

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 (145)

Нижний Новгород 2024

УДК 050(06)
ББК 9я54
Т 78

Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2024. № 2 (145). – 136 с.

Выходит 4 раза в год

Журнал включен ВАК при Минобрнауки России

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

Главный редактор А.А. Куркин

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

В.П. Хранилов – ответственный секретарь рубрики
«Информатика и управление в технических и социальных системах»
М.А. Легчанов – ответственный секретарь рубрики «Ядерная энергетика и атомное машиностроение»
Ю.И. Молев – ответственный секретарь рубрики
«Машиностроение и транспорт: теория, технологии, производство»

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА

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

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ:

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

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

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

УДК 050(06)
ББК 9я54

© Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2024

**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 (145)

Nizhny Novgorod 2024

The journal is issued 4 times a year

The journal is included in HAC Ministry of Education and Science

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

Editor-in-Chief A.A. Kurkin

EDITORIAL BOARD

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

V.P. Khranilov – Executive Secretary of the Section «Informatics and Management in Technical and Social Systems»

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

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

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

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)

EDITOR AND PUBLISHER:

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

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

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

© Nizhny Novgorod State Technical University
n.a. R.E. Alekseev, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ	7
Лапутенко А.В., Твардовский А.С., Евтушенко Н.В. Установочные эксперименты для телекоммуникационных компонентов	7
Никулин Е.А. Физическое моделирование механических столкновений в Mathcad	20
Попов А.А., Косырева О.Н., Добротин С.А. Решение проблем в нахождении расширенной неопределенности результата косвенного измерения	32
Саразов А.В., Козелков А.С. Повышение точности САЕ-моделирования задач аэродинамики с использованием технологии расчета на трехмерных неструктурированных сетках с перекрытиями	43
ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ	59
Богомоллов Д.Е. , Кресов Д.Г., Григорьев С.С., Оленская Е.В. О валидационной оценке модельных подходов к описанию динамики ЯРУ	59
Полуничев В.И., Савельев А.Ю., Сосин В.М. Анализ процессов тепломассопереноса в газовой системе компенсации давления реакторных установок типа РИТМ в режиме разогрева	69
МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО	78
Аникин А.А., Карасева С.А., Молев Ю.И., Вахидов У.Ш., Беляков В.В., Макаров В.С. Экспериментальные исследования транспортно-технологической платформы с роторно-винтовым двигателем	78
Горожанкин С.А., Савенков Н.В., Золотарев О.О. Исследование энергетической эффективности рабочего процесса гибридной силовой установки автомобиля при установившемся движении	90
Исматов И.А., Акрамов Б.Н., Тиллоев К.З., Тошев М.А. Динамическое моделирование работы планетарного механизма привода гусеничного экскаватора	102
Климов А.В., Антонян А.В. Исследование работоспособности алгоритма импульсного подавления автоколебательных явлений в электромеханической системе тягового электрического привода в тяговом режиме методами имитационного моделирования	111
Шурыгин В.Ю., Орлов Л.Н., Наумов В.Н., Кулепов В.Ф., Манянин С.Е., Шурыгина М.И. Оценка влияния способа установки сидений салона автобуса на пассивную безопасность	123
НАШИ АВТОРЫ	131

CONTENTS

COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT IN TECHNICAL AND SOCIAL SYSTEMS	7
Laputenko A.V., Tvardovskii A.S., Yevtushenko N.V. Homing experiments for telecommunication components	7
Nikulin E.A. Physical modeling of mechanical collisions in MathCAD	20
Popov A.A., Kosyreva O.N., Dobrotin S.A. Solving problems in finding the expanded indirect measurement uncertainty	32
Sarazov A.V., Kozelkov A.S. Increasing accuracy of CAE modeling in aerodynamics using calculation technology on three-dimensional unstructured meshes with overlaps	43
 NUCLEAR POWER AND ATOMIC POWER ENGINEERING	 59
Bogomolov D.E., Kresov D.G., Grigoryev S.S., Olenskaya E.V. On the validation assessment of model approaches to the description of the nuclear reactor plant dynamic	59
Polunichev V.I., Savelyev A.Yu., Sokolov A.N., Sosin V.M. Analysis of heat and mass transfer processes in gas pressure compensation system of RITM type reactor installations in heating mode	69
 MECHANICAL AND TRANSPORT: THEORY, TECHNOLOGY, PRODUCTION	 78
Anikin A.A., Karaseva S.A., Molev Yu.I., Vakhidov U.Sh., Belyakov V.V., Makarov V.S. Experimental studies of transportation and technological platform with rotary-screw propulsor	78
Gorozhankin S.A., Savenkov N.V., Zolotarev O.O. Study of the energy efficiency of the working process of a hybrid vehicle power plant during steady motion	90
Ismatov I.A., Akramov B.N., Tilloev K.Z., Toshev M.A. Dynamic simulation of crawler excavator planetary drive mechanism	102
Klimov A.V., Antonyan A.V. Simulation study of performance of algorithm for pulse suppression of self-oscillating phenomena in electromechanical system of traction electric drive in traction mode	111
Shurygin V.Yu., Orlov L.N., Naumov V.N., Kulepov V.F., Manyanin S.E., Shurygina M.I. Estimation of the influence of installation method of bus interior seats for passive safety	123
 AUTHORS	 131

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

УДК 519.713

EDN: SKLBKO

УСТАНОВОЧНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ДЛЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ КОМПОНЕНТОВ

А.В. ЛапутенкоORCID: 0009-0007-7810-1732 e-mail: laputenko.av@gmail.comНациональный исследовательский Томский государственный университет
*Томск, Россия***А.С. Твардовский**ORCID: 0000-0001-7705-7214 e-mail: tvardal@mail.ruНациональный исследовательский Томский государственный университет
*Томск, Россия***Н.В. Евтушенко**ORCID: 0000-0002-4006-1161 e-mail: evtushenko@ispras.ruИнститут системного программирования им. Иванникова РАН
Москва, Россия

В статье исследуются эксперименты / последовательности для идентификации текущего состояния компонентов телекоммуникационных систем. Знание текущего состояния тестируемой системы может снизить стоимость пассивного тестирования, поскольку в ряде случаев достаточно проверить только критические свойства в данном состоянии. Для подобной идентификации используются установочные / синхронизирующие последовательности / трассы, построенные по различным формальным моделям, в качестве которых при описании компонентов современных телекоммуникационных систем широко используются расширенные и временные автоматы. Рассматривается известный подход к построению установочных последовательностей для расширенных и временных автоматов на основе соответствующих конечно-автоматных абстракций, анализируется его эффективность, исследуются свойства установочных / синхронизирующих последовательностей.

Ключевые слова: конечные автоматы, временные автоматы, расширенные автоматы, установочная / синхронизирующая последовательность, конечно-автоматная абстракция.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Лапутенко, А.В. Установочные эксперименты для телекоммуникационных компонентов / А.В. Лапутенко, А.С. Твардовский, Н.В. Евтушенко // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева. 2024. № 2. С. 7-19. EDN: SKLBKO

HOMING EXPERIMENTS FOR TELECOMMUNICATION COMPONENTS

A.V. LaputenkoORCID: 0009-0007-7810-1732 e-mail: laputenko.av@gmail.comNational Research Tomsk State University
*Tomsk, Russia***A.S. Tvardovskii**ORCID: 0000-0001-7705-7214 e-mail: tvardal@mail.ruNational Research Tomsk State University
Tomsk, Russia

N.V. Yevtushenko

ORCID: **0000-0002-4006-1161** e-mail: **evtushenko@ispras.ru**

Ivannikov Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences
Moscow, Russia

Abstract. The paper is devoted to the study of the properties of experiments or sequences for identifying the current state of components of telecommunication systems. The knowledge of the current state of a system under test can reduce the cost of passive testing, since in some cases it is sufficient to verify only critical properties in this state. The current state identification can be performed based on homing or synchronizing sequences for extended and timed finite state machines which are widely used as formal models of the components of modern telecommunication systems. The paper presents the well-known approach for deriving homing sequences for extended and timed finite state machines based on the corresponding finite state machine abstractions. We analyze the effectiveness of this approach and study the properties of the existing homing or synchronizing sequences.

