной треугольной плоскости. Для вычисления описанных сил взаимодействия требуется математический аппарат, дающий возможность вычислить возникающие контактные взаимодействия при проведении испытаний [15]. Если взаимодействие осуществляется, то необходимо определить, с какой именно частью поч-

вогрунт контактирует: центральной *I*, ребром *II* или углом *III*. Следующим этапом является нахождение расстояния $r_{i-П_j}$ от частицы почвогрунта до контактной поверхности с целью расчета значения упругой силы отталкивания и определения направления действия силы, которое определяется отрезком $E_i-E_{iпр}$, где E_i и $E_{iпр}$ – центр сферы почвогрунта и его проекция на плоскость треугольника.

Приведен сложный алгоритм исследования взаимодействия частицы почвогрунта с внутренней поверхностью треугольника $П_j$, представленный на рис. 1 *I* вариантом. Для проверки корректности необходимо провести проверку этапов: определить проекцию центра почвогрунта (x_i, y_i, z_i) и попадание точки в плоскость или за ее пределы. Через точки вершины T_{j1}, T_{j2}, T_{j3} составляется уравнение:

$$\begin{vmatrix} x - x_{j1} & y - y_{j1} & z - z_{j1} \\ x_{j2} - x_{j1} & y_{j2} - y_{j1} & z_{j2} - z_{j1} \\ x_{j3} - x_{j1} & y_{j3} - y_{j1} & z_{j3} - z_{j1} \end{vmatrix} = 0, \quad (1)$$

где x, y, z – координаты случайной точки, которая принадлежит описанной области; x_{j1}, y_{j1}, z_{j1} – координаты, принадлежащие вершине T_{j1} ; x_{j2}, y_{j2}, z_{j2} – координаты, принадлежащие вершине T_{j2} ; x_{j3}, y_{j3}, z_{j3} – координаты, принадлежащие вершине T_{j3} .

После нахождения детерминанта получаем следующее уравнение (2):

$$Ax + By + Cz + D = 0, \quad (2)$$

где A, B, C, D – являются параметрами уравнения плоскости.

После этого уравнение плоскости целесообразно привести к плоскости путем деления параметров на длину нормального вектора $\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}$ (3):

$$\frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}x + \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}y + \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}z + \frac{D}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} = 0. \quad (3)$$

Индексом «*n*» обозначим нормированные параметры уравнения плоскости. Тогда уравнение плоскости принимает вид (4):

$$A_n x + B_n y + C_n z + D_n = 0. \quad (4)$$

В этом случае расстояние $r_{i-П_j}$ от центра элемента (x_i, y_i, z_i) почвогрунта до плоскости рассчитывается по следующей формуле, известной из аналитической геометрии:

$$r_{i-П_j} = |A_n x_i + B_n y_i + C_n z_i + D_n|. \quad (5)$$

Поскольку на данном этапе расчетов не все частицы почвогрунта осуществляют взаимодействие с описанной элементарной поверхностью, необходимо учесть этот факт в имитации процесса за счет исключения этих элементов с помощью условия $r_{i-П_j} > d_i/2$, что даст возможность оптимизировать процесс вычисления и значительно его ускорить [16, 17]. Для проверки *I* варианта, то есть определения взаимодействия элементов почвогрунта с внутренней поверхностью треугольной формы, нужно найти проекцию центра частицы почвогрунта на треугольную поверхность. По известным координатам нормального вектора A_n, B_n, C_n и расстоянию от точки до плоскости $r_{i-П_j}$, можно найти проекцию $E_{iпр}(x_{iпр}, y_{iпр}, z_{iпр})$ путем смещения вдоль нормального вектора (6):

$$\begin{aligned} x_{inp} &= x_i - A_n \cdot r_{i-Пj}; \\ y_{inp} &= y_i - B_n \cdot r_{i-Пj}; \\ z_{inp} &= z_i - C_n \cdot r_{i-Пj}. \end{aligned} \quad (6)$$

Для определения контакта центра элемента почвогрунта E_{inp} с заданным элементарным треугольником T_j применяется метод площадей. Сумма площадей 3-х треугольников, полученных построением на вершинах исходного треугольника и точке E_{inp} , лежащей внутри треугольника, должна равняться площади всего треугольника T_j . Математически это записывается следующим образом (7):

$$S(\Delta T_{j1} T_{j2} T_{j3}) = S(\Delta E_{inp} T_{j2} T_{j3}) + S(\Delta T_{j1} E_{inp} T_{j3}) + S(\Delta T_{j1} T_{j2} E_{inp}). \quad (7)$$

В рамках данного условия, если площади составляющих треугольников $\Delta E_{inp} T_{j2} T_{j3}$, $\Delta T_{j1} E_{inp} T_{j3}$ и $\Delta T_{j1} T_{j2} E_{inp}$ в сумме будут больше площади $S(\Delta T_{j1} T_{j2} T_{j3})$ анализируемого треугольника, можно сделать вывод, что точка E_{inp} не лежит внутри треугольника T_j . Тогда принимается решение, что элемент почвогрунта не контактирует с данной элементарной поверхностью по площади, и затем производится проверка контакта с элементарной поверхностью по ребрам и вершинам элементарного треугольника.

Если определена контактная взаимосвязь элементов почвогрунта с представленной элементарной поверхностью, то происходит расчет сил упругости, сухого и вязкого трения, возникающих между элементом почвогрунта и взаимодействующими рабочими плоскостями лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя [18].

Особенности решения системы дифференциальных уравнений

В ходе имитации движения шарообразных частиц почвогрунта описывается однотипными дифференциальными выражениями производится следующим образом (8-9):

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = k_1 \frac{dx}{dt} + k_2 x + k_3 \quad (8)$$

или

$$ma = k_1 v + k_2 x + k_3, \quad (9)$$

где m – масса элемента почвогрунта; x – функция, которую необходимо найти (временная зависимость координат x, y, z); t – модельное время; k_1, k_2, k_3 – параметры системы дифференциальных уравнений; a – ускорение элемента почвогрунта (декартовы компоненты a_x, a_y, a_z); v – скорость элемента почвогрунта (соответствующая декартова компонента v_x, v_y, v_z).

Решение дифференциальных уравнений производится с помощью модифицированного метода Эйлера-Коши [11]. Решение в данном численном методе записывается следующими выражениями итерационного характера (10-11):

$$x^{\tau+1} = x^{\tau} + v^{\tau} \cdot \Delta t + \frac{k_1 v^{\tau} + k_2 x^{\tau} + k_3}{m} \cdot \frac{(\Delta t)^2}{2}; \quad (10)$$

$$v^{\tau+1} = v^{\tau} + \frac{k_1 v^{\tau} + k_2 x^{\tau} + k_3}{m} \cdot \Delta t, \quad (11)$$

где τ и $\tau+1$ – номера, текущего и последующего шагов интегрирования по времени; Δt – значение шага интегрирования по времени.

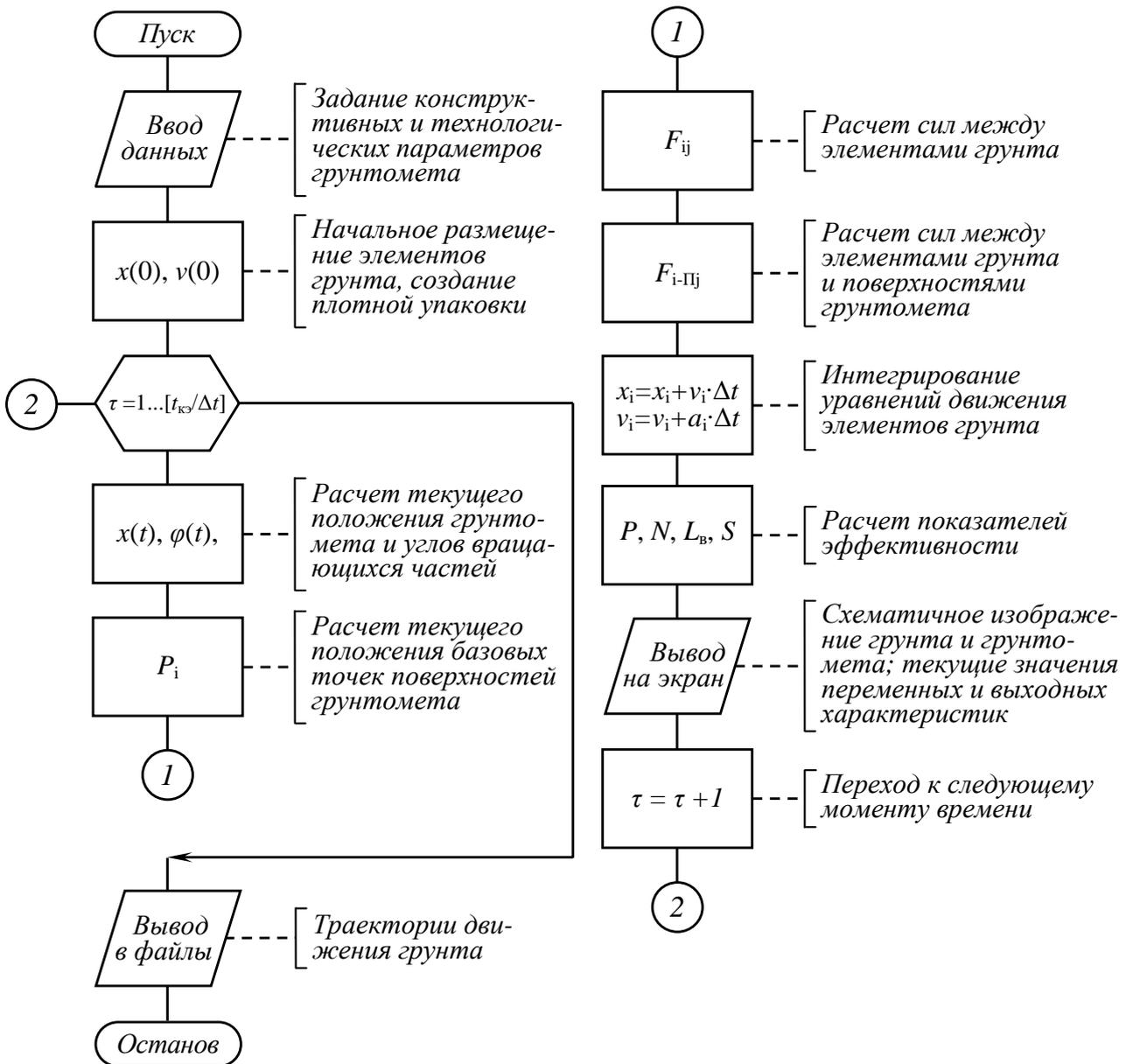


Рис. 3. Схема алгоритма моделирования машины для тушения лесных пожаров

К основной системе дифференциальных уравнений, обозначающих перемещение частиц почвогрунта, необходимо внести стартовые значения: положение в пространстве и скорость элементов в начальный момент времени [19]. Начальные условия определяются алгоритмом начального размещения элементов почвогрунта, после окончания которого все элементы образуют случайную плотность слоя, имеют нулевые декартовы компоненты скорости и оседают в нижнюю часть моделируемого пространства.

В представленной модели условие устойчивости соблюдается для системы уравнений в части нахождения средних характеристик: расстояние выброса, разлет частиц, толщина отсыпаемого почвогрунта и других. При этом следует учитывать, что взаимодействие элементов в модели происходит случайным образом. Это приводит к тому, что силы, действующие на частицы почвогрунта и рабочие поверхности агрегата, то появляются, то пропадают, поэтому устойчивость индивидуальных дифференциальных уравнений не слишком высока, но система в целом считается устойчивой, так как практически не зависит от начальных условий. Модель состоит из трех группы уравнений для разных координат x , y , z с учетом большого количества частиц почвогрунта (10^3 – 10^5).

Следует принимать во внимание, что такие тонкости математических расчетов аналогичны и для молекулярной динамики [20], эти особенности связаны с природой многих физических, химических процессов и являются естественными.

Разработанная модель по своей сути является не аналитической, а алгоритмической: так как показатели эффективности невозможно рассчитать по формулам явным образом, они рассчитываются с помощью итерационного алгоритма. Схема алгоритма представлена на рис. 3. На ней добавлены обозначения: $t_{кэ}$ – длительность компьютерного эксперимента; $[t_{кэ}/\Delta t]$ – номер последнего шага интегрирования по времени; квадратные скобки означают округление до целого числа.

Таким образом, разработана математическая модель машины для тушения лесных пожаров, учитывающая физические свойства грунта, конструктивные и технологические параметры. Модель позволяет оценить эффективность грунтомета в различных режимах работы и оптимизировать его параметры.

Основные параметры лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя при взаимодействии рабочих плоскостей с почвогрунтом и физико-механические параметры имитационного материала задаются в начале эксперимента и выводятся на экран программы.

Заключение

Проведенные исследования взаимодействия рабочих органов агрегата с почвогрунтом позволяют расширить возможности методик проектирования лесопожарной техники, используемой для тушения лесного низового пожара грунтом, путем нахождения оптимальных конструкторских решений. Возможность применения лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя в лесном комплексе увеличивается с учетом доступности тракторов тягового класса 3. В ходе работы создана математическая модель машины для тушения лесных пожаров, воспроизводящая процесс ее работы с достаточно высокой физической адекватностью, детализацией и пространственным разрешением. Разработана компьютерная программа для проведения компьютерных экспериментов по метанию почвогрунта машиной, позволяющая исследовать влияние конструктивных и технологических параметров машины, а также свойств почвогрунта на показатели эффективности рабочего процесса.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-38-60041/19, – Совершенствование методологической базы моделирования системы и процессов ликвидации лесных пожаров направленно-регулируемым потоком грунта.