Key words: finite state machines, timed finite state machines, extended finite state machines, homing / synchronizing sequence, finite state machine abstraction.

FOR CITATION: A.V. Laputenko, A.S. Tvardovskii, N.V. Yevtushenko. Homing experiments for telecommunication components. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 2. Pp. 7-19. EDN: SKLBKO

1. Введение

Установочные последовательности используются для идентификации текущего состояния тестируемой системы [1-5], в которое она переходит после подачи такой последовательности в любом состоянии, идентифицируемое по наблюдаемой реакции. Если достигнутое таким образом состояние не зависит от выходной реакции, входная последовательность называется синхронизирующей. В режиме активного тестирования исследуемая система может быть переведена в известное начальное состояние перед подачей последующих тестовых последовательностей. В процессе мониторинга наблюдение установочных трасс позволяет сократить проверку критических свойств после идентификации текущего состояния, таким образом, знание текущего состояния позволяет минимизировать затраты в режимах как активного, так и пассивного тестирования за счет проверки только критических свойств системы в известных состояниях [6-8]. В ряде случаев для описания поведения особенностей (компонентов) современных систем вместо модели классического конечного автомата используются другие модели с конечным числом состояний. Это расширенные и временные автоматы, которые позволяют, с одной стороны, детализировать поведение системы, с другой – использовать более компактные (с меньшим числом состояний и переходов) описания. Расширенный автомат [9-10] дополняется контекстными переменными, входными и выходными параметрами, а также предикатами, влияющими на выполнение переходов; значения переменных и параметров могут соответствовать критическим показателям, например, таким как объем памяти или количество подключений. Временной автомат [11-13] расширяется таймаутами и/или временными ограничениями, например, для сброса состояния в телекоммуникационных протоколах после истечения допустимого времени ожидания или для переключения в режим энергосбережения.

При решении задач идентификации состояний неклассических автоматов предлагаются различные виды конечно-автоматных абстракций. В их основе лежит идея построения классического конечного автомата, который с заданной точностью описывает поведение временного или расширенного автомата. Для расширенного автомата т.н. l -эквивалент описывает поведение автомата при подаче входных последовательностей, длина которых не превосходит l [14]. Конечно-автоматная абстракция временного автомата описывает поведение автомата на множестве временных входных последовательностей [13]. Для конечных автоматов известны достаточные и необходимые условия существования установочных последовательностей, и на базе конечно-автоматных абстракций такие условия были определены для временных автоматов [15]. В настоящее время не установлено, каким образом для расширен-

ных автоматов можно проверить наличие или отсутствие установочных последовательностей, за исключением построения полного конечно-автоматного эквивалента посредством полного моделирования расширенного автомата, если эквивалент существует [9]. В данной работе проанализирована эффективность построения установочных последовательностей для некоторых компонентов телекоммуникационных систем, поведение которых описано посредством расширенных и временных автоматов, с использованием их различных конечно-автоматных абстракций.

2. Конечные автоматы

Конечный автомат (далее – автомат) есть четверка $P = (P, I, O, h_p)$, где P, I и O – конечные непустые множества состояний, входных и выходных символов. Соответственно, $h_p \subseteq (P \times I \times O \times P)$ – отношение переходов. Кортеж (p, i, o, p') представляет переход под воздействием входного символа i из текущего состояния p в состояние p' с выходным символом o . Автомат P называется полностью определенным и детерминированным, если для каждой пары $(p, i) \in P \times I$ существует ровно одна пара $(o, p') \in O \times P$ такая, что $(p, i, o, p') \in h_p$. В данном исследовании рассматриваются только полностью определенные автоматы. Единственное исключение составляет абстракция расширенных автоматов, частичность которой будет устраняться при помощи так называемого «безразличного» состояния (состояние DNC).

Вход-выходная (IO-) последовательность $\alpha/\gamma = i_1/o_1, i_2/o_2, \dots, i_l/o_l$ существует в состоянии p_1 автомата P , если существуют переходы $(p_1, i_1, o_1, p_2), (p_2, i_2, o_2, p_3), \dots, (p_l, i_l, o_l, p_{l+1}) \in h_p$. Соответственно, l – длина последовательности α/γ , $\alpha = i_1, i_2, \dots, i_l$ – ее входная проекция, а $\gamma = o_1, o_2, \dots, o_l$ – выходная проекция последовательности.

Далее представлены некоторые определения и обозначения для расширенных и временных автоматов.

Расширенный конечный автомат (далее – расширенный автомат) дополняет классический автомат контекстными переменными, входными / выходными параметрами и предикатами (ограничениями) на переходах, определенными на множестве значений контекстных переменных и входных параметров. Формально расширенный конечный автомат S представляет собой семерку $(S, I, I_p, O, O_p, V, \lambda_S)$, где S – конечное множество состояний, I – конечное множество входных символов, I_p – конечное множество входных параметров, O – конечное множество выходных символов, O_p – конечное множество выходных параметров, V – конечное множество контекстных переменных, λ_S – конечное множество переходов между состояниями множества S .

Переход $t \in \lambda_S$ есть семерка (s, i, P, op, ip, o, s') , где:

- s и s' – начальное и конечное состояния перехода t ;
- $i \in I$ – входной символ, который может быть дополнен вектором значений входных параметров x из множества D_{inp-i} , где D_{inp-i} – множество векторов возможных значений входных параметров для входного символа i ;
- $o \in O$ – выходной символ, который может быть дополнен вектором выходных параметров y из множества D_{out-o} , где D_{out-o} – множество векторов возможных значений выходных параметров для выходного символа o ;
- $P: D_{inp-i} \times D_V \rightarrow \{\text{true}, \text{false}\}$ – предикат, где D_V – множество векторов возможных значений контекстных переменных и $i \in I$;
- $op: D_{inp-i} \times D_V \rightarrow D_{out-o}$ – функция вычисления выходных параметров, где $i \in I$ и $o \in O$;
- $ip: D_{inp-i} \times D_V \rightarrow D_V$ – функция обновления контекстных переменных, где $i \in I$.

Таким образом, когда входной символ i с вектором значений входных параметров $x = (x_1, x_2, \dots) \in D_{inp-i}$ подается в состоянии s на расширенный автомат S и вектор контекстных переменных равен $v = (v_1, v_2, \dots) \in D_V$, автомат выполняет переход (s, i, P, op, ip, o, s') тогда и

только тогда, когда $P(x, v) = \text{true}$. В этом случае S переходит в состояние s' , выдавая выходной символ o , возможно, с вектором значений выходных параметров $op(x, v) = y = (y_1, y_2, \dots) \in D_{out-o}$, и следующий вектор значений контекстных переменных есть $v' = up(x, v)$. Пара (s, v) представляет собой *конфигурацию* в расширенном автомате, (i, x) – параметризованный входной символ, (o, y) – параметризованный выходной символ.

Как уже было отмечено, в данной статье рассмотрены полностью определенные расширенные автоматы, для которых в каждой конфигурации определен переход по каждому параметризованному входному символу. Если по некоторому параметризованному входному символу переход не определен, автомат доопределяется переходом-петлей в этом состоянии со специальным выходным символом «*ignore*» или «*null*», не меняющим значения контекстных переменных. Предполагается также, что в каждом состоянии для каждого параметризованного входного символа один и только один предикат принимает значение true. Таким образом, далее рассматриваются *полностью определенные детерминированные* расширенные автоматы, которые достаточно часто используются для описания компонентов телекоммуникационных систем. Параметризованная входная (выходная) последовательность $\alpha = (i_0, x_0) \dots (i_n, x_n)$ ($\gamma = (o_0, y_0) \dots (o_n, y_n)$) представляет собой последовательность параметризованных и, возможно, непараметризованных, входных (выходных) символов. Последовательность конфигураций и переходов, которые проходит расширенный автомат при обработке параметризованной входной последовательности α в конфигурации (s, v) с соответствующей параметризованной выходной последовательностью γ , называется *трассой* tr с *IO-проекцией* α/γ . Последняя конфигурация трассы tr является *tr-преемником* конфигурации (s, v) .

Рассмотрено также построение установочных последовательностей для систем с временными аспектами (временные системы с таймаутами), поскольку в телекоммуникационных протоколах, таких как TCP, HTTPS, TFTP и др., могут быть разные временные ограничения, например, таймаут сервера обычно определяет максимальное время ожидания ответа от клиента. По истечении времени ожидания соединение разрывается. Временной автомат представляет собой пятерку $S = (S, I, O, \lambda_S, \Delta_S)$, где множества S, I и O обозначают те же объекты, что в классическом автомате, $\lambda_S \subseteq S \times I \times O \times S$ – *отношение переходов*, а Δ_S – *функция таймаута*. Функция таймаута $\Delta_S: S \rightarrow S \times (N \cup \{\infty\})$ определяет для каждого состояния допустимое время ожидания входного символа, выраженное положительным целым числом абстрактных тактов. Если $\Delta_S(s) = (s', T)$ и никакой входной символ не подается до истечения таймаута T , то автомат S переходит в состояние s' и часы «сбрасываются» в ноль. Неограниченное значение таймаута ∞ означает, что автомат может оставаться в текущем состоянии сколь угодно долго до тех пор, пока не будет подан входной символ. Переход (s, i, o, s') определяется аналогично переходу классического конечного автомата. Полностью определенные и частичные, детерминированные и недетерминированные временные автоматы определяются аналогично классическим автоматам.

Временное состояние автомата S – это пара $(s, x) \in S_T = \{(s, x) : (s, x) \in S \times \{\mathbb{R}^+ \cup 0\} \text{ и } x < T \text{ и } \Delta_S(s) = (s', T)\}$, т.е. отражает текущее состояние s и значение временной переменной x , которое может достигать значений не больше таймаута в состоянии s . Переходы между временными состояниями под действием входных символов (вход-выходное отношение переходов $io \rightarrow$) и с течением времени (временное отношение переходов $t \rightarrow$) определяются аналогично [13].

Для каждого временного состояния (s, x) и задержки $t \geq 0$, тройка $\langle (s, x), t, (s', x') \rangle \in t \rightarrow$, где (s', x') – временное состояние, достигнутое временным автоматом за время t , если входные символы не подавались. Далее такой переход обозначается как $(s, x) t \rightarrow (s', x')$. Переход $\langle (s, x), i, o, (s', 0) \rangle \in io \rightarrow$ если $(s, i, o, s') \in \lambda_S$ (или $(s, x) io \rightarrow (s', 0)$ для краткости).

Временным входным символом называется пара (i, t) , где $i \in I$ и t – неотрицательное действительное число; временной входной символ (i, t) означает, что входной символ i подается на автомат в момент времени $t \geq 0$, отсчитываемый от некоторого начального момента

времени. Последовательность временных входных символов $\alpha = (i_0, t_0) \dots (i_n, t_n)$, $t_0 < \dots < t_n$, представляет собой *временную входную последовательность*; соответствующая выходная последовательность во временном состоянии (s, x) определяется итеративно по указанным выше правилам. Последовательность состояний и переходов, которые проходит автомат при подаче временной входной последовательности α во временном состоянии $(s, 0)$ с соответствующей выходной последовательностью γ , представляет собой трассу tr с временной *IO*-проекцией α/γ [15]. Финальное временное состояние трассы tr является *tr*-преемником.

3. Установочные последовательности

Для классических полностью определенных автоматов установочной называют входную последовательность, определяющую состояние исследуемого автомата после ее подачи и наблюдения выходной последовательности, независимо от состояния, в котором она подается. Для полностью определенного автомата установочная последовательность может быть получена с использованием соответствующего усеченного дерева преемников [1]. Установочная последовательность называется *синхронизирующей*, если достигнутое состояние не зависит от выходной последовательности.

Ниже рассматриваются понятия установочной последовательности и соответствующие подходы к ее построению для расширенных и временных автоматов.

3.1. Построение установочной последовательности для расширенного автомата

Для расширенного автомата S (параметризованная) вход-выходная последовательность α/γ называется *c-установочной*, если для каждой пары трасс tr_1 и tr_2 в конфигурациях (s_1, v_1) , (s_2, v_2) с одной и той же *IO*-проекцией α/γ , tr_1 -преемник (s_1, v_1) и tr_2 -преемник (s_2, v_2) совпадают. Параметризованная входная последовательность α является *c-установочной* для расширенного автомата S , если в любой конфигурации α порождает только трассы с *c-установочными IO*-проекциями. Параметризованная вход-выходная последовательность α/γ называется *s-установочной* для S , если для каждой пары трасс tr_1 и tr_2 в конфигурациях (s_1, v_1) , (s_2, v_2) с одной и той же *IO*-проекцией α/γ , состояния в tr_1 -преемнике (s_1, v_1) и tr_2 -преемнике (s_2, v_2) совпадают. Параметризованная входная последовательность α является *s-установочной* для расширенного автомата S , если α порождает только трассы с *s-установочными IO*-проекциями. Таким образом, *c-установочные* последовательности позволяют идентифицировать конфигурацию расширенного автомата, в то время как *s-установочные* определяют только состояние.

Для построения установочных последовательностей использована конечно-автоматная абстракция, частично моделирующая расширенный автомат. Состояния конечно-автоматной абстракции представляют собой конфигурации, в то время как входной (выходной) алфавит расширяется за счет векторов значений выходных (выходных) параметров. Если такую автоматную абстракцию невозможно построить из-за бесконечного или слишком большого набора конфигураций (или параметризованных входных символов), можно использовать *l*-эквивалент расширенного автомата, описывающий поведение автомата в начальной конфигурации для всех входных последовательностей длины, не превышающей *l* [14]. В этом случае рассматриваемая модель представляет собой инициальный автомат, где состояниями *l*-эквивалента являются конфигурации расширенного автомата, достигаемые при подаче последовательности длины не больше *l* из заданной начальной конфигурации. Начальная конфигурация для построения *l*-эквивалента выбирается исходя из семантики системы; для телекоммуникационных систем это обычно предусмотрено спецификацией. Для расширенного автомата $S = (S, I, I_p, O, O_p, V, \lambda_S)$ с начальной конфигурацией (s_0, v_0) , *l*-эквивалент $A_S(l)$ есть автомат (S_A, I_A, O_A, h_{SA}) , где $S_A \subseteq S \times D_V$, $I_A \subseteq \{i \times D_{inp-i} : i \in I\}$, $O_A \subseteq \{o \times D_{inp-o} : o \in O\}$. Для состояния $(s, v) \in S_A$ автомата $A_S(l)$ в *l*-эквиваленте существует переход $((s, v), (i, x), (o, y), (s', v'))$, если в расширенном автомате существует переход

$(s, i, P, op, up, o, s') \in \lambda_S$, где $P(v, x) = true$, $op(v, x) = y$, $up(v, x) = v'$. l -эквивалент *полностью определенного* детерминированного расширенного автомата S может быть частичным, если существует переход в некоторую конфигурацию S , недостижимую в l -эквиваленте. В таком случае неопределенные переходы рассматриваются как переходы в специальное DNC-состояние со специальным выходным символом *null*. В состоянии DNC определены петлевые переходы по всем входным символам с выходным символом *null*. Конечно-автоматной абстракцией (*полным l -эквивалентом*) называется l -эквивалент расширенного автомата, который совпадает с $(l+1)$ -эквивалентом, если такой l -эквивалент существует.

При построении установочной последовательности все l -эквиваленты и конечно-автоматная абстракция, если она существует, рассматриваются как неинициальные автоматы, и установочная последовательность для расширенного автомата может быть построена с использованием таких абстракций, если состояние DNC не достигается в дереве преемников и, соответственно, ни одна индуцированная установочной последовательностью трасса не достигает состояния DNC. Построены установочные последовательности для расширенного автомата: параметризованная установочная последовательность (если она существует) строится на основе усеченного дерева преемников для l -эквивалента расширенного автомата. Входная последовательность α l -эквивалента называется *l -ограниченной установочной последовательностью* для расширенного автомата, если она является установочной последовательностью для l -эквивалента, в множество начальных состояний (т. е. состояний, формирующих корень дерева преемников) которого не входит DNC. По определению, в любом состоянии, не совпадающем с DNC, любая индуцируемая α трасса не переводит l -эквивалент в состояние DNC и обладает установочной *IO*-проекцией. Может оказаться, что для l -эквивалента установочная последовательность не существует, но существует для $(l+1)$ -эквивалента, и возникает вопрос, можно ли определить значение l , которого достаточно для построения установочной последовательности, если такая последовательность существует.