*Дата поступления
в редакцию: 27.01.2020*

Библиографический список

1. **Драпалюк, М.В.** Математическая модель процесса подачи и выброса грунта рабочими органами комбинированной машины для тушения лесных пожаров / М.В. Драпалюк, И.М. Бартнев, М.А. Гнусов, Д.Ю. Дручинин и др. // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2012. – № 84. – С. 232-246.
2. **Hoover, W.G.** Atomistic Nonequilibrium Computer Simulations / W.G. Hoover // Physica A. – 1983. – Vol. 118. – P. 111-122.
3. Пат. на полезную модель 128887 РФ, МПК E02F5/006, A62C2/00. Лесопожарная комбинированная грунтометательная машина / М.В. Драпалюк, И.М. Бартнев, П.Э. Гончаров, Л.Д. Бухтояров, П.И. Попиков, М.А. Гнусов, Д.Ю. Дручинин, О.Б. Марков; заявитель и патентообладатель ВГЛТА. – № 2013100599/03; заявл. 09.01.2013; опубл. 10.06.2013.
4. **Попиков, П.И.** Методика моделирования лесной почвы при взаимодействии с рабочими

- органами лесохозяйственных машин / П.И. Попиков, Д.Ю. Дручинин, Н.А. Шерстюков // Resources and Technology. – 2017. – Т. 14. – № 3. – С. 1-12.
5. **Хокни, Р.** Численное моделирование методом частиц / Р. Хокни, Дж. Иствуд. – М.: Мир, 1987. – 638 с.
 6. **Григорьев, Ю.Н.** Численное моделирование методами частиц-в-ячейках / Ю.Н. Григорьев, В.А. Вшивков, М.П. Федорук. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. – 360 с.
 7. **Кривцов, А.М.** Метод частиц и его использование в механике деформируемого твердого тела / А.М. Кривцов, Н.В. Кривцова // Дальневосточный математический журнал ДВО РАН. – 2002. – Т. 3. – № 2. – С. 254-276.
 8. **Español, P.** Hydrodynamics from Dissipative Particle Dynamics / P. Español. // Phys. Rev. E. – 1995. – Vol. 52. – P. 1734–1742.
 9. **Jakob, C.** Particle Methods. An Overview / C. Jakob, H. Konietzky. – Freiberg, 2012. – 24 p.
 10. **Bolintineanu, D.S.** Particle Dynamics Modeling for Colloid Suspensions / D.S. Bolintineanu, G.S. Grest, J.B. Lechman, F. Pierce, S.J. Plimpton, P.R. Schunk // Comp. Part. Mech. – 2014. – Vol. 1. – P. 321-356.
 11. **Zhen, Li** A Dissipative Particle Dynamics Method for Arbitrary Complex Geometries / Li Zhen, Bian Xin, Tang Yu-Hang, G.E. Karniadakis // arXiv:1612.08761v1.
 12. **Kovalev, O.O.** On Simulation of Hydraulic Fracturing Using Particle Dynamics Method / O.O. Kovalev // Proc. of Summer School – Conference «Advanced Problems in Mechanics». – St. Petersburg, 2013. – P. 285-291.
 13. **Гончаров, П.Э.** Лесопатрульный автомобиль на базе тяжелого грузового автомобиля повышенной проходимости / П.Э. Гончаров, П.И. Попиков, М.А. Гнусов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. – Т. 2. – № 2-2 (7-2). – С. 64-69.
 14. **Драпалюк, М.В.** Обоснование параметров лесного грунтомета с комбинированными рабочими органами / М.В. Драпалюк, П.И. Попиков, П.Э. Гончаров, М.А. Гнусов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. – Т. 2. – № 2-2 (7-2). – С. 77-81.
 15. **Bartenev, I.M.** Study of efficiency of soil-thrower and fire-break major on the basis of mathematic simulation / I.M. Bartenev, S.V. Malyukov, M.A. Gnusov and D.S. Stupnikov // International Journal of Mechanical Engineering & Technology (IJMET) Scopus Indexed. – 2018. Volume:9, Issue: 4, Pages:1008-1018.
 16. **Bartenev, I.M.** Research and development of the method of soil formation and delivery in the form of a concentrated flow to the edge of moving ground forest fire / I.M. Bartenev, P.I. Popikov, S.V. Malyukov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science International Jubilee Scientific and Practical Conference «Innovative Directions of Development of the Forestry Complex (FORESTRY-2018)». – 2019. – no. 226 (1) 012052. DOI: 10.1088/1755-1315/226/1/012052.
 17. **Afzaal, H.** Robot-based Forest Fire Detection and Extinguishing Model / Hamra Afzaal; Nazir Ahmad Zafar / 2nd International Conference on Robotics and Artificial Intelligence (ICRAI). Natl. Univ. Sci. & Technol. Coll. E. & M.E. Pakistan, Islamabad, PAKISTAN, nov. 01-02, 2016. – Islamabad: Natl. Univ. Sci. & Technol. Coll. E. & M.E., 2016. – P. 112-117.
 18. Three-Dimensional Dynamic Simulation System for Forest Surface Fire Spreading Prediction / J. Li, X. Li, C. Chen, H. Zheng, N. Liu // International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence. – 2018. – Vol. 32. – Iss. 8. DOI:10.1142/S021800141850026X
 19. **Castillo, M.E.** Determining response times for the deployment of terrestrial resources for fighting forest fires. A case study: Mediterranean–Chile (Article) / M.E. Castillo, F. Rodriguez, Y. Silva // Pontificia Universidad Catolica de Chile, Facultad de Agronomia e Ingenieria Forestal. – 2015. – Vol. 42. – P. 97-107.
 20. **Peterson, A.L.** Dual-use fire-fighting technology for the National Guard (Article) [Текст] / A.L. Peterson, P.O. Washington // Proceedings of the 1999 55th Annual Forum of the American Helicopter Society, FORUM 55; Montreal, Que., Can – 1999 Vol. 2 P. 2292-2297.

M.V. Drapalyuk¹, M.A. Gnusov¹, D.Yu. Druchinin¹, V.E. Klubnichkin²

**MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE INTERACTION OF ELEMENTS OF SOIL
WITH WORKING SURFACES OF FORESTRY FIRE GRINDER
AND STRIPPED PLAYER**

Voronezh State Forestry University. G.F. Morozova¹
Bauman Moscow State Technical University²

Purpose: The stage of interaction of the working body of a fire-fighting soil-throwing-strip-laying machine with soil is considered. It is noted that when developing forest fire engines, it is necessary to take into account the natural qualities of the soil, the geometric design features, as well as the operating modes of the unit.

Design / methodology / approach: The technique of simulation of the working environment in interaction with the working bodies of the unit is presented. The working bodies of the combined fire-fighting soil-throwing strip-spreading machine interact with the medium in several stages: first, the cutting edge of the spherical discs develops solid soil, separated soil layers are formed into the formed soil shaft, milling cutters, which also function in several stages, form a directed flow: separate the soil from a pre-formed loosened shaft, mechanically milling the soil layer with a cutting edge, and then giving a mechanical impulse already rotary blade. The process of separating the soil layer at the entrance to the work of active working bodies is carried out by the cutting edges of the working bodies.

Research implications: It is indicated that when simulating the physical and mathematical process of the operation of a forest fire fighting machine, it is of great importance to take into account in the model the physical and mechanical properties of soil, which are characterized by particle size distribution, density, porosity, moisture, cohesion, loosening, angle of repose, ductility, compressibility, strength, shear resistance, friction coefficients of the soil on steel and soil on the soil, abrasion, stickiness.

Key words: wildfire, discrete element method, simulation, soil, milling thrower, spherical disks, interaction of planes, numerical integration.

УДК 629.365

Г.О. Котиев¹, И.Ф. Гумеров², А.А. Стадухин¹, Б.Б. Косицын¹**ВЫБОР ЕМКОСТИ БОРТОВОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭЛЕКТРОМАШИНЫ В ИЗНОСОСТОЙКОЙ ТОРМОЗНОЙ
СИСТЕМЕ ВЫСОКОПОДВИЖНЫХ КОЛЕСНЫХ МАШИН**

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана¹
(национальный исследовательский университет)
ПАО «КАМАЗ»²

Определена необходимая емкость бортового накопителя энергии, позволяющего повысить энергоэффективность транспортного средства за счет обеспечения возможности применения электромашины в износостойкой тормозной системе. Метод выбора необходимой емкости бортового накопителя основывается на определении величины энергии, которая затрачивается машиной для поддержания заданного режима движения. В рамках исследования была принята следующая стратегия управления электромашиной: энергия, запасенная в накопителе после торможения, сразу же будет затрачена при последующем разгоне. В связи с этим, повышение энергоэффективности может быть достигнуто только за счет компенсации высокочастотных колебаний затраченной / накопленной электроэнергии в предполагаемом накопителе так, чтобы уровень заряда не достигал максимального значения при движении машины в среднестатистических условиях. На основании полученных данных емкость накопителя оценивается максимальным размахом функции изменения накопленной / затраченной энергии при движении по заданной трассе.

Предложен метод, позволяющий сформировать требования к характеристикам бортового накопителя электрической энергии, применяемого в составе износостойкой системы торможения, отличающийся использованием статистических данных о дорожно-грунтовых условиях движения машин. Указанный метод дает возможность определить рациональные характеристики накопителя электрической энергии (необходимую емкость), обеспечивающего возможность энергоэффективного движения высокоподвижных колесных машин в среднестатистических условиях эксплуатации.

Ключевые слова: колесная машина, энергоэффективность, затраты энергии, электромашина, накопитель энергии, износостойкая тормозная система.

Введение

В износостойкой тормозной системе высокоподвижных колесных машин (ВКМ) могут быть применены как тормоза-замедлители (моторный тормоз двигателя внутреннего сгорания, гидродинамический и электродинамический ретардеры [1]), так и электромашина (ЭМ), работающая в генераторном режиме [2] совместно с бортовым накопителем энергии. При этом основным преимуществом использования комбинации ЭМ и накопителя в тормозной системе является возможность повышения энергоэффективности ВКМ за счет преобразования кинетической энергии движения машины в электрическую (при рекуперативном торможении) и запасания в бортовом накопителе, с целью последующего использования при разгоне [3-5].

Работа ЭМ в составе износостойкой системы замедления предполагает наличие мощного накопителя электрической энергии (позволяющего реализовать высокие уровни тока разряда / заряда). При этом накопители, позволяющие реализовать высокий уровень электрической мощности и одновременно большую емкость, обладают высокой массой и стоимостью.

В связи с этим, для снижения необходимой емкости накопителя энергии предлагается следующая стратегия управления электромашиной: энергия, запасенная в накопителе после торможения, сразу же будет затрачена при последующем разгоне (замедление электромашиной с применением тормозных резисторов не рассматривается). Таким образом, при эксплуа-

тации ВКМ бортовой накопитель электрической энергии не должен достигать уровня полного заряда при движении в среднестатистических условиях. В случае использования данного режима работы системы будет обеспечена возможность применения молекулярного накопителя энергии («суперконденсатора») для рекуперации энергии торможения ВКМ. Накопители такого типа отличаются малой удельной емкостью, но обладают возможностью реализации большой мощности разряда / заряда, что позволяет не учитывать режимы ограничения потребляемого тока при дальнейших расчетах.

Выбор емкости бортового накопителя энергии, обеспечивающего применение электромашин в износостойкой тормозной системе ВКМ

Для оценки потребной емкости бортового накопителя электрической энергии используется скоростной режим движения машины, приближенный к реальной эксплуатации [6-10]. Предлагаемый режим движения получен аналитически при использовании квазистационарной модели движения ВКМ с учетом ограничений на продольные и боковые ускорения, связанные со сцепными свойствами движителя с опорной поверхностью, возможностями силовой установки и физиологическими возможностями человека воспринимать перегрузки (рис. 1) [11]. Представленный режим движения также основывается на предположении, что уровень замедления, который необходимо обеспечить при движении машины по трассе для реализации рациональной величины средней скорости, составляет не более $a^* = 1 \text{ м/с}^2$ [12, 13].

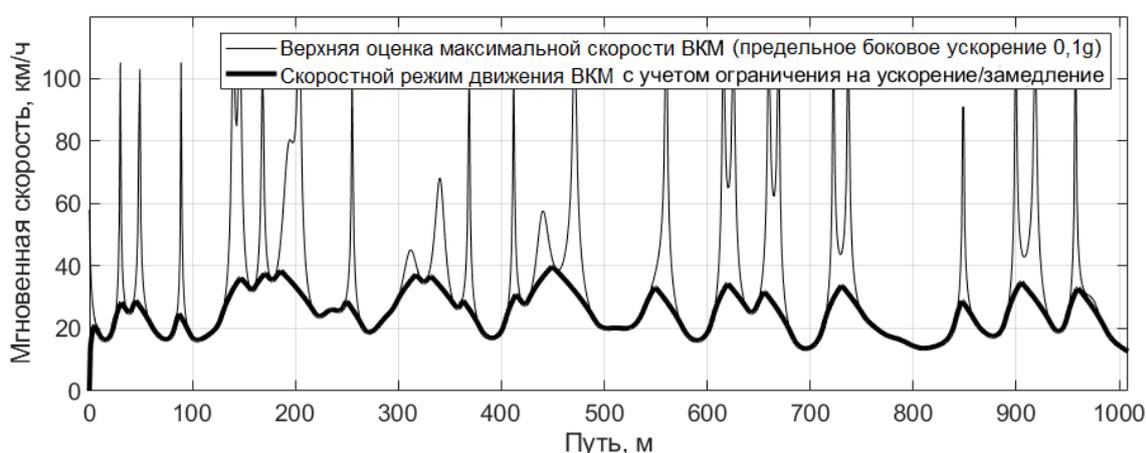


Рис. 1. Скоростной режим движения ВКМ

Таким образом, будем считать, что в случае разгона / торможения с мощностью менее $N_{\text{ЭМ}}^{\text{max}}$ ($N_{\text{ЭМ}}^{\text{max}}$ — максимальная мощность электромашин) реализация закона движения происходит только за счет тягового/генераторного режима электромашин, в противном случае недостаток мощности компенсируется двигателем внутреннего сгорания (ДВС), ретардером или рабочей тормозной системой (рис. 2) [14-16].

$$N_{\text{треб } i}^{\text{ЭМ, мех}} = \begin{cases} N_{\text{ЭМ}}^{\text{max}}, & \text{если } N_{\text{треб } i} \geq N_{\text{ЭМ}}^{\text{max}} \\ N_{\text{треб } i}, & \text{если } -N_{\text{ЭМ}}^{\text{max}} < N_{\text{треб } i} < N_{\text{ЭМ}}^{\text{max}}, \\ -N_{\text{ЭМ}}^{\text{max}}, & \text{если } N_{\text{треб } i} \leq -N_{\text{ЭМ}}^{\text{max}} \end{cases} \quad (1)$$

где $N_{\text{треб } i}^{\text{ЭМ, мех}}$ — мощность, реализуемая электромашинной на выходном валу КП для поддержания заданного режима движения.

Тогда зависимость электрической мощности электромашин $N_{\text{треб } i}^{\text{ЭМ}}$, необходимой для поддержания заданного режима движения, определяется согласно системе (2):

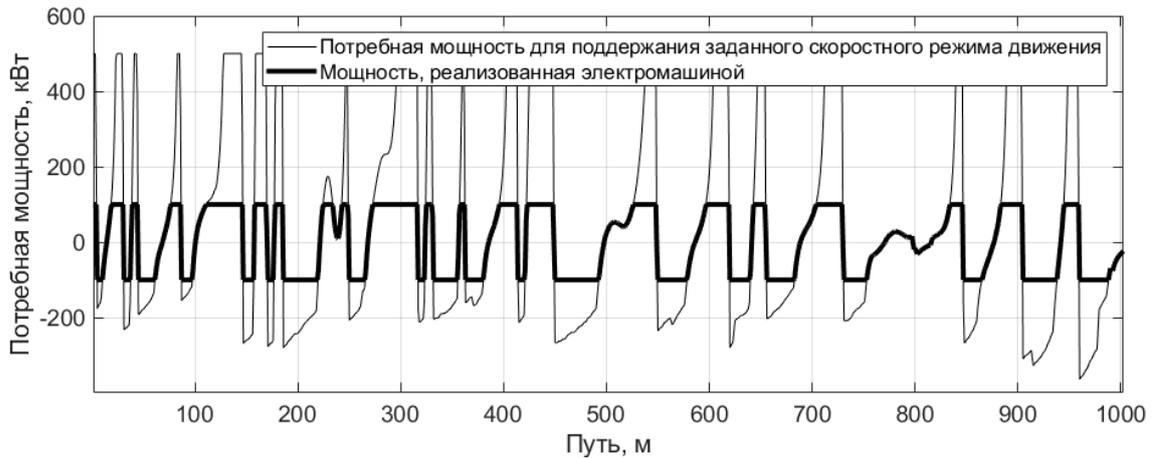


Рис. 2. Зависимость мощности на выходном валу коробки передач от пройденного пути, необходимой для поддержания заданного скоростного режима движения ВКМ

$$N_{\text{треб}_i}^{\text{эм}} = \begin{cases} N_{\text{треб}_i}^{\text{эм мех}} / \eta_{\text{эм}}, & \text{если } N_{\text{треб}_i}^{\text{эм мех}} \geq 0 \\ N_{\text{треб}_i}^{\text{эм мех}} \cdot \eta_{\text{эм}}, & \text{если } N_{\text{треб}_i}^{\text{эм мех}} < 0' \end{cases} \quad (2)$$

где $\eta_{\text{эм}}$ – коэффициент полезного действия электромашин (в рамках проектировочного расчета принят постоянным ($\eta_{\text{эм}} = 0,9$)).