Утверждение. Пусть S – расширенный автомат, в котором контекстные переменные и входные параметры принимают значения из конечных множеств, и $A_S(l)$ – его конечно-автоматная абстракция (полный l -эквивалент). Входная (возможно, параметризованная) последовательность α является s -установочной последовательностью для S , если и только если она является установочной для $A_S(l)$.

Действительно, если переменные и входные параметры принимают значения из конечных множеств, расширенный автомат вырождается в классический конечный и может быть полностью описан полным l -эквивалентом. По определению, в этом случае l -ограниченная установочная последовательность есть s -установочная последовательность. По определению, s -установочная последовательность для S является s -установочной последовательностью для S . Обратное, в общем случае, неверно. Отметим также, что если l -эквивалент $A_S(l)$ не является полным, то его состояния не отражают всех конфигураций расширенного автомата S и, соответственно, справедливы следующие замечания:

- 1) l -ограниченная установочная последовательность, построенная по l -эквиваленту $A_S(l)$, не является, в общем случае, s -(s -)установочной для расширенного автомата S ;
- 2) s -(s -)установочная последовательность расширенного автомата S , не является, в общем случае, l -ограниченной установочной для l -эквивалента $A_S(l)$, поскольку по этой последовательности в $A_S(l)$ может достигаться состояние DNC.

В разделе, содержащем экспериментальные результаты, проверяется, насколько часто можно построить установочную последовательность для расширенного автомата по его l -эквиваленту.

3.2. Построение установочных последовательностей для временных автоматов

Вход-выходная временная последовательность α/γ называется *установочной* для полностью определенного детерминированного временного автомата S , если для каждой пары трасс tr_1 и tr_2 во временных состояниях $(s_1, 0), (s_2, 0) \in S_T$ с одной и той же IO -проекцией α/γ , tr_1 -преемник $(s_1, 0)$ и tr_2 -преемник $(s_2, 0)$ совпадают.

Временная входная последовательность α является *установочной последовательностью* для неинициального полностью определенного детерминированного временного автомата S , если α порождает только трассы с установочными IO -проекциями. Временное состояние (s, x) временного автомата S называется *стабильным*, если таймаут в состоянии s равен бесконечности, т.е. $\Delta_S(s) = (s, \infty)$, и соответственно, временной автомат может оставаться в этом состоянии сколь угодно долго.

Установочная вход-выходная последовательность α/γ называется *стабильной* для автомата S , если для любой трассы tr во временном состоянии $(s, 0) \in S_T$ с IO -проекцией α/γ , tr -преемник $(s, 0)$ является *стабильным состоянием*. Установочная последовательность α называется *стабильной* для временного автомата S , если α порождает только трассы со стабильными установочными IO -проекциями.

Установочная последовательность (в том числе стабильная) для временного автомата с таймаутами может быть построена с использованием его конечно-автоматной абстракции [15]. Конечно-автоматная абстракция временного автомата является классическим конечным автоматом, описывающим поведение временного автомата на подмножестве входных временных последовательностей. Каждое состояние такой абстракции представляет собой пару (s, t) , где s – состояние исходного временного автомата, а t – целочисленное значение временной переменной, строго меньшее таймаута в состоянии s ; ее увеличение на один такт и переходы по таймауту моделируются специальной вход-выходной парой $1/1$. Если таймаут в состоянии s равен ∞ , то конечно-автоматная абстракция содержит только состояние $(s, 0)$ с переходом-петлей по паре $1/1$. Для детерминированного полностью определенного временного автомата конечно-автоматная абстракция является детерминированным и полностью определенным автоматом.

При построении установочной последовательности для временного автомата на первом шаге проверяется, существует ли установочная последовательность для его конечно-автоматной абстракции, построив усеченное дерево преемников. Если конечно-автоматная абстракция не обладает установочной последовательностью, то такой последовательности нет и во временном автомате. Если установочная последовательность построена для конечно-автоматной абстракции, то абстрактная установочная последовательность преобразуется во временную входную последовательность, которая является установочной для временного автомата [15]. Для синтеза стабильных установочных последовательностей на дерево преемников накладываются дополнительные ограничения, и по абстракции строится S' -установочная последовательность, переводящая временной автомат только в стабильные состояния множества S' .

4. Экспериментальные результаты для расширенных автоматов

Телекоммуникационные протоколы часто используют клиент-серверную архитектуру, где клиент отправляет запросы серверу, а сервер отвечает на запросы клиента. Сообщения запроса обычно содержат дополнительные параметры, которые влияют на ответ и изменение состояния клиента и сервера. Соответственно, для их адекватного описания используются расширенные автоматы, и в этом разделе рассмотрено построение установочных последовательностей для ряда телекоммуникационных протоколов на основе расширенных конечных автоматов.

4.1. Автоматные описания телекоммуникационных протоколов

Simple Connection Protocol (SCP) [10] представляет собой систему, которая отражает основные свойства телекоммуникационных протоколов и описывает обмен данными между клиентом и сервером при установлении соединения с определенным уровнем качества (qos). Расширенный автомат для этого протокола представлен на рис. 1.

В данной работе предполагается, что уровень качества передачи данных ограничен значениями 0, 1, 2 и, соответственно, значения входных параметров CONreq.qos и Accept.qos принадлежат множеству $\{0, 1, 2\}$. Значения выходных параметров «NONsupport.ReqQos», «connect.ReqQos» и «data_out.ReqQos» ограничены аналогичным образом. Расширенный автомат имеет 3 состояния, 5 входных, 5 выходных символов и 3 контекстные переменные ReqQos, TryCount, FinQos.

В состоянии s_1 сервер ожидает запрос на входящие соединения с заданным уровнем качества соединения (CONreq.qos) не выше 1. При появлении подходящего запроса, система переходит в состояние s_2 , в котором клиент ожидает подтверждения готовности сервера. Если соединение установлено успешно, система переходит в состояние s_3 , в котором происходит передача данных. Расширенный автомат (рис. 1) был доопределен до полностью определенного посредством введения соответствующих петель.

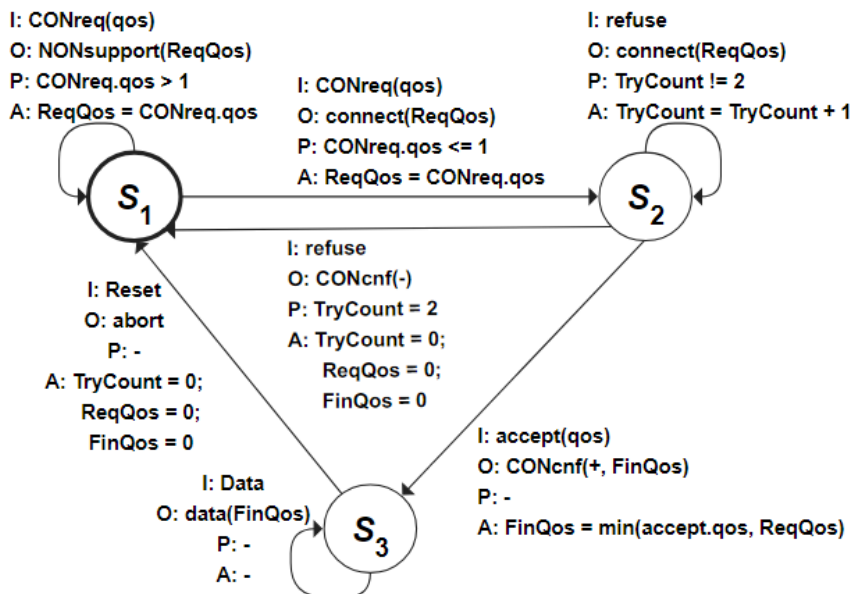


Рис. 1. Расширенный автомат для протокола SCP

Fig. 1. Extended finite state machine for SCP protocol

В ходе экспериментов были построены l -эквиваленты для l от 2 до 5, причем 5-эквивалент является конечно-автоматной абстракцией расширенного автомата на рис. 1 и имеет 17 состояний, 8 абстрактных входных и 6 выходных символов. Согласно описанию протокола, l -эквивалент строился для начальной конфигурации ($s_1, (0, 0, 0)$). Практически все построенные l -эквиваленты были частичными автоматами, и для использования программы [16] при построении установочных последовательностей неопределенные переходы были доопределены как переходы в специальное состояние DNC. Установочные последовательности, переводящие автомат в состояние DNC, в полученных результатах не учитывались. С помощью 5-эквивалента было найдено 726059 входных последовательностей длины не больше 7, являющихся s -установочными для расширенного автомата (рис. 1). Более длинные последовательности не рассматривались ввиду их большого числа. Ни один из построенных l -эквивалентов ($l < 5$) не обладал s -установочными последовательностями. Из всех

установочных последовательностей 409268 являются синхронизирующими. Также для 5-эквивалента всего было найдено 585 s -установочных последовательностей (максимальная длина последовательностей – 7), из которых 304 являются синхронизирующими.