На основе полученных данных определяется величина электрической энергии $E_{\text{эл}}$, затраченной при движении по трассе, от времени (3):

$$E_{\text{эл}_{i+1}} = E_{\text{эл}_i} + N_{\text{треб}_i}^{\text{эм}} \Delta t_i = E_{\text{эл}_i} + N_{\text{треб}_i}^{\text{эм}} \frac{\Delta s_i}{v_{\text{ср}_i}}, \quad t_i = t_{i-1} + \frac{\Delta s_i}{v_{\text{ср}_i}} \quad (3)$$

где Δt_i – время преодоления участка разбиения трассы между $i-1$ -й и i -ой путевой координатой; Δs_i – приращение по пути между $i-1$ -й и i -ой путевой координатой трассы; t_i – время достижения i -ой путевой координаты трассы.

Зависимость $E_{\text{эл}}$ от времени движения по трассе t представлена на рис. 3. Как видно из графика, энергобаланс системы отрицательный (величина затраченной электрической энергии с течением времени увеличивается), т.е., для представленного на рис. 2 режима использования электромашин необходим дополнительный источник энергии.

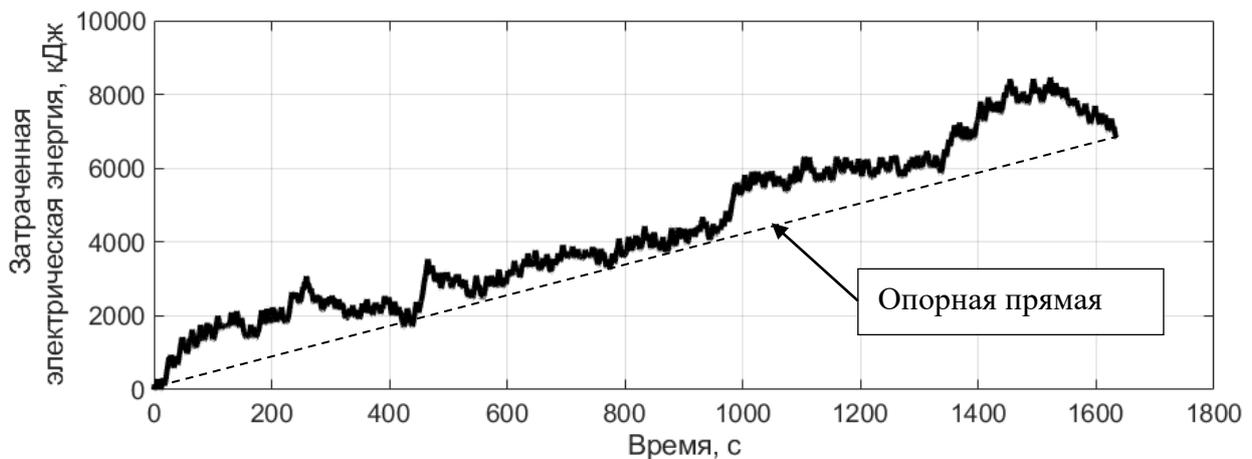


Рис. 3. Зависимость затраченной электрической энергии от времени при движении по трассе

Рассматриваемый подход к применению электромашины в износостойкой тормозной системе не предполагает наличия таких дополнительных устройств, в связи с этим повышение энергоэффективности ВКМ может быть достигнуто только за счет компенсации колебаний затраченной / накопленной электроэнергии относительно опорной прямой (рис. 3). Таким образом, для оценки потребной емкости бортового накопителя при вычислении затраченной/накопленной энергии (3) из величины $N_{\text{треб}i}^{\text{эм}}$ необходимо вычесть такую мощность, которая бы обеспечила нейтральный энергобаланс системы (рис. 4):

$$E_{\text{нак}i+1} = E_{\text{нак}i} + \left(N_{\text{треб}i}^{\text{эм}} - E_{\text{эл}n_s} / t_{n_s} \right) \frac{\Delta s_i}{v_{\text{ср}i}}, \quad (4)$$

где $E_{\text{нак}}$ – электрическая энергия, затраченная/накопленная из бортового накопителя;
 n_s – количество участков пути, на которые разбита трасса.

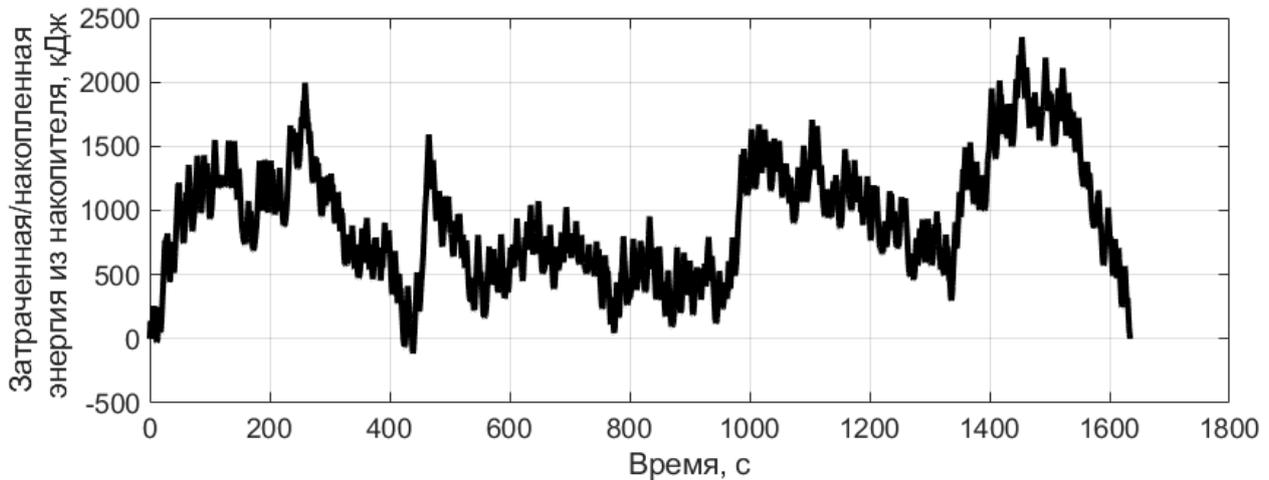


Рис. 4. Зависимость затраченной электрической энергии из накопителя

Полученная зависимость имеет явно выраженные низкочастотные колебания, обладающие большой амплитудой и, соответственно, подразумевает необходимость запасание большого количества энергии. Предложенная стратегия управления и использование молекулярного накопителя энергии не предполагают длительного хранения заряда с целью снижения его потребной емкости (предполагается скорейшее опорожнение накопителя после рекуперативного торможения). В связи с этим, для выбора емкости накопителя энергии из полученной зависимости $E_{\text{нак}}(t)$ целесообразно «исключить» низкие частоты. Исследования показали, что частотой среза эффективно выбрать величину 0,005 Гц (гармоники с периодом колебаний более 200 с будут отброшены). Фильтрация может быть проведена, например, фильтром Баттерворта 1-го порядка. Зависимость затраченной / накопленной энергии накопителя после «фильтрации» представлена на рис. 5.

Далее, согласно полученной зависимости (рис. 5), потребная емкость накопителя энергии оценивается максимальным размахом функции:

$$E_{\text{кон}}^{\text{max}} = \max(E_{\text{нак}}^{\phi}(t)) - \min(E_{\text{нак}}^{\phi}(t)), \quad (5)$$

где $E_{\text{кон}}^{\text{max}}$ – потребная емкость накопителя энергии;

$E_{\text{нак}}^{\phi}(t)$ – зависимость затраченной/накопленной энергии накопителя от времени после «фильтрации».

Таким образом, указанный метод позволяет определить потребную емкость бортового накопителя энергии, который обеспечит работу электромашины с выбранной стратегией управления так, чтобы уровень заряда не достигал максимального значения при движении ВКМ в среднестатистических условиях.

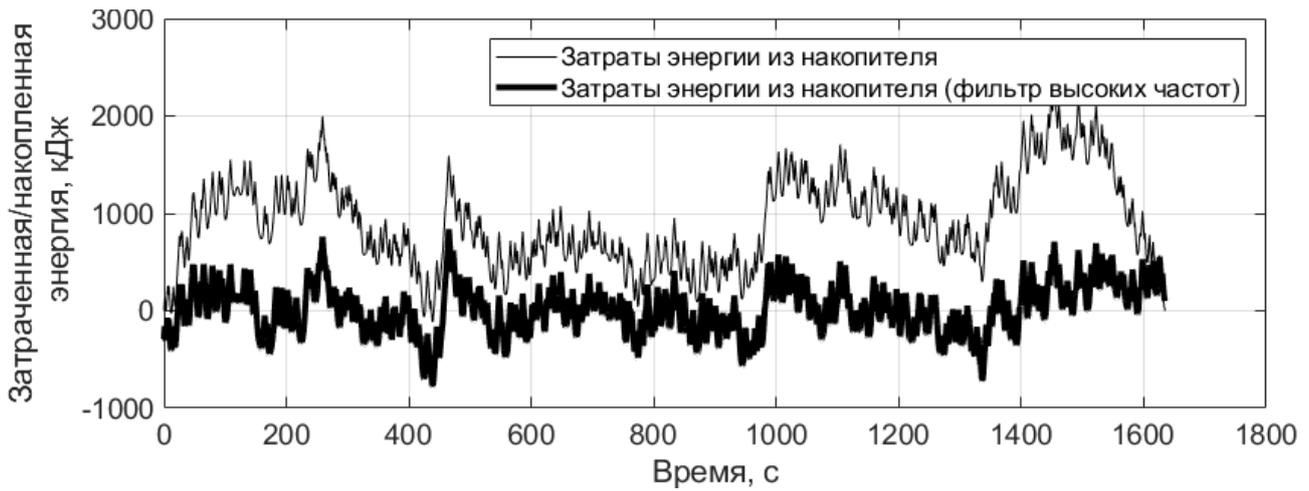


Рис. 5. Зависимость электрической энергии, затраченной из накопителя

Анализ энергоэффективности применения электромашин в износостойкой тормозной системе ВКМ

Важнейшей задачей при анализе эксплуатационных свойств машин, оснащенных электромашинной в составе износостойкой тормозной системы, является оценка повышения энергоэффективности. Она может быть проведена путем сравнения механической энергии, затраченной двигателем внутреннего сгорания на реализацию заданного скоростного режима движения, в случае наличия и отсутствия электромашин в износостойкой системе замедления.

Торможение при помощи ДВС, рабочей тормозной системы и ретардера не предполагает возможности рекуперации энергии. Поэтому в случае отсутствия электромашин во вспомогательной системе замедления считается, что механическая энергия двигателя затрачивается во всех случаях, если потребная на реализацию закона движения мощность $N_{\text{треб}}$ больше 0 (ВКМ движется в тяговом режиме).

$$E_{\text{двс}_{i+1}} = E_{\text{двс}_i} + \max(N_{\text{треб}_i}, 0) \cdot \Delta s_i / v^{\text{cp}}_i, \quad (6)$$

где $E_{\text{двс}}$ – механическая энергия, затраченная двигателем, без учета электромашин.

В случае наличия электромашин в износостойкой системе торможения считается, что механическая энергия двигателя затрачивается при опустошении молекулярного накопителя или недостатке тяговой мощности для реализации заданного закона движения (при недостатке тормозной мощности электромашин механическая энергия двигателя не затрачивается).

$$E_{\text{кон}_{i+1}} = \begin{cases} E_{\text{кон}_i} - \min(N_{\text{треб}_i}, N_{\text{эм}}^{\text{max}}) \cdot \Delta s_i / (v^{\text{cp}}_i \cdot \eta_{\text{эм}}), & \text{если } N_{\text{треб}_i} \geq 0 \\ E_{\text{кон}_i} - \max(N_{\text{треб}_i}, -N_{\text{эм}}^{\text{max}}) \cdot \Delta s_i \eta_{\text{эм}} / v^{\text{cp}}_i, & \text{если } N_{\text{треб}_i} < 0, \\ 0, & \text{если } E_{\text{кон}_{i+1}} < 0 \\ E_{\text{кон}}^{\text{max}}, & \text{если } E_{\text{кон}_{i+1}} > E_{\text{кон}}^{\text{max}} \end{cases}, \quad (7)$$

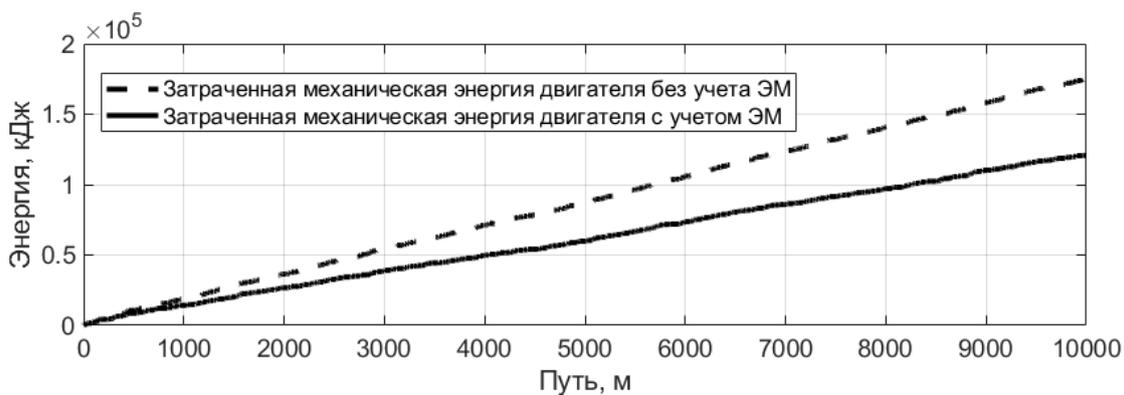
$$E_{\text{двс}_{i+1}}^{\text{эм}} = \begin{cases} E_{\text{двс}_i}^{\text{эм}} + \max(N_{\text{треб}_i}, 0) \cdot \Delta s_i / v^{\text{cp}}_i, & \text{если } E_{\text{кон}_i} = 0 \\ E_{\text{двс}_i}^{\text{эм}} + \max(N_{\text{треб}_i} - N_{\text{эм}}^{\text{max}}, 0) \cdot \Delta s_i / v^{\text{cp}}_i, & \text{в др. случаях} \end{cases}$$

где $E_{\text{кон}}$ – текущий запас энергии в накопителе;

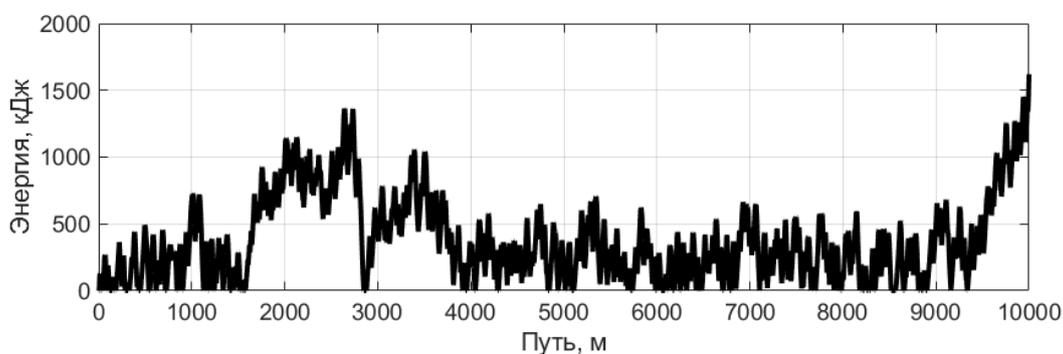
$E_{\text{двс}}^{\text{эм}}$ – механическая энергия, затраченная двигателем, с учетом электромашин.

Результаты численного эксперимента, проведенного с учетом описанного поведения системы при нулевом начальном запасе энергии в накопителе, представлены на рис. 6. В качестве примера используется ВКМ со следующими характеристиками: полная масса 34 т, удельная мощность ДВС в тяговом режиме 15 кВт/т, удельная мощность ДВС в тормозном

режиме 6 кВт/т, мощность электромашины в износостойкой системе замедления 100 кВт (3 кВт/т), емкость бортового накопителя энергии 0,45 кВт · ч.



а)



б)

Рис. 6. Зависимость затраченной механической энергии двигателя с учетом и без учета электромашины (а); изменение количества энергии, запасенной в накопителе (б)

Оценка снижение затрат механической энергии ДВС η_{eff} при использовании электромашины проводится по формуле (рис.7):

$$\eta_{eff_i} = 100\% \cdot (E_{двс_i} - E_{двс_i}^{ЭМ}) / E_{двс_i} \quad (8)$$

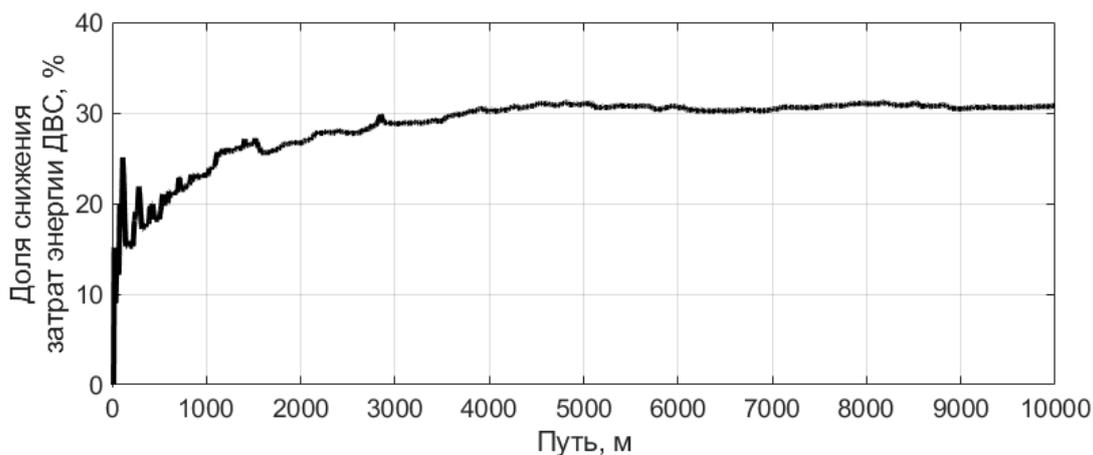


Рис. 7. Доля снижение затрат механической энергии ДВС при использовании электромашины

Полученные данные позволяют сделать вывод, что применение электромашины в износостойкой системе замедления для рассматриваемого режима движения (рис. 1) позволит снизить затраты механической энергии ДВС на 30,8 %.

Для оценки влияния интенсивности режима движения (влияния накладываемого ограничения на боковые и продольные ускорения) на снижение затрат энергии двигателя ВКМ за счет применения электромашины в износостойкой тормозной системе, необходимо провести выбор бортового накопителя энергии и оценку эффективности применения ЭМ для различных скоростных режимов движения согласно предложенному методу (полученных с различными комбинациями ограничений на замедление и боковое ускорение):

- без ограничения на боковое ускорение, с ограничением на уровень замедления – снижение энергозатрат 15 %;
- с ограничением на боковое ускорение, без ограничения на уровень замедления – снижение энергозатрат 13,5 %;
- без ограничения на боковое ускорение и на уровень замедления – снижение энергозатрат 4,3 %.

Таким образом, применение электромашины и бортового накопителя энергии в износостойкой системе торможения, рассматриваемой ВКМ (масса машины 34 т) теоретически позволит снизить затраты энергии до 30 %.

Выводы

Применение электромашины в износостойкой тормозной системе позволит снизить затраты энергии ДВС ВКМ до 30 %. При этом величина снижения энергозатрат связана со скоростным режимом движения машины: чем интенсивнее режим (отсутствуют ограничения на продольные и боковые ускорения), тем ниже эффективность применения электромашины. Данная особенность связана с тем, что при интенсивном замедлении ВКМ большая часть энергии движения не запасается в накопитель, а рассеивается посредством тормозной системы.

Библиографический список

1. **Heinz, Heisler** Advanced Vehicle Technology / Heisler Heinz. London: Butterworth-Heinemann. 2002. – 656 p. doi: 10.1016/B978-0-7506-5131-8.X5000-3.
2. Torque Control of Switched Reluctance Drive in Generating Mode / Alexander Krasovsky, Elena Gorbunova, Mikhail Bychkov, Artem Fedorenko // 25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives (IWED), Moscow, Russia. Jan 31-Feb 02, 2018.
3. Анализ и проектирование гибридных трансмиссий транспортных средств на основе планетарных механизмов. / С.А. Харитонов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2010. – 92 с.
4. **Косицын, Б.Б.** Метод определения энергоэффективного закона движения электробуса по городскому маршруту: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 165 с.
5. Electric Drive Study: Technical report (final): / U.S. Army Tank-Automotive Command Research, Development & Engineering Center; General Dynamics Land Systems Division. – Warren, Michigan, 1987. – 396 p.
6. A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions. / T.J. Barlow [et al.]. TRL limited. 2009. – 276 p.
7. **Штанг, А.А.** определение основных характеристик комбинированной энергетической установки для городского безрельсового транспорта / А.А. Штанг, М.В. Ярославцев // Доклады Академии Наук Высшей Школы Российской Федерации. 2016. №4.
8. **Ярославцев, М.В.** Определение параметров энергоустановки гибридного автомобиля моделированием процесса потребления энергии / М.В. Ярославцев // Электротехника. – 2014. – №12. – С.17-21.
9. Methods for road microprofile statistical data transformation / Evgeniy Sarach, George Kotiev and Sergey Beketov // MATEC Web of Conferences – 2018. V224. article № 04009.

10. Estimating operation modes for the individual wheel electric drive of the all-wheel drive vehicle with the use of the driving simulator / Kotiev G.O., Miroshnichenko A.V., Stadukhin A.A., Kositsyn B.B. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 534 (2019) 012004 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 534 (2019) 012004.
11. **Ротенберг, Р.В.** Подвеска автомобиля / Р.В. Ротенберг. – М.: Машиностроение, 1972. – 392 с.
12. **Тарасик, В.П.** Теория движения автомобиля / В.П. Тарасик. – СПб. БВХ-Петербург, 2006. – 478 с.
13. **Кравец, В.Н.** Теория движения автомобиля / В.Н. Кравец. – Нижний Новгород, 2014. – 696 с.
14. Study of Friction and Wear Characteristics of the Friction Pair of Centrifugal Brake Rollers / A.L. Nosko, E.V. Safronov, V.A. Soloviev // Journal of Friction and Wear, 2018, Vol. 39, No.2, – P. 145-151.
15. Generalized dynamic model of 'dry' friction units / Gekker, F.R. // Trenie i Iznos, Volume 19, Issue 2, March 1998, Pages 165-170.
16. Improvement of quality and tribological performance of transmission parts by electrochemical polishing / Yudin, E.G., Vartanyan, V.A., Vasilieva, E.I. // Journal of Friction and Wear. V. 19. I. 2. 1998. Pp. 81-86.

*Дата поступления
в редакцию: 01.12.2019*

G.O. Kotiev¹, I.F. Gumerov², A. A. Stadukhin¹, B.B. Kositsyn¹

CHOOSING THE CAPACITY OF THE ON-BOARD ENERGY STORAGE WHEN USING AN ELECTRIC MOTOR IN THE WEAR-RESISTANT BRAKING SYSTEM OF HIGH-MOBILITY WHEELED VEHICLES

Bauman Moscow State Technical University¹
Open Joint Stock Company KAMAZ²

Introduction: The use of a wear-resistant brake system becomes more relevant since the average speed of wheeled vehicles is increasing. The application of such systems is aimed at increasing mobility (by improving the braking properties), as well as reducing the thermal loads of the primary brake system. It is reasonable to use an electric motor that operates in generator mode in a wear-resistant braking system. That provides the ability to recover braking energy in order to increase the energy efficiency of the considered high-mobility wheeled vehicles. The energy storage device must be able to implement high electrical power (it is assumed that molecular energy storage devices are used) to apply energy recovery when the car is braking. The question of choosing a rational capacity becomes relevant in this regard.

Subject of research: The article is dedicated to determining the required capacity of the on-board energy storage device, that allows to increase the energy efficiency of the vehicle. Increasing of energy efficiency is achieved by enabling the use of an electric motor in a wear-resistant brake system.

Methodology and methods: The method of selecting the required capacity of the onboard storage is based on determining the amount of energy that is spent by the vehicle to maintain a given driving mode. In this study, the following strategy was accepted for controlling an electric motor: the energy stored in the storage device after braking will be spent during the subsequent acceleration. In this regard, energy efficiency can only be achieved by compensating for high-frequency fluctuations in the consumed/stored electricity in the storage unit. However the charge level should not reach the maximum when the car is moving in average conditions. The storage capacity is estimated by the maximum range of the function for changing the amount of energy stored/consumed on the basis of the data obtained while driving along a given route.

Results and scientific novelty: The proposed method makes it possible to form requirements for the characteristics of an on-board energy storage device that used as part of a wear-resistant braking system. The distinctive feature of the method is the use of statistical data on road and ground conditions of the car.

Practical significance: This method makes it possible to determine the rational characteristics of the electric energy storage (required capacity), that provides the possibility of energy-efficient movement of high-mobility wheeled vehicles in average operating conditions.

Key words: wheeled vehicle, energy efficiency, energy consumption, electric machine, energy storage unit, auxiliary brake system.

УДК 629.33

П.С. Рогов, В.П. Мишустов, Д.А. Колесниченко, Е.А. Сеницын

**СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ЭКСТРЕННОГО ТОРМОЖЕНИЯ:
ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ И КОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматриваются преимущества и ограничения датчиков обнаружения объектов, применяемых в системах автоматического экстренного торможения. Приводятся возможные способы повышения эффективности системы. Представлены данные по возможному эффекту от внедрения систем автоматического экстренного торможения с точки зрения снижения количества и тяжести последствий дорожно-транспортных происшествий.

Ключевые слова: системы активной помощи водителю, безопасность, автоматическое экстренное торможение, радар, лидар, стереокамера, дорожно-транспортное происшествие.

Одним из актуальных современных направлений развития автомобильной техники является повышение безопасности дорожного движения. Это может быть достигнуто за счет повышения энергоемкости кузова [1-3], совершенствования элементов пассивной безопасности, улучшения свойств управляемости и устойчивости [4-6]. В последнее время наиболее динамично развивающимся направлением повышения безопасности автомобиля является разработка систем активной помощи водителю – ADAS (Adaptive Driver Assistance Systems) и оснащение автомобилей указанными системами. Основное назначение ADAS – частичная замена функций водителя. Это особенно актуально при снижении внимания водителя к дорожной обстановке или его неправильной реакции на сложившуюся дорожную ситуацию. Многими функциями ADAS в настоящий момент уже оснащаются серийные зарубежные автомобили. Некоторые из функций ADAS появляются в нормативных документах по техническому регулированию и, таким образом, оснащение ими автомобиля и соответствие этих функций требованиям технического регламента становится обязательным условием регистрации.

Речь идет об одной из систем, обязательных для регистрации автомобилей категорий N2, M2 (класс B), N3, M3 (класс III) в странах Европейского Союза (ЕС). Это система автоматического экстренного торможения (далее АЕBS – Automatic Emergency Braking System). Назначением системы является выполнение экстренного торможения в автоматическом режиме при риске столкновения с движущимся или стационарным препятствием и отсутствии реакции водителя на ситуацию. Очевидно, что целевым видом дорожно-транспортного происшествия (ДТП), при котором действие системы АЕBS имеет наибольший эффект, является столкновение одного транспортного средства с задней частью другого. Количество подобных происшествий является различным в международном аспекте и, соответственно, эффективность сокращения ДТП за счет оснащения автомобилей АЕBS может варьироваться. Например, в статье [7] эффект от обязательного оснащения АЕBS всех автомобилей в Австралии оценивается снижением количества ДТП на 7 %. По оценке, данной в работе [8], применение АЕBS может привести к снижению тяжести 25-75 % ДТП, связанных с лобовым столкновением, в странах ЕС. В результате оценки эффективности АЕBS с использованием статистики по автомобилям, реально оснащенным системой [9], было установлено, что система привела к сокращению ДТП с легкими травмами на 13,9 %, ДТП со смертельными последствиями на 2,2 %, и ДТП с серьезными травмами на 9,4 %. Общая объединенная статистика приводится в исследовании [10], где указывается, что использование системы АЕBS приводит к сокращению ДТП с летальными последствиями приблизительно на 11 %; помо-

гает избежать 1 % (0.6 %-1.1 %) ДТП с серьезными травмами и сокращает количество ДТП с легкими травмами на 10 % (9 %-12 %).

Очевидно, что оснащение автомобилей АЕBS является эффективной мерой по повышению безопасности дорожного движения. Тот факт, что система внедряется в технический регламент как необходимое условие для регистрации только грузовых автомобилей и автобусов, по всей видимости, связан с тем, что указанные категории автомобилей обладают меньшей управляемостью и устойчивостью и, поэтому, выполнение торможения для этих категорий является основным средством по избеганию ДТП.

Компонентный состав АЕBS может варьироваться в основном за счет применения различных датчиков обнаружения и распознавания объектов. В табл. 1 продемонстрированы датчики, используемые в настоящий момент на серийных автомобилях [11-20].

Таблица 1

Виды датчиков обнаружения объектов системы АЕBS на серийных автомобилях

Автомобиль / оригинальное название системы	Датчик			
	Радар	Видеокамера	Лидар	Стереокамера
Hyundai Santa Fe		1	1	
VW Crafter	1	1		
BMW / Pedestrian Warning with City Brake Activation				1
FIAT / City Brake Control			1	
Mitsubishi / Forward Collision Mitigation	1			
Ford / Active City Stop			1	
DAF (CF / XF)	1			
Subaru XV / EyeSight				1
Mercedes-Benz Sprinter	1	1		
Volvo trucks	1	1		

Как видно из таблицы, существует четыре основных датчика обнаружения систем АЕBS и различные комбинации их совместного применения. Рассмотрим подробнее преимущества и недостатки датчиков.