Рассмотрим далее Trivial File Transfer Protocol [17], представляющий собой довольно простой инструмент передачи файлов между двумя узлами сети. Расширенный конечный автомат для протокола TFTP представлен на рис. 2. Чтобы упростить анализ, рассмотрим модель в которой только один файл может быть передан между узлами сети. При этом в файле может быть не более 3 блоков по 512 байт каждый.

В процессе экспериментов для расширенного автомата TFTP (рис. 2) были построены l -эквиваленты для l от 2 до 6, причем 6-эквивалент является полной конечно-автоматной абстракцией расширенного автомата на рис. 2 и имеет 9 состояний, 6 абстрактных входных и 5 выходных символов. Для 6-эквивалента было построено 468919 последовательностей длины не больше 9, являющихся s -установочными для расширенного автомата на рис. 2, из которых 157240 являются синхронизирующими. Более длинные последовательности не рассматривались ввиду их большого числа. Число всех s -установочных последовательностей составило 713 (максимальная длина последовательностей – 9), из которых 168 являются синхронизирующими. На данный момент авторы не готовы сформулировать свойства l -эквивалентов, по которым можно построить установочные последовательности для полной абстракции, и таким образом, в отличие от тестовых последовательностей [14], использование l -ограниченных установочных последовательностей представляется неэффективным при построении s -установочных последовательностей для телекоммуникационных протоколов.

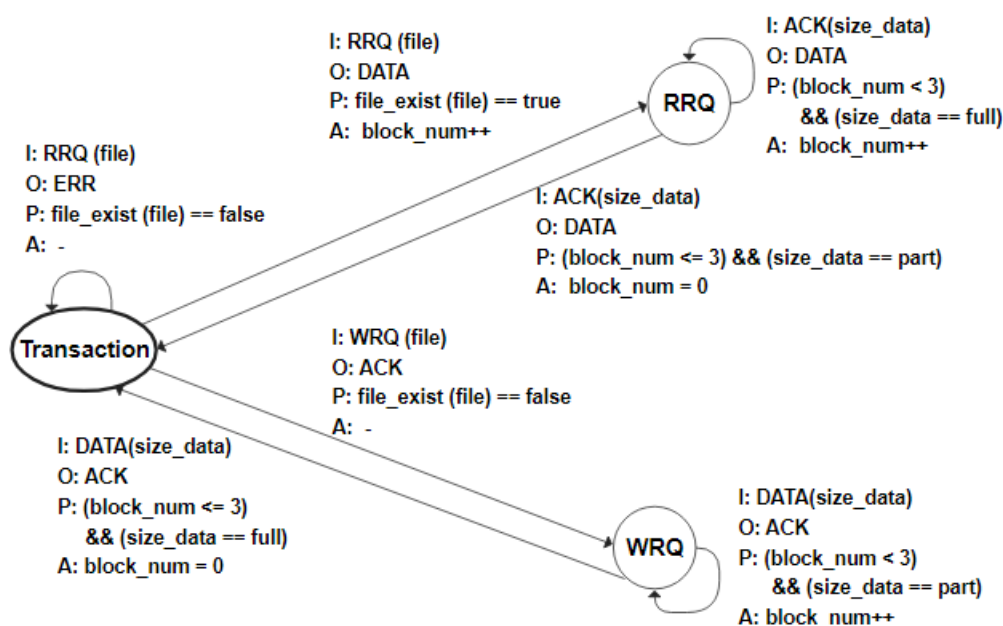


Рис. 2. Расширенный автомат для протокола TFTP

Fig. 2. Extended finite state machine for TFTP protocol

На начальном этапе (до построения l -эквивалента) неопределенные переходы в расширенном автомате доопределялись как петля в текущем состоянии с выходным символом *ignore* или *null*. Поэтому для использования этих последовательностей на практике важно, чтобы при реализации системы разработчик добавил обработку системой неопределенных в спецификации переходов как петлю по неопределенным переходам с соответствующим выходным символом.

5. Экспериментальные результаты для временных автоматов

Рассмотрим построение установочных последовательностей для временных систем с таймаутами. В телекоммуникационных протоколах (TCP, HTTPS, TFTP и т. д.) таймаут сервера часто определяет максимальное время ожидания запроса от клиента. По истечении времени ожидания соединение разрывается. Это свойство добавляет пустую установочную последовательность в соответствующий временной автомат, по которой серверная реализация сбрасывается в начальное состояние по истечении таймаута. Для автоматов с таймаутами описанного выше класса установочная последовательность может быть построена на основе конечно-автоматной проекции временного автомата, полученной путем удаления всех переходов по таймауту. Можно показать, что, если каждое состояние, кроме начального s_{in} , полностью определенного детерминированного временного автомата, имеет конечный таймаут, $\Delta(s) = (s_{in}, T)$, и таймаут в состоянии s_{in} равен ∞ , то временная входная последовательность α является *установочной* для автомата S , если и только если соответствующая абстрактная последовательность является установочной для конечно автоматной проекции автомата S . Исключением являются последовательности, во временных символах которых присутствует временная задержка $t \geq T$. Отметим, что такую проекцию можно использовать для поиска установочных последовательностей в произвольных автоматах с таймаутами, но в таком случае не гарантируется обнаружение таких последовательностей.

Временной конечный автомат для протокола TFTP представлен на рис. 3 [18]. Эта модель описывает серверную часть протокола, исходя из предположения, что каждый файл состоит из трех частей, и повторные передачи не допускаются. Временной автомат, рассмотренный в данном разделе, отличается от расширенного автомата на рис. 2, в частности, в данной модели не учитываются параметры входных символов.

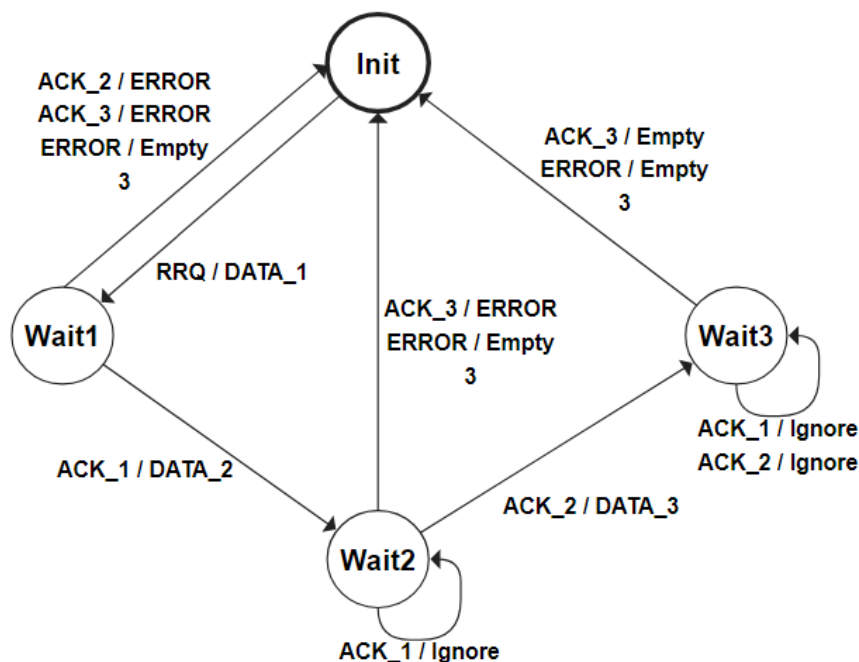


Рис. 3. Автомат с таймаутами для протокола TFTP

Fig. 3. Finite state machine with timeouts for TFTP protocol

Конечно-автоматная абстракция [19] для TFTP имеет 11 состояний, 6 входных и 7 выходных символов. Для конечно-автоматной абстракции существует стабильная установочная последовательность (1, 1, 1), в которой входной символ 1 обозначает ожидание одного такта времени. Отметим, что такая пустая установочная последовательность также является синхронизирующей. Соответственно, временной автомат обладает пустой стабильной

синхронизирующей последовательностью, поскольку из любого состояния после ожидания 3 тактов, автомат перейдет в начальное состояние, которое является стабильным. Ввиду данного свойства, остальные установочные последовательности могут быть построены по конечно-автоматной проекции временного автомата. В результате экспериментов для ТФТР была построена 1 пустая синхронизирующая / установочная последовательность, 30 временных установочных последовательностей длины 2 и 90 установочных последовательностей длины 3. Всего существует 85 стабильных установочных последовательностей и 112 синхронизирующих последовательностей длины не больше 3.

Были проведены эксперименты с моделью системы управления поездом [20]. Конечный автомат с таймаутами ($TAB = 3$, $TBC = 2$) представлен на рис. 4. Система состоит из поезда и базовой станции, которая управляет скоростью поезда в зависимости от его текущего положения, скорости и ускорения. На рисунке представлена только составляющая системы, относящаяся к управлению поездом. В исходном состоянии управление поездом отсутствует. После получения управляющего сигнала от базовой станции поезд начинает движение (состояние «Moving»). При получении сигнала *neg* поезд замедляет ход и входит в состояние согласования дальнейших параметров движения («Negotiation»). Переход из состояния «Moving» в состояние «Negotiation» возможен по таймауту TAB . При отсутствии сигналов в состоянии «Negotiation» поезд переходит в состояние «Stop», снижая скорость до 0 (таймаут TBC). После получения сигналов *control*, *neg* и *move* от базовой станции поезд набирает скорость и переходит в состояние «Negotiation» для получения дальнейших команд управления. Конечно-автоматная абстракция [19] для этой модели имеет 8 состояний, 6 входных и 4 выходных символов.

Заметим, что состояния «Start» и «Stop» являются стабильными, но, поскольку состояние «Start» не имеет входящего перехода, достаточно рассмотреть только состояние «Stop». Также, существует пустая последовательность, которая переводит систему из состояний «Moving», «Negotiation» и «Stop» в состояние «Stop» по таймаутам TAB и/или TBC и, таким образом, если известно, что система покинула начальное состояние, то пустая последовательность, соответствующая ожиданию суммы двух этих таймаутов, является стабильной синхронизирующей / установочной последовательностью.

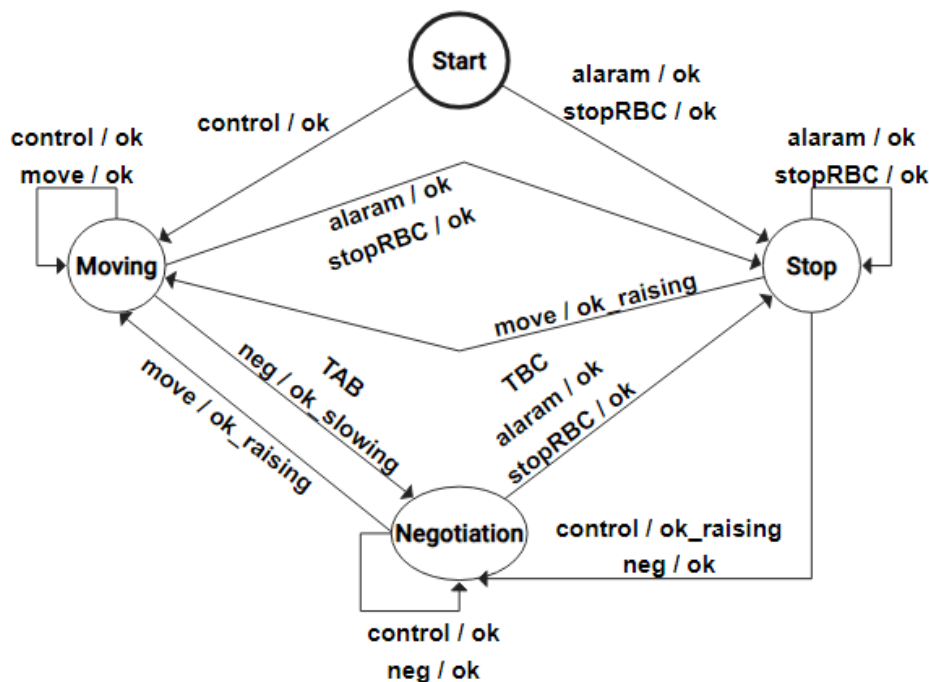


Рис. 4. Временной автомат с таймаутами для системы управления поездом

Fig. 4. Finite state machine with timeouts for a train control system

Таблица 1.
Анализ установочных последовательностей для временных систем

Table 1.
Analysis of homing sequences for timed systems

Система	НС существует	Стабильная НС существует	Пустая НС существует	Синхронизирующая последовательность существует
TFTR	ДА	ДА	ДА	ДА
Система управления поездом	ДА	НЕТ	НЕТ	ДА

Для системы управления поездом существует 14 временных установочных последовательностей длины 1 и 96 последовательностей длины 2, из которых 104 последовательности являются синхронизирующими. Пустых и стабильных установочных последовательностей нет. В табл. 1 представлены результаты по наличию / отсутствию установочных / синхронизирующих последовательностей для систем с временными аспектами.

6. Заключение

Получены экспериментальные результаты по построению установочных и синхронизирующих последовательностей для телекоммуникационных протоколов на основе расширенных и временных автоматов. Анализ существования и построение установочных и синхронизирующих последовательностей проводились на основе различных конечно-автоматных абстракций. Для всех рассмотренных систем были обнаружены короткие установочные и синхронизирующие последовательности (длина последовательности меньше числа состояний). Для систем, моделируемых расширенным автоматом с большим числом конфигураций (или комбинаций входных параметров), анализ существования установочных последовательностей проводился на основе l -эквивалентов и на данный момент не представляется достаточно эффективным. Возможно, представляет интерес использование результатов синтеза синхронизирующих последовательностей для расширенных автоматов специального вида [21]. Для временных автоматов с пустой установочной / синхронизирующей последовательностью специального вида построение абстракции и дальнейший анализ системы упрощается за счет уменьшения числа состояний абстракции, поскольку вместо конечно-автоматной абстракции достаточно рассмотреть конечно-автоматную проекцию временного автомата, т.е. проекцию, в которой удалены все переходы по таймаутам.

Работа частично поддержана проектом РНФ № 22-29-01189.

Библиографический список

1. **Gill, A.** Introduction to the theory of finite-state machines / A. Gill. – McGraw Hill, 1962.
2. **Lee, D.** Testing finite-state machines: state identification and verification / D. Lee, M. Yannakakis // IEEE Transactions on Computers. 1994. Vol. 43. № 3. Pp. 306-320.
3. **Hibbard, T. N.** Least upper bounds on minimal terminal state experiments for two classes of sequential machines // Journal of the ACM. 1961. Vol. 8. № 4. Pp. 601-612.
4. **Wang, H.-E.** Homing Sequence Derivation with Quantified Boolean Satisfiability // Testing Software and Systems Lecture Notes in Computer Science / H.-E Wang et al. – Cham: Springer International Publishing, 2017. Pp. 230-242.
5. **Sandberg, S.** Homing and Synchronizing Sequences / S. Sandberg // Model-Based Testing of Reactive Systems Lecture Notes in Computer Science. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005. Pp. 5-33.