Применение стереоскопической камеры обусловлено тем, что с ее помощью можно, в отличие от традиционной камеры, достаточно точно измерить расстояние до объектов. Благодаря использованию методов распознавания объектов по изображению [21-22], достигается минимизация ложных распознаваний и, соответственно, ложных реагирований системы. Стереокамера обладает дальностью обнаружения около 55 м [23]. Этого недостаточно для выполнения требований технического регламента – Правил ООН №131. Поэтому в настоящее время этот компонент применяется на легковых автомобилях, где пока отсутствуют обязательные предписания технического регламента. К недостаткам стереокамеры можно также отнести низкую эффективность работы в сложных погодных условиях, в темное время суток и при низкой эффективности работы щеток стеклоочистителей. Расположение данного компонента в салоне автомобиля с условием размещения линз камеры в зоне очистки лобового стекла щетками стеклоочистителей может представлять сложность для автопроизводителя, т.к. компонент может стать причиной нарушения зон обзора водителя, регламентируемых ГОСТ Р 51266-99 [24].

Лидар более устойчив к воздействию сложных погодных условий, и эффективность его работы не зависит от времени суток. Он может быть размещен в элементах экстерьера автомобиля, не нарушая поля обзора водителя. Дальность обнаружения объектов с использованием лидара несколько выше, чем дальность обнаружения стереокамеры, и составляет около 100 м [25]. В связи с относительно невысокой дальностью обнаружения объекта-

ми установки лидара, так же, как и стереокамеры, являются легковые автомобили, не относящиеся к требованиям Правил ООН №131.

Традиционная видеокамера обладает всеми недостатками стереокамеры, к которым добавляется еще один – невозможность определения дистанции до объекта, находящегося на дальнем расстоянии и представляющего опасность столкновения. В связи с этим, видеокамера в системах АЕBS применяется как дополнительный датчик, повышающий эффективность распознавания основного датчика обнаружения (радар, лидар) (табл. 1).

По данным из открытых источников, радар сейчас является наиболее популярным датчиком обнаружения систем АЕBS. Это объясняется, в первую очередь, дальностью обнаружения целевых объектов (автомобилей) – 200...250 м [26]. Для пешеходов и мотоциклистов дальность обнаружения несколько скромнее, но также выше, чем у остальных датчиков. Поэтому радар является основным датчиком обнаружения для автомобилей, подверженным действию Правил ООН №131. Как правило, радар размещается за решеткой радиатора или бампером автомобиля и защищается от механических воздействий крышкой, к которой предъявляются особые требования. Она должна быть изготовлена из определенных материалов (полимеров), обладающих низким значением диэлектрической постоянной, должен соблюдаться определенный угол наклона фронтальной части крышки. Кроме того, должны выполняться требования по шероховатости, толщине и расстоянию от радара до фронтальной части крышки. Эффективность работы радара снижается в случае чрезмерного окружения его металлическими частями автомобиля и поэтому этот фактор проверяется отдельно в процессе испытаний и доводки системы АЕBS в составе автомобиля.

Основным недостатком радара является низкая эффективность распознавания объекта. Большинство автомобильных радаров позволяет определить расстояние (продольное и поперечное) до объекта, горизонтальный вектор скорости, ускорения объекта в горизонтальной плоскости. Единственная характеристика формы и размеров объекта, определяемая радаром, это эффективная площадь рассеяния (ЭПР) объекта. ЭПР является количественной мерой свойства объекта рассеивать электромагнитную волну [27]. Указанная характеристика зависит сразу от формы, размеров и материала, из которого изготовлен объект [28]. Поэтому, если у объекта дорожного движения низкий ЭПР (например пешеход), он может совпадать с значением ЭПР дорожных знаков, канализационных люков, отбойников на обочине. Объекты инфраструктуры, такие как: трубопроводы, пролегающие над дорогой, также могут быть ошибочно приняты за объекты, представляющие опасность столкновения. Для минимизации ложных реагирований АЕBS логичным действием производителей систем предполагается минимизация поля обзора радара по горизонтали и вертикали, что приводит к снижению эффективности по обнаружению потенциально опасных объектов. Таким образом, можно выполнить требования регламента и минимизировать количество ложных срабатываний, но при этом АЕBS не будет гарантировать полноценную защиту пассажиров и водителя автомобиля от столкновения в случаях неправильной реакции водителя на дорожную ситуацию.

Выход из сложившейся ситуации – применение комбинации сенсоров для более высокой эффективности обнаружения потенциально опасных объектов. Как видно из табл. 4, достаточно популярной комбинацией сенсоров среди серийных решений является радар-видеокамера. Подобное решение можно наблюдать в основном среди новых моделей автомобилей, вышедших на рынок в 2018 г. Традиционный недостаток камеры снижает эффективность применения системы в темное время суток и прочих условиях, усложняющих визуальное наблюдение, приведенных выше в тексте. Поэтому среди автопроизводителей продолжается поиск наиболее эффективного сочетания сенсоров. Например, компания Volvo анонсировала выход нового поколения системы City Safety, обладающей возможностью распознавания пешеходов и диких животных в темное время суток [29]. Подобный эффект может быть достигнут за счет применения системы ночного видения или тепловизора. Компания Perceptive Automata презентовала применение ПО с искусственным интеллектом [30] для усовершенствования возможностей обнаружения пешеходов и, в частности, тех из них,

которые не находятся на траектории движения автомобиля, но при этом могут в скором времени оказаться на проезжей части. Базовая технология Perceptive Automata основана на данных, получаемых с автомобильных датчиков, показывающих взаимодействие с людьми. Большой массив таких данных используется для тренировки моделей глубинного обучения, которые интерпретируют поведение людей так же, как сами люди. Система способна предугадывать намерения пешеходов, мотоциклистов, велосипедистов и других водителей. Визуализация действия данного ПО показана на рис. 1.

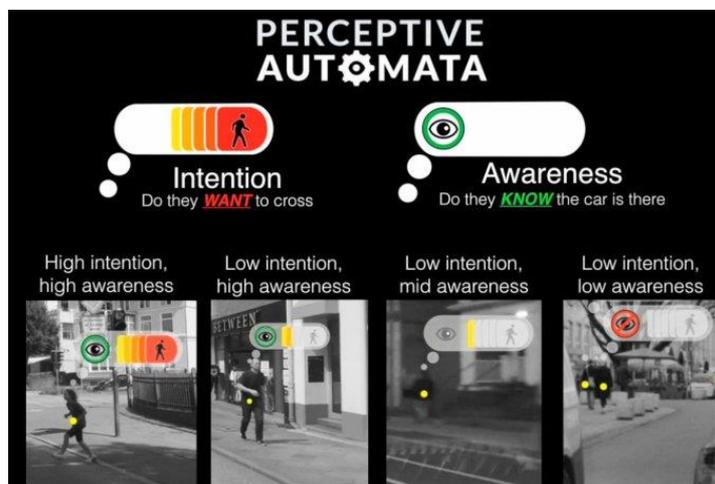


Рис. 1. Возможные ситуации распознавания Perceptive Automata

Данная система скорее предназначена для автономных транспортных средств, т.к. в серийных решениях автоматических систем управления сегодняшнего дня важна однозначность и четкое обоснование принимаемых решений. Необходимо разграничивать зоны ответственности водителя и зоны ответственности системы и для последних проводить обширный анализ функциональной безопасности. Также это необходимо для однозначного установления причины возникновения дорожно-транспортного происшествия с участием автомобиля, оснащенного активными системами помощи водителю.

По рассмотренным данным можно сделать вывод, что несмотря на большое количество серийных автомобилей с системой АЕBS на дорогах общего пользования многие концептуальные решения по реализации системы продолжают совершенствоваться и поэтому направление по совершенствованию систем автоматического экстренного торможения является актуальным с исследовательской точки зрения. Главным мотиватором повышения эффективности работы систем является совершенствование технического регламента. Основным датчиком обнаружения объектов является радар дальнего действия, который обязательно должен присутствовать на автомобиле. Кроме того, система АЕBS сама по себе может стать источником опасности для водителя и пассажиров, поскольку она предполагает активное управление замедлением автомобиля и сбросом крутящего момента двигателя без участия водителя. Вопросы потенциальных опасностей и последствий отказов системы АЕBS, а также мероприятия по повышению безопасности системы будут рассмотрены в дальнейшей работе.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках проекта «Создание высокотехнологичного производства модельного ряда автомобилей ГАЗель Next с новой электронной архитектурой электронных систем» по Соглашению № 075-11-2019-027 от 29.11.2019 (постановление Правительства Российской Федерации от 09 апреля 2010 года №218).

Библиографический список

1. **Рогов, П.С.** Определение нагрузочного режима, действующего на автобус при его опрокидывании / П.С. Рогов, Л.Н. Орлов // Инженерный вестник дона. – 2015. – №3 (37).
2. **Рогов, П.С.** Методика экспресс-оценки пассивной безопасности кузовов автобусов / П.С. Рогов, Л.Н. Орлов, А.В. Тумасов // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9-1.
3. **Орлов, Л.Н.** Повышение пассивной безопасности кузовов автобусов / Л.Н. Орлов, П.С. Рогов, А.В. Тумасов, А.С. Вашурин // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – №3.
4. **Вашурин, А.С.** Актуальные проблемы повышения активной безопасности автомобилей путём применения систем электронного контроля устойчивости / А.С. Вашурин, С.Ю. Костин, Ю.П. Трусков, Е.И. Торопов, А.В. Тумасов // Беспилотные транспортные средства: проблемы и перспективы. Сборник материалов 94 международной научно-технической конференции Ассоциации автомобильных инженеров. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2016.
5. **Tumasov, A.V.** Influence of LCV bearing stiffness on its static and dynamic characteristics of stability and steerability / A.V. Tumasov, S.Y. Kostin, D.A. Butin, A.A. Vasiliev, P.V. Sereda // Materials physics and mechanics. – 2019. – №1.
6. **Барахтанов, Л.В.** Оценка параметров устойчивости легких коммерческих автомобилей по результатам расчетных и экспериментальных исследований / Л.В. Барахтанов, А.М. Грошев, П.В. Середина, А.В. Тумасов // Механика машин, механизмов и материалов. – 2017. – №1 (38).
7. **Mitsopoulos, E.** Acceptability of in-vehicle intelligent transport systems to Victorian car drivers. Australian Road Safety Research / E. Mitsopoulos, M. A. Regan, N. Haworth // Policing and Education Conference Proceedings. 2002.
8. **Grover, C.** Automated Emergency Braking Systems: Technical requirements, costs and benefits / C. Grover, I. Knight, F. Okoro, I. Simmons, G. Couper, P. Massie, B. Smith // PPR227. Crowthorne, Berkshire. UK: TRL Limited, 2008.
9. **Hummel, T.** Advanced Driver Assistance Systems. An investigation of their potential safety benefits based on an analysis of insurance claims in Germany / T. Hummel, M. Kuhn, J. Bende, A. Lang // Insurers Accident Research. Berlin: German Insurance Association, 2008.
10. **Hynd, D.** Benefit and Feasibility of a Range of New Technologies and Unregulated Measures in the fields of Vehicle Occupant Safety and Protection of Vulnerable Road Users / D. Hynd, M. McCarthy, J. Carroll, M. Seidl, M. Edwards, C. Visvikis, M. Tress, N. Reed, A Stevens // Technical report. Brussels: European Commission, 2015. – 470 с.
11. Система экстренного торможения Hyundai Santa Fe // Автоцентр Сити Hyundai URL: <https://hyundai-avtocity.ru/hyundai-club/sistema-ekstrennogo-tormozheniya-hyundai-santa-fe-2016-2017/> (дата обращения: 02.05.2019).
12. Crafter 2017. Введение. Программа самообучения 566. Коммерческие автомобили VW, 2017.
13. 2014 BMW Pedestrian Warning with City Brake Activation // Euro NCAP URL: <https://www.euroncap.com/ru/%D1%80%D0%B5%D0%B9%D1%82%D0%B8%D0%BD%D0%B3%D0%B8-%D0%B8-%D0%BD%D0%B0%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%B4%D1%8B/euro-ncap-rewards/2014-bmw-pedestrian-warning-with-city-brake-activation/> (дата обращения: 02.05.2019).
14. 2013 FIAT City Brake Control // Euro NCAP URL: <https://www.euroncap.com/ru/%D1%80%D0%B5%D0%B9%D1%82%D0%B8%D0%BD%D0%B3%D0%B8-%D0%B8-%D0%BD%D0%B0%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%B4%D1%8B/euro-ncap-advanced-rewards/2013-fiat-city-brake-control/> (дата обращения: 02.05.2019).
15. 2013 Mitsubishi Forward Collision Mitigation (FCM) // Euro NCAP URL: <https://www.euroncap.com/ru/%D1%80%D0%B5%D0%B9%D1%82%D0%B8%D0%BD%D0%B3%D0%B8-%D0%B8-%D0%BD%D0%B0%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%B4%D1%8B/euro-ncap-advanced-rewards/2013-mitsubishi-forward-collision-mitigation-fcm/> (дата обращения: 02.05.2019).
16. 2011 Ford Active City Stop // Euro NCAP URL: <https://www.euroncap.com/ru/%D1%80%D0%B5%D0%B9%D1%82%D0%B8%D0%BD%D0%B3%D0%B8-%D0%B8-%D0%BD%D0%B0%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%B4%D1%8B/euro-ncap-advanced-rewards/2011-ford-active-city-stop/> (дата обращения: 02.05.2019).
17. Усовершенствованная система аварийного торможения // Компания DAF Trucks Russia – DAF Trucks Russia URL: <http://www.daf.ru/ru-ru/trucks/comfort-and-safety-systems-euro-6/advanced-emergency-braking-system> (дата обращения: 02.05.2019).

18. Системы помощи водителю // Subaru Russia – официальный сайт производителя в России – Арена Авто-Тольятти URL: <https://tl.subaru.ru/subaru-world/news/team-russia/92476> (дата обращения: 02.05.2019).
19. Активная система экстренного торможения // Малотоннажные автомобили I Mercedes-Benz URL: <https://www.mercedes-benz.ru/vans/ru/sprinter/tourer/optional-equipment-highlights-1/teaser-group-1/active-brake-assist> (дата обращения: 02.05.2019).
20. Экстренное торможение – система, спасающая жизни // Volvo Trucks – европейские грузовые автомобили URL: <https://www.volvotrucks.ru/ru-ru/news/magazine-online/2017/jul/tech-focus-emergency-brake.html> (дата обращения: 02.05.2019).
21. **Порубов, Д.М.** Система автоматизированного управления движением транспортных средств на основе распознавания дорожной сцены и ее объектов / Д.М. Порубов, П.О. Береснев, Д.Ю. Тюгин, А.В. Тумасов, В.В. Беляков, Д.В. Зезюлин // Известия московского государственного технического университета МАМИ. 2018. №1 (35).
22. **Порубов, Д.М.** Разработка автомобильной системы определения и удержания в полосе движения / Д.М. Порубов, Д.В. Зезюлин, Д.Ю. Тюгин, А.В. Тумасов, В.В. Беляков, А.М. Грошев, П.О. Береснев // Транспортные системы. – 2018. – №2 (8).
23. Characteristics of the stereo video camera // Bosch Mobility Solutions URL: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/driver-assistance-systems/lane-departure-warning/stereo-video-camera/> (дата обращения: 02.05.2019).
24. ГОСТ Р 51266-99. Автомобильные транспортные средства. Обзорность с места водителя. Технические требования. Методы испытаний; Введ. с 20.04.1999 г – Москва: Госстандарт России.
25. HDL-32E // Velodyne Lidar URL: <https://velodynelidar.com/hdl-32e.html> (дата обращения: 02.05.2019).
26. Standardized ARS Interface. Technical Documentation. ARS 404-21 (Entry) ARS 408-21 (Premium). V 1.8. Continental Engineering Services GmbH, 2017.
27. **Финкельштейн, М.И.** Основы радиолокации / М.И. Финкельштейн. – М.: Радио и связь, 1983.
28. **Skolnik, M.I.** Radar Handbook. 2nd ed. / M.I. Skolnik // McGraw-Hill Professional, 1990.
29. Volvo: система распознавания пешеходов // Популярная механика URL: <https://www.popmech.ru/vehicles/14592-tormozit-nelzya-davit/#part0> (дата обращения: 02.05.2019).
30. About Us // Perceptive Automata URL: <https://www.perceptiveautomata.com/about-us> (дата обращения: 02.05.2019).