6. **Wehbi, B.** Events-Based Security Monitoring Using MMT Tool / B. Wehbi et al. // 2012 IEEE Fifth International Conference on Software Testing, Verification and Validation. Montreal, QC, Canada: IEEE, 2012. Pp. 860-863.
7. **Lopez, J.** Behavior evaluation for trust management based on formal distributed network monitoring / J. Lopez et al. // World Wide Web. 2016. Vol. 19. N 1. Pp. 21-39.
8. **Bayse, E.** A passive testing approach based on invariants: application to the WAP / E. Bayse et al. // Computer Networks. 2005. T. 48. N 2. Pp. 247-266.
9. **Petrenko, A.** Confirming configurations in efsm testing / A. Petrenko, S. Boroday, R. Groz // IEEE Trans. Software Eng. 2004. Vol. 30. N 1. Pp. 29-42.
10. **Kushik, N.** Improving Protocol Passive Testing through «Gedanken» Experiments with Finite State Machines / N. Kushik et al. // 2016 IEEE International Conference on Software Quality, Reliability and Security (QRS). Vienna, Austria: IEEE, 2016. Pp.315-322.
11. **Krichen, M.** Conformance testing for real-time systems / M. Krichen, S. Tripakis // Form Methods Syst Des. 2009. Vol. 34. N 3. Pp. 238-304.
12. **Merayo, M. G.** Formal testing from timed finite state machines / M.G. Merayo, M. Núñez, I. Rodríguez // Computer Networks. 2008. Vol. 52. N 2. Pp.432-460.
13. **Bresolin, D.** Equivalence checking and intersection of deterministic timed finite state machines / D. Bresolin et al. // Form Methods Syst Des. 2021. Vol. 59. N 1–3. Pp. 77-102.
14. **Kushik, N.** Studying the optimal height of the EFSM equivalent for testing telecommunication protocols / N. Kushik et al. // 2nd International Conference on Advances in Computing, Communication and Information Technology CCIT 2014. Birmingham: The Institute of Research Engineers and Doctors, 2014. Pp. 159-163.
15. **Tvardovskii, A.** Deriving homing sequences for Finite State Machines with timeouts / A. Tvardovskii, N. Yevtushenko // The Computer Journal. 2023. Vol. 66. N 9. Pp. 2181–2190.
16. Home_sequence. Available at: https://mks2.cs.msu.ru/EvgeniiEM/home_sequence/-/tree/home_sequence (Accessed 01.02.2024).
17. RFC1350 – The TFTP Protocol (revision 2). Available at: <https://www.ietf.org/rfc/rfc1350.txt> (Accessed 01.02.2024).
18. **Zhigulin, M.** Detecting Faults in TFTP Implementations using Finite State Machines with Timeouts / M. Zhigulin, S. Prokopenko, M. Forostyanova // Proceedings of the Spring/Summer Young Researchers' Colloquium on Software Engineering. 2012. Pp. 115-118.
19. Deriving-FSM-Abstraction. Available at: <https://github.com/AlexTvardFSM/Deriving-FSM-Abstraction> (Accessed 01.02.2024).
20. **Janhsen, A.** Modelling and simulation of the new European train control system / A. Janhsen et al. // Proceedings of the IMACS Symposium on Mathematical Modelling. Vienna: ARGE Simulation News, Technical University Vienna, 1997. Pp. 473-478.
21. **Kushik, N.** Studying Synchronization Issues for Extended Automata / N. Kushik, N. Yevtushenko // Proceedings of the 18th International Conference on Evaluation of Novel Approaches to Software Engineering. Prague, Czech Republic: SCITEPRESS – Science and Technology Publications, 2023. Pp. 338-345.

*Дата поступления
в редакцию: 04.04.2024*

*Дата принятия
к публикации: 10.05.2024*

УДК 53.072

EDN: NQITKW

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СТОЛКНОВЕНИЙ В MATHCAD

Е.А. Никулин

ORCID: 0000-0002-2520-681X e-mail: nea@mail.nnov.ru

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

Представлены результаты теоретического исследования и компьютерного моделирования в MathCAD различных физических аспектов механического столкновения движущихся тел. Выявлены причины нежелательных эффектов численного моделирования и предложены методы их устранения. Обоснована необходимость и предложен метод возврата столкнувшихся тел в точку касания. Получены зависимости скоростей отскока тел от коэффициента восстановления и условие их «слипания» при абсолютно неупругом столкновении.

Ключевые слова: моделирование, механическое столкновение, коэффициент восстановления, абсолютно неупругое столкновение, MathCAD.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Никулин, Е.А. Физическое моделирование механических столкновений в MathCAD // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2024. № 2. С. 20-31. EDN: NQITKW

PHYSICAL MODELING OF MECHANICAL COLLISIONS IN MATHCAD

Е.А. Nikulin

ORCID: 0000-0002-2520-681X e-mail: nea@mail.nnov.ru

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

Abstract. The paper presents a study of various physical aspects of the mechanical collision of moving bodies. The computer simulation was carried out using MathCAD. The causes of the undesirable effects of numerical simulation are explained and methods for their elimination are proposed. The necessity is substantiated and A method for returning the colliding bodies to the point of contact is proposed. The dependences of the rebound velocities of bodies on the coefficient of restitution and the condition for «sticking» of bodies in a perfectly inelastic collision are obtained.

Key words: simulation, collisions, coefficient of restitution, perfectly inelastic collision, MathCAD.

FOR CITATION: Nikulin E.A. Physical modeling of mechanical collisions in MathCAD. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 2. Pp. 20-31. EDN: NQITKW

Введение

Настоящая работа посвящена физическому моделированию движения двух круглых тел на основе результатов проведенного ранее исследования особенностей их столкновений [1]. В рамках компьютерного решения задачи разрабатываются алгоритмы и программы численного расчета состояния движущихся тел на заданном интервале времени $t \in [0, T]$, обнаружения их столкновений и формирования отскоков в зависимости от коэффициента восстановления $k_b \in [0, 1]$.

В отличие от природных явлений и процессов, протекающих в непрерывном времени, компьютерное моделирование рассчитывает состояния объектов в дискретные отсчеты времени $t_k = k \cdot \Delta$ с номерами $k = 0 \dots K$ и шагом (квантом) длиной $\Delta = T/K$, полагая на k -ом шаге между отсчетами t_{k-1} и t_k постоянство некоторых физических переменных в зависимости от принятой схемы расчета процесса, например, ускорения $a_{k-1} = \text{const} \quad \forall t \in [t_{k-1}, t_k)$ в схеме Эй-

лера 2-го порядка. Дискретность порождает ряд эффектов квантования, отсутствующих в реальности. К ним относится, например, «проскок» столкнувшихся тел сквозь точку соприкосновения, что вынуждает возвращать тела в эту точку, иначе при анимации в момент t_k тела частично проникнут друг в друга, возможен вариант, что при больших скоростях они пролетят друг через друга без отскока. В данном исследовании внимание будет фиксироваться на подобных недопустимых эффектах, также будут предложены алгоритмические меры их предотвращения.

Программная реализация физического моделирования движения выполнена в пакете программы MathCAD, набирающей популярность благодаря компактности записи формул максимально близко к естественному математическому языку, простоте построения всех видов графиков и способности к символьным вычислениям [2].

Алгоритм моделирования движения с ударами

Разработаем алгоритм расчета траектории движения отдельно взятого тела сцены со следующими исходными данными:

- начальными (в момент времени $t_0=0$) векторами положения его центра c_0 и скорости v_0 , массой m , коэффициентом восстановления k_b и направленным вниз вектором ускорения свободного падения $g(0, -9.807)$;
- временем моделирования T и квантом времени Δ , по которым рассчитывается округленное в большую сторону целое число шагов $K = \lceil T/\Delta \rceil$;
- формулами расчета суммы сил F_k , действующих на тело в каждый момент времени t_k ;
- для иллюстрации эффекта проскока введем флаг касания kas , отключающий при задании $kas=0$ возврат столкнувшегося тела в точку касания с другим телом.

Требуется получить последовательность состояний $c_1 \div c_K$ и при необходимости других физических величин, например, скоростей $v_1 \div v_K$. Ввиду невозможности воспроизвести здесь видео-анимацию сцены построить график траектории движения центра $c_0 \rightarrow c_1 \rightarrow \dots \rightarrow c_K$.