*Дата поступления
в редакцию: 04.03.2020*

P.S. Rogov, V.P. Mishustov, D.A. Kolesnichenko, E.A. Sinitsyn

AUTOMATIC EMERGENCY BRAKING SYSTEMS. FEATURES OF IMPLEMENTATION AND COMPONENTS

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

Purpose: Analysis of the effectiveness of automatic emergency braking systems. Search for the advantages and disadvantages of various detection sensors of the system.

Design/methodology/approach: In the comparison of the effectiveness of different detection sensors, attention was paid to the distance of objects detection, work in difficult weather conditions and dark time of day, the difficulty of installing the sensor in a vehicle.

Findings: Despite the large number of cars equipped with an automatic emergency braking system, many system implementation solutions continue to be seriously improved and are far from ideal.

Research limitations/implications: The present study provides a starting-point for further research in the field of concept and serial implementation of automatic emergency braking systems.

Originality/value: The study can be useful for choosing a detection sensor (radar, video camera, lidar) for an automatic emergency braking system.

Key words: active driver assistance systems, road safety, automatic emergency braking, radar, lidar, stereo camera, traffic accident.

УДК 629.114.45 + 662.6

А.М. Умирзоков¹, К.Т. Мамбеталин², С.С. Сайдуллозода^{1,2}, Ш.К. Самиев³**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСХОДА ТОПЛИВА БОЛЬШЕГРУЗНЫМИ
АВТОМОБИЛЯМИ В ГОРНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими¹
Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)²
ДАО «Основное строительство» ОАО Рогунской ГЭС³

Приведены результаты экспериментальных исследований по оценке путевого и транспортного расходов топлива для большегрузных автомобилей-самосвалов в условиях строительства Рогунской ГЭС. Изучены факторы, влияющие на расход топлива, главным из которых выступает угол подъема отдельных участков дороги; другим фактором является высота над уровнем моря. Исследование проведено применительно к условиям Республики Таджикистан, где большегрузные самосвалы эксплуатируются на высотах 1000-2000 м над уровнем моря. Эксперименты проводились летом на разных маршрутах, с длинами плеч от 4,5 до 6,0 км и на высотах над уровнем моря от 1100 до 1180 м. При определении расчетного значения путевого и транспортного расходов топлива введен динамический коэффициент, учитывающий сложность условий эксплуатации в горных карьерных дорогах. С учетом основных факторов, формирующих путевой и транспортный расходы топлива большегрузных карьерных самосвалов на сложном горном рельефе, построены графики зависимости путевого расхода топлива автомобилем-самосвалом БелАЗ-7540В от условий эксплуатации на строительстве Рогунской ГЭС при движении с грузом и без груза, а также для одной поездки. Для оценки эффективности эксплуатации различных марок автомобилей-самосвалов определены фактические значения транспортных расходов топлива.

Ключевые слова: автомобили, расход топлива, горные условия, уклон дороги, сложность условий эксплуатации, динамический коэффициент, эффективность.

Введение

Большегрузные карьерные самосвалы в условиях Республики Таджикистан эксплуатируются, в основном, на строительстве гидротехнических сооружений, а также горнодобывающих и горно-обогатительных предприятиях. Ввиду того, что 93 % территории республики занимает горная местность, большое число данных сооружений и предприятий расположены высоко над уровнем моря [1]. Из-за сложности геометрии автомобильных дорог, их низкой надежности, изменчивости условий внешней среды, а также круглосуточной трехсменной эксплуатации, условия близки к экстремальным. Их однозначно можно отнести к наиболее суровым на всем Земном шаре. Это обуславливает чрезвычайно высокие требования к надежности системы «Водитель – Автомобиль – Дорога – Среда» (ВАДС).

Существует ряд мер по предупреждению снижения надежности системы ВАДС [2]. Автомобили самосвалы БелАЗ-7540В, HOWO- ZZ3257N3847N1 и SHACMAN-SX3256DR384 вполне оправдали себя как надежные применительно к условиям Республики Таджикистан. Для оценки эффективности эксплуатации перечисленных карьерных самосвалов возникает необходимость исследования их технико-экономических показателей. Важным параметром является также путевой расход топлива, который в отдельных случаях может превышать номинальное (базовое) значение в 2 и более раз. Например, для автомобиля БелАЗ-7540В в условиях эксплуатации в горных карьерах этот показатель в особо сложных участках маршрута (при движении на подъем) может достигать до 330 л / (100 км) и выше. Из множества факторов, формирующих путевой расход топлива, главными выступают сложность дорожных условий, масса перевозимого груза и высота над уровнем моря; их влияние на расход топлива возможно снизить путем организационно-технических мероприятий.

Постановка задачи

Путевой (линейный) расход топлива – это расход топлива на единицу пройденного пути автомобилем или другой мобильной машиной. Обычно для автомобилей путевой расход топлива измеряется как л / (100 км) или кг / (100 км). По сути, путевой расход топлива – это удельный расход топлива, отнесенный к единице пройденного пути автомобилем или другой мобильной машиной [3, 4].

Для характеристики эффективности работы ДВС обычно пользуются удельным эффективным расходом топлива (g_e), равным отношению часового расхода топлива (G_T) к эффективной мощности двигателя (N_e) [5, 6]. Другими словами, удельный расход топлива – это расход топлива, отнесенный на единицу выполненной работы

$$g_e = \frac{G_T}{3,6 \cdot N_e}, \text{ г / кДж}, \quad (1)$$

где G_T – часовой расход топлива, кг/ч; N_e – эффективная мощность двигателя, кВт.

Несмотря на важность показателя g_e , на практике эксплуатации автомобилей для расчета расхода топлива удобно пользоваться путевым расходом топлива.

Путевой расход топлива можно определить по формулам (2-3) [7]:

$$G_{II} = \frac{G_T}{100 \cdot V} = \frac{Q}{S}, \text{ кг / (100 км)}, \quad (2)$$

$$G_{II} = \frac{G_T}{100 \cdot V \cdot \rho_T} = \frac{Q}{S \cdot \rho_T}, \text{ л / (100 км)}, \quad (3)$$

где V – скорость движения автомобиля, км/ч; Q – расход топлива за промежуток времени t , кг; S – путь, пройденный автомобилем за то же время t , км; ρ_T – плотность дизельного топлива, кг/л.

Экспериментальные исследования

Для автомобиля-самосвала марки БелАЗ-7540В, оснащенного V-образным 12-цилиндровым (V12) дизелем марки ЯМЗ-240М2-1 и ГМП 3+1 и развивающего номинальную мощность 265 кВт (360 л.с.), путевой расход топлива составляет 132,5 л / (100 км) или 113,95 кг / (100 км) при работе на летнем дизельном топливе плотностью 0,860 кг/л [8]. Для автомобилей-самосвалов марок HOWO-ZZ3257N3847N1 и SHACMAN-SX3256DR384 определены расчетным путем. В различных карьерах на территории Республики Таджикистан, а также при эксплуатации автомобилей-самосвалов в одних и тех же карьерах, но в различных эксплуатационных условиях, этот показатель может варьировать в довольно широких пределах. Для карьерных самосвалов основными критериями, характеризующим условия эксплуатации, являются: природно-климатические условия (высота над уровнем моря, температура окружающей среды); дорожные условия; плечо маршрута перевозки; нагрузочный и скоростной режимы движения; техническое состояние автомобиля, связанного со своевременностью и качеством проведения ТО и ремонта; качество применяемого топлива и др.

Условия проведения эксперимента

Большегрузные карьерные самосвалы в условиях Республики Таджикистан эксплуатируются в достаточно сложных природно-климатических условиях (на высотах над уровнем моря от 1100 до 1400 м, где температура окружающей среды в течение года обычно может варьировать в пределах от -15 до +30 °С). Для условий строительства Рогунской ГЭС температура окружающей среды варьирует в пределах от -7 до +30 °С. При этом среднегодовая температура воздуха составляет +8,2 °С. Скорость ветра в районе строительства Рогунской ГЭС меняется в течение года от 2,4 до 3,5 м/с. Среднее значение скорости ветра соста-

вит 2,9 м/с. Среднемесячное количество осадков меняется в достаточно широких пределах: от 150,4 мм в мае до 2,8 мм в июле. Среднегодовое значение количества осадков равняется 79,55 мм [9].

Для условий строительства Рогунской ГЭС на основе хронометражных исследований определены экспериментальные данные по путевому расходу топлива. По данным экспериментальных исследований построены графики зависимости путевого расхода топлива автомобилем-самосвалом БелАЗ-7540В от условий эксплуатации на строительстве Рогунской ГЭС при движении автомобиля с грузом и без груза (рис. 1).

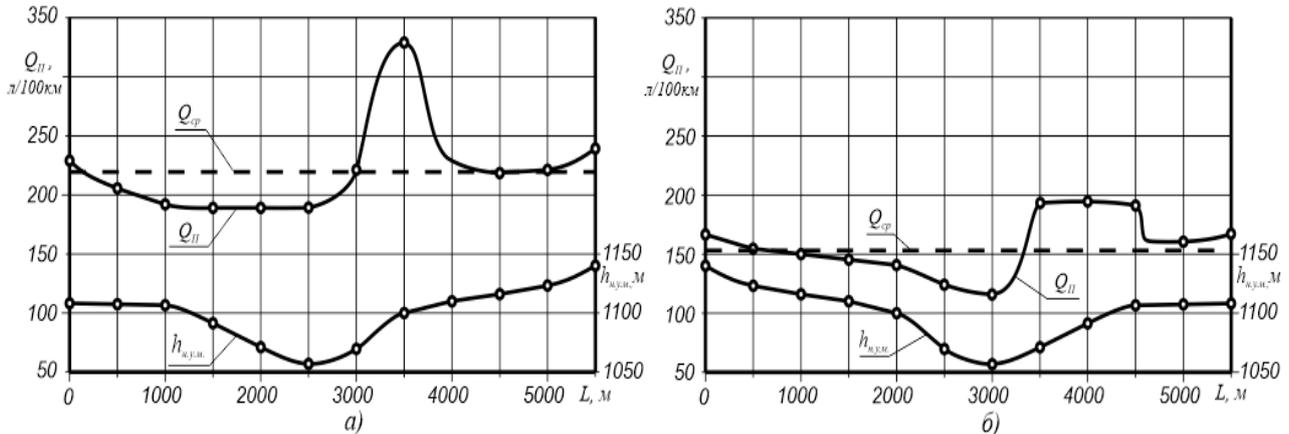


Рис. 1. Графики зависимости путевого расхода топлива автомобилем-самосвалом БелАЗ-7540В от условий эксплуатации на строительстве Рогунской ГЭС при движении автомобиля с грузом (а) и без груза (б):

$h_{\text{нум}}$ – высота над уровнем моря, м;

$Q_{\text{п}}$ – путевой расход топлива по данным экспериментальных исследований;

$Q_{\text{ср}}$ – среднее значение путевого расхода топлива

Для автомобилей-самосвалов принято определять путевой расход топлива за одну поездку. Для условий строительства Рогунской ГЭС график зависимости путевого расхода топлива автомобилем-самосвалом БелАЗ-7540В от условий эксплуатации за одну поездку представлен на рис. 2.

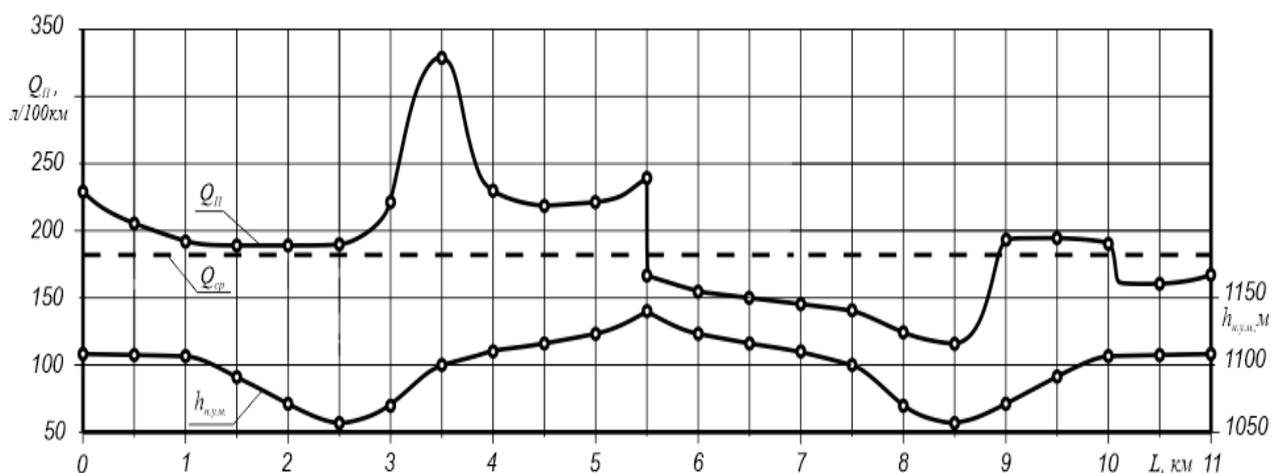


Рис. 2. График зависимости путевого расхода топлива автомобилем – самосвалом БелАЗ-7540В от условий эксплуатации на строительстве Рогунской ГЭС за одну поездку:

$h_{\text{нум}}$ – высота над уровнем моря, м;

$Q_{\text{п}}$ – путевой расход топлива по данным экспериментальных исследований;

$Q_{\text{ср}}$ – среднее значение путевого расхода топлива за одну поездку

Математическая модель

На основе результатов экспериментальных исследований для определения путевого расхода топлива автомобилями-самосвалами в горных условиях предлагается эмпирическая формула (4):

$$\sum Q_{\Pi} = (1 + k_d + k_n \pm k_i + k_t + k_g) \cdot Q_B + 1,5 \cdot m_{cp}, \quad (4)$$

где Q_B – базовый путевой расход топлива автомобилем (для автомобиля-самосвала БелАЗ-7540В $Q_B = 132,5$ л/(100 км), а для автомобилей-самосвалов HOWO-ZZ3257N3847N1 и SHACMAN-SX3256DR384 базовые значения путевого расхода топлива определены расчетным путем); k_d – динамический коэффициент, учитывающий сложность условий эксплуатации, значение которого зависит от состояния дорожного полотна, геометрии дороги, интенсивности движения, соотношения установившегося и не установившегося движений и т.д. (для условий строительства Рогунской ГЭС можно принимать $k_d = 0,12 - 0,13$); k_h – коэффициент, учитывающий высоту над уровнем моря на путевой расход топлива (для условий строительства Рогунской ГЭС $k_h = 9 \cdot 10^{-5} \cdot h$); k_i – коэффициент, учитывающий влияние уклона дороги на путевой расход топлива (принимается $k_i = 0,15 \cdot i$); k_t – коэффициент, влияние температуры воздуха на путевой расход топлива; k_g – коэффициент, учитывающий влияние сопротивления воздуха на путевой расход топлива; m_{cp} – масса перевозимого груза, т; h – высота над уровнем моря, м; i – среднее значение уклона дороги, %.

Для эксплуатации автомобилей-самосвалов в условиях строительства Рогунской ГЭС можно пренебречь влиянием температуры воздуха на путевой расход топлива ($k_t = 0$) из-за среднегодового значения температуры воздуха, равного $+8,2$ °С, а также можно пренебречь влиянием сопротивления воздуха на путевой расход топлива ($k_g = 0$) из-за невысоких скоростей движения автомобилей на маршрутах.

Следовательно, формулу (4) можно переписывать в виде (5):

$$\sum Q_{\Pi} = (1 + k_d + k_n \pm k_i) \cdot Q_B + 1,5 \cdot m_{cp}. \quad (5)$$

Предложенная эмпирическая формула хорошо согласуется с результатами экспериментального исследования для условий строительства Рогунской ГЭС. В ней не учитывается влияние температуры и сопротивления воздуха на путевой расход топлива. Дело в том, что в условиях строительства Рогунской ГЭС среднегодовое значение температуры воздуха составляет $+8,2$ °С, а среднее значение скорости движения автомобилей-самосвалов варьирует в пределах 10...30 км/ч.

Для большегрузных автомобилей-самосвалов в горных условиях эксплуатации путевого расхода топлива для одной ездки можно определить по эмпирической формуле (6):

$$\sum Q_{\Pi} = (1 + k_d + k_n) \cdot Q_B + 0,75 \cdot m_{cp}. \quad (6)$$

Для проверки теоретических предпосылок, изложенных выше, были проведены экспериментальные исследования большегрузных автомобилей – самосвалов в условиях горных карьер. В качестве объектов исследования были выбраны большегрузные автомобили-самосвалы марок БелАЗ-7540В, HOWO-ZZ3257N3847N1 и SHACMAN-SX3256DR384, эксплуатируемых в условиях строительства Рогунской ГЭС. Экспериментальные исследования проводились с целью сравнительной оценки топливно-экономических показателей большегрузных автомобилей-самосвалов марок БелАЗ-7540В, HOWO-ZZ3257N3847N1 и SHACMAN-SX3256DR384.

Цель исследования предполагала решение следующих задач: определение закономерности изменения топливно-экономических показателей большегрузных автомобилей-самосвалов, эксплуатируемых в условиях строительства Рогунской ГЭС, в зависимости от высоты над уровнем моря, уклона дороги, массы перевозимого груза, а также режима движения, условия погрузки и выгрузки, вида и частоты маневров и т.п., учитываемого коэффи-

циентом динамизма; установление сравнительной топливно-экономической эффективности большегрузных автомобилей-самосвалов марок БелАЗ-7540В, HOWO-ZZ3257N3847N1 и SHACMAN-SX3256DR384, эксплуатируемых в условиях строительства Рогунской ГЭС по фактическому транспортному расходу топлива, измеряемого в л/(100 ткм); определение относительного расхождения между фактическим и расчетным значениями путевого расхода топлива.

Результаты исследования

Экспериментальные исследования проводились в соответствии с нормативно-техническими документациями, установленными на большегрузные автомобили-самосвалы марок БелАЗ-7540В, HOWO-ZZ3257N3847N1 и SHACMAN-SX3256DR384 [10]. При проведении экспериментальных исследований руководствовались требованиями, предусмотренными в стандартах ГОСТ 20306-90 [11]. Условия экспериментальных исследований (метеорологические и дорожные условия, характеристика режимов движения, уклон дороги) выбирались в соответствии с требованиями ГОСТ Р 58137-2018 [12]. Для испытания большегрузных автомобилей-самосвалов марок БелАЗ-7540В, HOWO-ZZ3257N3847N1 и SHACMAN-SX3256DR384 выбраны маршруты с длинами плеч 4500, 5500 и 6000 м, максимальным уклоном, равным 6 %, на высотах над уровнем моря от 1000 до 1250 м и коэффициентом сцепления на отдельных участках маршрута 0,5 ... 0,6 (для сухой грунтовой дороги) [13, 14].

Каждый опыт по определению топливно-экономических показателей автомобилей-самосвалов марок БелАЗ-7540В, HOWO-ZZ3257N3847N1 и SHACMAN-SX3256DR384 проводился в трехкратной последовательности на каждом из маршрутов движения, средние значения результатов испытаний при движении автомобилей с грузом, без груза, а также результаты расчетов путевого расхода топлива, определенные по формулам (4), (5) сведены в табл. 1 и 2. Средние значения результатов испытаний за одну езду автомобилей-самосвалов марок БелАЗ-7540В, HOWO-ZZ3257N3847N1 и SHACMAN-SX3256DR384, а также результаты расчетов путевого расхода топлива, определенные по формуле (6) сведены соответственно в табл. 3, 4 и 5.

Таблица 1

Результаты испытаний автомобилей-самосвалов на топливную экономичность при движении с грузом в горных условиях

№	Марка самосвального автомобиля	Снаряженная масса автомобиля, т		Фактический расход топлива, л	Высота над уровнем моря, м	Плечо перевозки, км	Время движения с грузом, мин	Средний уклон дороги, %	Время погрузки, мин	Фактическая скорость движения автомобиля, км/ч	Норма путевого расхода топлива, л/(100 км)	Фактический путевой расход топлива, л/(100 км)	Расчетное значение путевого расхода топлива, л/(100 км)	δ, %	Фактический транспортный расход топлива, л/(100 т км)
		Снаряженная масса	Масса груза, т												
1	БелАЗ-7540В	22,9	30,5	10,1	1180	4,5	26	0,60	5,0	10,4	132,5	224,4	220,8	1,6	7,4
2	БелАЗ-7540В	22,9	30,0	12,3	1100	5,5	30	0,58	5,5	11,0	132,5	223,6	218,7	2,2	7,4

Продолжение табл. 1

**Результаты испытаний автомобилей-самосвалов
на топливную экономичность при движении с грузом в горных условиях**

№	Марка самосвального автомобиля	Снаряженная масса автомобиля, т		Фактический расход топлива, л	Высота над уровнем моря, м	Плечо перевозки, км	Время движения с грузом, мин	Средний уклон дороги, %	Время погрузки, мин	Фактическая скорость движения автомобиля, км/ч	Норма путевого расхода топлива, л/(100 км)	Фактический путевой расход топлива, л/(100 км)	Расчетное значение путевого расхода топлива, л/(100 км)	δ, %	Фактический транспортный расход топлива, л/(100 т км)
		Масса груза, т													
3	БелАЗ-7540В	22,9	28,8	12,9	1120	6,0	32	0,63	5,0	11,25	132,5	215,0	218,1	1,4	7,5
4	HOWO-ZZ3257N3847N1	15,2	19,4	6,0	1180	4,5	13	0,60	4,5	20,8	75*	133,3	128,2	3,2	6,9
5	HOWO-ZZ3257N3847N1	15,2	22,2	7,4	1100	5,5	18	0,58	5,5	18,3	75*	134,5	131,6	2,2	6,1
6	HOWO-ZZ3257N3847N1	15,2	21,3	8,0	1120	6,0	20	0,63	5,0	18,0	75*	133,3	131,0	1,8	6,3
7	SHACMAN-SX3256DR384	14,1	26,4	6,8	1180	4,5	19	0,60	4,5	14,2	81*	151,1	146,6	3,1	5,7
8	SHACMAN-SX3256DR384	14,1	25,2	8,1	1100	5,5	22	0,58	4,0	15,0	81*	147,3	144,0	2,3	5,8
9	SHACMAN-SX3256DR384	14,1	24,7	8,9	1120	6,0	23	0,63	4,0	15,6	81*	148,3	144,0	3,0	6,0

* – норма путевого расхода топлива определена расчетным путем

Таблица 2

**Результаты испытаний автомобилей-самосвалов
на топливную экономичность при движении без груза в горных условиях**

№	Марка самосвального автомобиля	Снаряженная масса автомобиля, т	Фактический расход топлива, л	Высота над уровнем моря, м	Плечо перевозки, км	Время движения без груза, мин	Средний уклон дороги, %	Фактическая скорость движения автомобиля, км/ч	Норма путевого расхода топлива, л/(100 км)	Фактический путевой расход топлива, л/(100 км)	Расчетное значение путевого расхода топлива, л/(100 км)	δ, %
2	БелАЗ-7540В	22,9	8,2	1100	5,5	16	- 0,58	20,6	132,5	149,1	150,6	1,0

Продолжение табл. 2

**Результаты испытаний автомобилей-самосвалов
на топливную экономичность при движении без груза в горных условиях**

№	Марка самосвального автомобиля	Снаряженная масса автомобиля, т	Фактический расход топлива, л	Высота над уровнем моря, м	Плечо перевозки, км	Время движения без груза, мин	Средний уклон дороги, %	Фактическая скорость движения автомобиля, км/ч	Норма путевого расхода топлива, л/(100 км)	Фактический путевой расход топлива, л/(100 км)	Расчетное значение путевого расхода топлива, л/(100 км)	δ, %
3	БелАЗ-7540В	22,9	9,2	1120	6,0	18	-0,63	20,0	132,5	153,3	149,9	2,3
4	HOWO-ZZ3257N3847N1	15,2	3,9	1180	4,5	7	-0,60	25,9	75*	86,7	85,6	1,3
5	HOWO-ZZ3257N3847N1	15,2	4,8	1100	5,5	10	-0,58	30,3	75*	87,3	85,3	2,3
6	HOWO-ZZ3257N3847N1	15,2	5,2	1120	6,0	12	-0,63	30,0	75*	88,3	84,8	4,1
7	SHACMAN-SX3256DR384	14,1	4,2	1180	4,5	10	-0,60	27,0	81*	93,3	92,4	1,0
8	SHACMAN-SX3256DR384	14,1	5,2	1100	5,5	11	-0,58	30,0	81*	94,5	92,1	2,6
9	SHACMAN-SX3256DR384	14,1	5,6	1120	6,0	12	-0,63	30,0	81*	93,3	91,6	1,8

Таблица 3

Результаты испытаний на топливную экономичность автомобиля БелА-37540В за одну поездку в горных условиях (базовая норма путевого расхода топлива 132,5 л / (100 км) при снаряженной массе 22,9 т.)

№	Масса груза, т	Высота над уровнем моря, м	Плечо перевозки, км	Время движения за езду, мин	Общее время погрузки и выгрузки, мин	Средняя скорость движения автомобиля за езду, км/ч	Фактический расход топлива заездку, л	Фактический путевой расход топлива за езду, л/(100 км)	Расчетное значение путевого расхода топлива за езду, л/(100 км)	δ, %	Фактический транспортный расход топлива за езду, л/(100 т км)
1	30,5	1180	4,5	48	8,0	11,2	16,8	186,7	186,0	0,4	6,1
2	30,0	1100	5,5	55	9,0	12,0	20,5	186,4	185,3	0,6	6,1
3	28,8	1120	6,0	68	8,0	10,6	22,1	184,2	184,0	0,1	6,4
Ср.	29,8	1150	5,3	57	8,3	11,3	19,8	185,8	185,1	0,4	6,2

Таблица 4

**Результаты испытаний на топливную экономичность
автомобиля HOWO-ZZ3257N3847N1 за одну поездку в горных условиях
(базовая норма путевого расхода топлива 75 л / (100 км)
при снаряженной массе 14,1 т.)**

№	Масса груза, т	Высота над уровнем моря, м	Плечо перевозки, км	Время движения за езду, мин	Общее время погрузки и выгрузки, мин	Средняя скорость движения автомобиля за езду, км/ч	Фактический расход топлива заездку, л	Фактический путьевой расход топлива за езду, л/(100 км)	Расчетное-значение путевого расхода топлива за езду, л/(100 км)	δ, %	Фактический транспортный расход топлива за езду, л/(100 т км)
1	19,4	1180	4,5	26	6,0	20,8	9,9	110,0	106,9	2,9	5,7
2	22,2	1100	5,5	35	7,0	18,8	12,2	110,9	108,4	2,3	5,0
3	21,3	1120	6,0	39	7,0	18,5	13,2	110,0	107,9	1,9	5,2
Ср.	20,9	1150	5,3	33,3	6,7	19,4	11,8	110,3	107,7	2,4	5,3

Таблица 5

**Результаты испытаний на топливную экономичность
автомобиля SHACMAN-SX3256DR384 за одну поездку в горных условиях
(базовая норма путевого расхода топлива 81 л / (100 км)
при снаряженной массе 15,2 т.)**

№	Масса груза, т	Высота над уровнем моря, м	Плечо перевозки, км	Время движения за езду, мин	Общее время погрузки и выгрузки, мин	Средняя скорость движения автомобиля за езду, км/ч	Фактический расход топлива заездку, л	Фактический путьевой расход топлива за езду, л/(100 км)	Расчетное-значение путевого расхода топлива за езду, л/(100 км)	δ, %	Фактический транспортный расход топлива за езду, л/(100 т км)
1	26,4	1180	4,5	36	7,0	15,0	11,0	122,2	118,9	2,8	4,6
2	25,2	1100	5,5	39	6,0	16,9	13,3	118,2	118,6	0,3	4,7
3	24,7	1120	6,0	42	7,0	17,1	14,5	120,8	117,8	2,5	5,2
Ср.	25,4	1150	5,3	39	6,7	16,3	12,9	120,4	118,4	1,7	4,8

Выводы

1. Предложены эмпирические формулы для определения путевого расхода топлива грузовыми автомобилями в условиях горных карьер.

2. Рассчитаны значения путевого расхода топлива для автомобилей-самосвалов марок БелАЗ-7540В, HOWO-ZZ3257N3847N1 и SHACMAN-SX3256DR384 для различных маршрутов их движения и в различных дорожных условиях. Результаты исследований показывают хорошую согласованность экспериментальных и теоретических данных путевого расхода топлива. Относительное расхождение между фактическим и расчетным значениями путевого расхода топлива варьируется от 0,1 до 2,9.

3. Обоснованы эффективность применения различных марок большегрузных автомобилей-самосвалов, эксплуатируемых в условиях строительства Рогунской ГЭС по фактическому значению транспортного расхода топлива. В среднем за поездку оно составляет для автомобилей-самосвалов марок БелАЗ-7540В, HOWO-ZZ3257N3847N1 и SHACMAN-SX3256DR384 составляет соответственно 6,2, 5,3 и 4,8 л / (100 т км).

4. По фактическому значению транспортного расхода топлива в условиях строительства Рогунской ГЭС, наряду с автомобилем-самосвалом марки БелАЗ-7540В, для выполнения транспортных работ в условиях горных карьеров могут быть рекомендованы также автомобили-самосвалы марок HOWO-ZZ3257N3847N1 и SHACMAN-SX3256DR384.

Библиографический список

1. **Турсунов, А.А.** Управление работоспособностью автомобилей в горных условиях эксплуатации: автореферат диссертации доктора технических наук. – Душанбе: Ирфон, 2003. – 356 с.
2. **Умирзоков, А.М.** Оценка эффективности эксплуатации автомобилей в условиях высокогорья республики Таджикистан / А.М. Умирзоков, А.А. Саибов, Б.Ж. Мажитов, А.Л. Бердиев, Ф.А. Турсунов // Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств: материалы XVIII Международной научно-практической конференции 24-25 ноября 2016. – Владимир: ВЛГУ им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, 2016. – 336 с.
3. **Токарев, А.А.** Топливная экономичность и тягово-скоростные качества автомобиля / А.А. Токарев. – М.: Машиностроение, 1982. – 224 с.
4. **Greene, David L.** How does on-road fuel economy vary with vehicle cumulative mileage and daily use? Transportation Research Part D / David L. Greene, Jun Liu, Asad J. Khattak, Behram Wali, Janet L. Hopson, Richard Goeltz // Transport and Environment. Volume 55, August 2017. – P 142-161.
5. **Конов, М.Ю.** Повышение топливной экономичности двигателя внутреннего сгорания / М.Ю. Конов // Молодой ученый. – 2017. – №24. – С. 155-159.
6. **Gaoxiang, Lou.** Impact of the dual-credit policy on improvements in fuel economy and the production of internal combustion engine vehicles / Lou Gaoxiang, Ma Haicheng, Fan Tijing, KaiChan Hing // Resources, Conservation and Recycling. Volume 156, May 2020. – 104712.
7. **Вахламов, В.К.** Автомобили. Эксплуатационные свойства / В.К. Вахламов. – М: Изд. центр «Академия», 2006. – 240 с.
8. Карьерные самосвалы БелАЗ-7540А, БелАЗ-7540В, БелАЗ-7540С, БелАЗ-7540D, БелАЗ-7540К, БелАЗ-7547, БелАЗ-75471, БелАЗ-75473 и их модификации // Руководство по ремонту 7547-3902080 РС. – Республика Беларусь: Завод, 2013. – 368 с.
9. Погода в Таджикистане /районы республиканского подчинения/ Рогун [Электронный ресурс], - режим доступа: <http://tajikistan.pogoda360.ru/603282/> (дата обращения: 19.10.2019).
10. ООО «ТехКомплектСервис» / Технические характеристики / самосвалы HOWO-ZZ3257N3847N1 и SHACMAN-SX3256DR384 [Электронный ресурс], - режим доступа: <https://tehkomservis.ru/> (дата обращения: 19.12.2019).
11. ГОСТ 20306-90. Автотранспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытания. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 34 с.
12. ГОСТ Р 58137-2018 Дороги автомобильные общего пользования. Руководство по оценке риска в течение жизненного цикла. – М.: Изд-во стандартов, 2018. – 52 с.
13. **Филькин, Н.М.** Основы теории исследования эксплуатационных свойств автомобиля / Н.М. Филькин, Р.Ф. Шаихов, И.П. Буянов. – Пермь: ФГБОУ ВО Пермская ГСХА, 2016. – 241 с.
14. **Jamous, Wael.** Assessing travel time reliability implications due to roadworks on private vehicles and public transport services in urban road networks. / Wael Jamous, Chandra Balijepalli // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). Volume 5, Issue 4, August 2018. – P. 296-308.

*Дата поступления
в редакцию: 14.03.2020*

A.M. Umirzokov¹, K.T. Mambetalin², S.S. Saydulozoda², Sh.K. Samiev³

MODELING OF FUEL CONSUMPTION BY HEAVY CARS IN MOUNTAINS OPERATING OF CONDITIONS

Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi¹

South Ural State University²

DAO «Basic Construction» OJSC Rogun HPP³

Purpose: Substantiation and estimation of road and transport fuel consumption in the construction of the heavy vehicles – dump trucks Rogun Hydroelectric Power Plant.

Construct/methodology/approach: Taking into account the main factors that form the traveling and transportation costs of fuel of heavy-duty mining dump trucks operating in difficult mountain conditions, empirical formulas are proposed, on the basis of which graphs of the fuel economy of the BelAZ-7540B car are built when driving with cargo, without cargo, and also for one trip for a particular route movement in mountain quarries.

Conclusions: The values of the ride fuel consumption for dump trucks of the BelAZ-7540B, HOWO-ZZ3257N3847N1 and SHACMAN-SX3256DR384 brands for various routes of movement. The efficiency of the use of various brands of heavy trucks dump trucks operating in the conditions of the construction of the Rogun HPP on the actual values of the transport fuel consumption is substantiated. The actual value of the transport fuel consumption during the construction of the Rogun HPP on average per ride for the BelAZ-7540B, HOWO-ZZ3257N3847N1 and SHACMAN-SX3256DR384 dump trucks is 6,2, 5,3 and 4,8 l/(100 t km), respectively.

Limitations/implications research: The relative discrepancy between the actual and estimated values of the line fuel consumption varies from 0,1 to 2,9.

Originality/value: In determining the estimated value of the traveling and transport fuel consumption, a dynamic coefficient was introduced taking into account the complexity of the operating conditions in mountain quarry roads. Research will allow according to the actual value of transport fuel consumption during the construction of the Rogun HPP along with a BelAZ-7540B dump truck, HOWO-ZZ3257N3847N1 and SHACMAN-SX3256DR384 dump trucks.

Key words: cars, fuel consumption, mountain conditions, road incline, complexity of operating conditions, dynamic coefficient, efficiency.

НАШИ АВТОРЫ

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Баландин Дмитрий Владимирович – профессор Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, д-р физ.-мат. наук;
dbalandin@yandex.ru

Дивеев Асхат Ибрагимович – профессор, главный научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, профессор Инженерной академии Российского университета дружбы народов, д-р техн. наук;
aidiveev@mail.ru

Доценко Антон Викторович – аспирант Инженерной академии Российского университета дружбы народов;
anton.dozenko@gmail.com

Елисеев Михаил Евгеньевич – доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. физ.-мат. наук;
eliseevmic@mail.ru

Елисеева Ирина Николаевна – ассистент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;
eliseevair@mail.ru

Куркин Андрей Александрович – проректор по научной работе, главный научный сотрудник Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, профессор, д-р физ.-мат. наук;
aakurkin@gmail.com

Куркина Оксана Евгеньевна – ведущий научный сотрудник, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. физ.-мат. наук;
oksana.kurkina@mail.ru

Мазунова Лариса Николаевна – ст. преподаватель НГТУ им. Р.Е. Алексеева
matematixx@mail.ru

Пелиновский Ефим Наумович – главный научный сотрудник Института прикладной физики РАН, ведущий научный сотрудник Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р физ.-мат. наук, профессор;
pelinovsky@appl.sci-nnov.ru

Спижевой Алексей Сергеевич – аспирант Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского;
alexey.spizhevoj@gmail.com

Уткина Анна Александровна – старший научный сотрудник Российского Федерального Ядерного центра «Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»;
AAUtkina@yandex.ru

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

Безносов Александр Викторович – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук;
beznosov@nnov.ru

Боков Павел Андреевич – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук;
bokow_pavel@mail.ru

Бокова Татьяна Александровна – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук;
tatabo@bk.ru

Бычков Анатолий Владимирович – руководитель группы отдела систем релейной защиты и автоматики ООО НПП «ЭКРА» (г. Чебоксары);
bychkov_av@ekra.ru

Волков Никита Сергеевич – аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;
hortmetall@yandex.ru

Дони Николай Анатольевич – директор по науке, заведующий отделом систем релейной защиты и автоматики ООО «НПП «ЭКРА», канд. техн. наук (г. Чебоксары);
doni_na@ekra.ru

Ершова Мария Игоревна – студент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;
m.aria.1@mail.ru

Крюков Леонард Тимофеевич – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук;
fam@nntu.ru

Львов Александр Вячеславович – инженер Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;
knyaz_lvov@mail.ru

Маров Александр Романович – аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;
marov_2011@mail.ru

Титов Иван Тимофеевич – магистрант Чувашского государственного университета им. И. Н. Ульянова;
titovivan966@gmail.com

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

Беляев Александр Михайлович – старший преподаватель Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;
myhome2010@mail.ru

Беляков Владимир Викторович – начальник Управления научно-исследовательских и инновационных работ Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук, профессор;
belyakov@nntu.ru

Васильев Алексей Анатольевич – ассистент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;
aleksey.vasilyev@nntu.ru

Вашурин Андрей Сергеевич – инженер Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;
Vashurin@nntu.ru

Глушков Михаил Николаевич – аспирант Вятского государственного университета (г. Киров);
mihalglushkov@mail.ru

Гнусов Максим Александрович – научный сотрудник Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова, канд. техн. наук;
mgnusov@yandex.ru

Гумеров Ирек Флорович – заместитель генерального директора ПАО «КАМАЗ» (Республика Татарстан, г. Набережные Челны), канд. техн. наук;
gumerov@kamaz.ru

Драпалюк Михаил Валентинович – ректор Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова, профессор, д-р техн. наук;
md@vglt.vrn.ru

Дручинин Денис Юрьевич – доцент Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова, канд. техн. наук;
druchinin.denis@rambler.ru

Жарков Евгений Владимирович – инженер-конструктор ООО «Объединенный инженерный центр» (г. Нижний Новгород);
zharkov_94@mail.ru

Клубничкин Владислав Евгеньевич – доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук;
vklubnichkin@mgul.ac.ru

Колесниченко Данила Артемович – студент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;
d.kolesnichenko@nntu.ru

Косицын Борис Борисович – доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук;
kositsyn_b@bmstu.ru

Котиев Георгий Олегович – профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, д-р техн. наук;

kotievgo@yandex.ru

Макаров Владимир Сергеевич – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук;

makvl2010@gmail.com

Мамбеталин Кахим Токушевич – профессор Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета) (г. Челябинск), д-р техн. наук;

kahim2010@mail.ru

Мишустов Владислав Павлович – инженер Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;

v.mishustov@nntu.ru

Молев Юрий Игоревич – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук;

moleff@yandex.ru

Прошин Дмитрий Николаевич – старший преподаватель Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;

proshdn@gmail.com

Рогов Петр Сергеевич – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук;

petr.rogov@nntu.ru

Сайдуллозада Сайвали Сайдулло – аспирант Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета) (г. Челябинск);

saivali.saidullo@mail.ru

Самиев Шохин Кунгуротович – главный механик ДАО «Основное строительство» ОАО Рогунский ГЭС (Республика Таджикистан);

samievshohin@mail.com

Синицын Евгений Александрович – студент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;

jeKa07_95@mail.ru

Стадухин Антон Алексеевич – доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук;

ant.m9@yandex.ru

Трусов Юрий Павлович – заместитель директора ЦКП «Транспортные системы» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;

trusovyury@gmail.com

Умирзоков Ахмад Маллабоевич – доцент Таджикского технического университета им. акад. М.С. Осими (г. Душанбе), канд. техн. наук;

ahmad.umirzokov@mail.ru

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО НАПИСАНИЮ РЕФЕРАТОВ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

Авторский реферат на английском языке должен быть понятен без ссылки на саму статью. Это краткое точное изложение содержания представленной к публикации статьи, отражающее предмет, цели и задачи работы, актуальность, постановку проблемы, вариант ее решения, сферу применения. Объем: не менее 10 строк (100-250 слов ~ 850 знаков). Реферат статьи может также включать краткое описание концептуальных основ и методологии работы, перспектив дальнейших исследований.

Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны воспроизводиться повторно в тексте реферата. Следует применять терминологию, характерную для иностранных специальных текстов, избегать терминов, являющихся «калькой» русскоязычных слов. Рекомендуется использование слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» (consequently, moreover, for example, the benefits of this study, as a result). Необходимо использовать активный, а не пассивный залог, т.е. «The study tested», но не «It was tested in the study».

Образец: авторское резюме из International Journal of Operations & Production Management. V. 22. N 8.

B. Meijboom, M. Houtepens

STRUCTURING INTERNATIONAL SERVICE OPERATIONS: A THEORETICAL FRAMEWORK AND A CASE STUDY IN THE IT-SECTOR

The title of organization

Purpose: The specific challenges with which companies pursuing international manufacturing strategies are faced, if their output also contains a service dimension, are addressed.

Design/methodology/approach: A theoretical framework is proposed based on three virtually complementary perspectives by integrating international production, demand, and contemporary ICT-based theory. Subsequently, an exploratory case study in a pure service environment is described that illustrates the value of the framework.

Findings: It is possible, for example, to apply the theoretical framework to case studies in internationally-operating companies delivering a mix of goods and services.

Research limitations/implications: The present study provides a starting-point for further research in the international manufacturing sector.

Originality/value: Moreover, the framework has proven to be useful in improving the European structure of the case company. This is a notable and promising side-effect of the exploratory study, at least from a managerial point of view.

Key words: multinationals, service operations, location, decision making, case studies.

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

Адрес редакции: 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, ауд. 1363-3

Телефон: 8(920)00-37-877

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 и 4–6 рисунков. 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, отражающим их авторский вклад); название статьи; место работы всех авторов (полное название организации, город); аннотацию (не менее 150 слов), ключевые слова (не менее 10).
- Изложение материала должно быть логически выстроенным. **Тематическая направленность** представленного исследования должна **строго соответствовать рубрике журнала**. 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. Рекомендуется **ограничить самоцитирование** тремя пунктами.
- Статья должна завершаться **информацией на английском языке**: инициалы и фамилии авторов, тема, названия организаций, в которых работают авторы, реферат и ключевые слова.
- К статье необходимо **приложить файл с информацией об авторах** на русском языке: ФИО (полностью), место работы, должность, ученая степень и звание, e-mail.
- Текст набирается через один интервал 12 кеглем. Сноски и примечания 10 кеглем. Поля: левое, правое и нижнее – 20 мм, верхнее – 25 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).

Образец оформления статьи:
<https://www.nntu.ru/content/nauka/zhurnal-trudy-ngtu-im-r-e-alekseeva>

**РУКОПИСИ И СОПРОВОДИТЕЛЬНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ
ПРИНИМАЮТСЯ ПО СЛЕДУЮЩИМ АДРЕСАМ:**

05.05.03 Колесные и гусеничные машины

Владимир Сергеевич Макаров: vladimir.makarov@nntu.ru

**05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации
05.13.17 Теоретические основы информатики**

Валерий Павлович Хранилов: hranilov@nntu.ru

05.14.02 Электрические станции и электроэнергетические системы

Евгений Викторович Бычков: fae_nir@nntu.ru

**05.14.03 Ядерные энергетические установки, включая проектирование,
эксплуатацию и выход из эксплуатации**

Максим Александрович Легчанов: legchanov@nntu.ru

16+

**ТРУДЫ НГТУ
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА**

№ 2 (129)

Ответственный редактор: **В.И. Казакова**
Технические редакторы: **М.В. Прохорова, А.В. Крылова**

Редакция:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.
rsl@nntu.ru
Свободная цена

Подписано в печать: 18.06.2020. Дата выхода в свет 25.06.2020. Формат 60x84 ¹/₈.
Бумага офсетная. Печать трафаретная.
Усл. печ. л. 8,00. Тираж 300 экз. Заказ .

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева.
Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

Индекс 44757
Объединенный каталог «Пресса России»

Свидетельство о регистрации
периодического печатного издания
ПИ № ФС 77-56417 от 11 декабря 2013