На k -ом шаге цикла $k=1..K$ выполняются следующие действия:

- 1) вычисляется вектор ускорения тела $a_{k-1} = F_{k-1}/m$, полагаемого кусочно-постоянным на всем интервале времени $\forall t \in [t_{k-1}, t_k)$; вследствие этого допущения скорость $v(t)$ и перемещение $c(t)$ будут на этом интервале изменяться линейно и квадратично, достигнув в конце интервала следующих значений:

$$v_k = v_{k-1} + a_{k-1} \cdot \Delta, \quad c_k = c_{k-1} + v_{k-1} \cdot \Delta + a_{k-1} \cdot \Delta^2 / 2 = c_{k-1} + (v_{k-1} + v_k) \cdot \Delta / 2 \quad (1)$$

(сопряжение кусочно-параболических сегментов $c(t)$ обеспечивает непрерывность (отсутствие разрывов) полной траектории переходного процесса, а в точках сопряжения кусочно-линейных сегментов скорости $v(t)$ траектория движения тела будет гладкой (без изломов);

- 2) выполняется проверка столкновения данного тела с другими телами сцены по критерию неположительности ближайших расстояний между ними (проверка на строго нулевые расстояния чревата проскоками точек касания из-за дискретного характера расчета движения).

В случае положительного исхода теста выполняются:

- при $kas \neq 0$ возврат центра тела в обновленную точку c_k методом интерполяции между точками c_{k-1} и c_k из (1), а также обновление вектора v_k скорости тела в начале удара интерполяцией между векторами v_{k-1} и v_k из (1);
- расчет нового вектора v_k скорости отскока тела в конце удара методом, рассмотренным в [1].

По окончании цикла алгоритм возвращает массивы векторов состояний $c_0 \div c_K$ и скоростей $v_0 \div v_K$, по которым строятся желаемые графики. Для получения анимации движения тела

по вычисленной траектории создается и проигрывается поток кадров $FRAME \in [0, K]$, на которых изображаются полная траектория в виде цепочки точек $c_0 c_1 \dots c_K$. По ним перемещается изображение тела, центр которого на кадре $f = FRAME$ находится в точке c_f .

Рассмотрим подробнее методы решения задач, представленных в алгоритме.

Обнаружение столкновений

Поскольку обнаружить *точное* соприкосновение движущихся тел практически невозможно из-за дискретности компьютерного моделирования, рассмотрим устройство тестов столкновения двух тел следующих типов (рис. 1).

1. Шар с радиусом r и центром c с неподвижной плоской поверхностью, проходящей через точку o перпендикулярно вектору нормали N (рис. 1а). Используя определенную в [3] нормальную модель плоскости в виде неявного уравнения $(p-o) \cdot N = 0$, составим функцию $dist(o, N, c) = (c-o) \cdot \bar{N}$ (здесь и далее знак умножения « \cdot » векторов означает их скалярное произведение, а $\bar{N} = N/|N|$ – нормированный вектор N), возвращающую алгебраическое (со знаком) расстояние от точки c до плоскости $\{o, N\}$. Вычислив на k -ом шаге потенциально дальнее $d = dist(o, N, c_{k-1})$ и ближнее $b = dist(o, N, c_k)$ расстояния между точками $\{c_{k-1}, c_k\}$ и плоскостью, составим *тест столкновения* в виде логической формулы

$$(d > r) \wedge (b \leq r), \quad (2)$$

где в начале k -го шага шар еще не долетел до плоскости, а в конце шага коснулся либо пересек ее. Тест сработает даже при $b < -r$, когда из-за большой скорости центр шара в момент t_k окажется с обратной стороны плоскости дальше радиуса r . Необходимо отметить, что для получения $d > 0$ вектор N из двух возможных направлений всегда должен смотреть в сторону точки c_{k-1} , поэтому на каждом шаге перед тестом (2) нужно вычислить пробные значения $\{d, b\}$ и при $d < 0$ инвертировать вектор N и числа d и b .

2. Два шара с радиусами $\{r_1, r_2\}$ и центрами $\{c_1, c_2\}$ (рис. 1б). Вычислим на k -ом шаге расстояния между центрами шаров в его начале $d = |c_{1k-1} - c_{2k-1}|$ и в конце $b = |c_{1k} - c_{2k}|$. После принятия значения $r = r_1 + r_2$ тест столкновения шаров (2) теперь означает, что в начале k -го шага шары еще не столкнулись, а в конце шага уже коснулись, либо пересеклись.

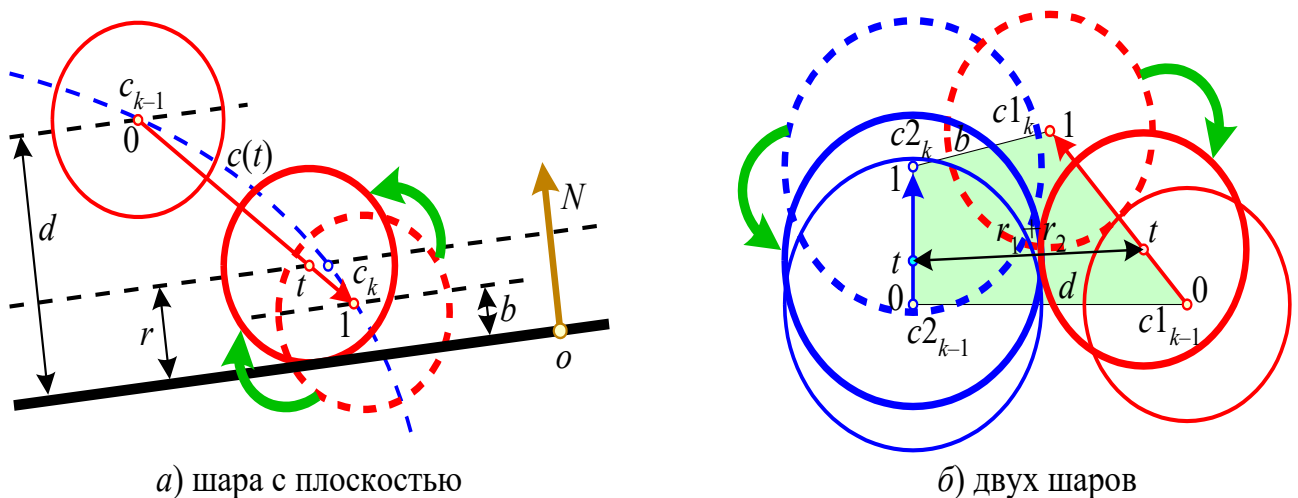


Рис. 1. Столкновение тел

Fig. 1. Collision of bodies

Возврат тел в точку касания

В рамках схемы Эйлера 2-го порядка (1) точка касания шара с другим телом лежит на параболическом сегменте траектории $c(t)$, и нужно найти такое значение t , при котором зазор между столкнувшимися телами будет равен нулю. Налицо актуальна задача интерполяции между точками c_{k-1} и c_k . Ограничимся *линейной* интерполяцией на отрезке $c_{k-1}c_k$, имеющем параметрическую модель $c(t)=c_{k-1}(1-t)+c_k t$ с параметром $t \in [0,1]$. Введем функцию линейной интерполяции $LI(A,B,t)=A(1-t)+Bt$ между объектами A и B на единичном интервале параметра t и основанную на ней функцию пропорционального деления отрезка AB с уровнями состояний a и b , возвращающая объект C с заданным уровнем состояния $c \in [a,b]$:

$$\text{prodel}(A, B, a, b, c) := \text{if}[a = b, B, LI[A, B, (c - a) \div (b - a)]].$$

Во избежание деления на 0 при одинаковых уровнях $a = b$ функция возвращает объект $D=B$. Снова обращаясь к рис. 1, рассмотрим методы возврата на k -ом шаге в точку касания тел, проскочивших ее из-за эффекта квантования модельного времени:

- а) шара $\{c, r\}$ с центром c и радиусом r с неподвижной плоскостью $\{o, N\}$, заданной точкой o и нормалью N ; вычислив уровни состояний $d = \text{dist}(o, N, c_{k-1})$ и $b = \text{dist}(o, N, c_k)$ точек c_{k-1} и c_k , обновим векторы центра и скорости шара в точке его касания с плоскостью:

$$t = \text{prodel}(0, 1, d, b, r), \quad c_k = LI(c_{k-1}, c_k, t), \quad v_k = LI(v_{k-1}, v_k, t); \quad (3)$$

- б) двух шаров $\{c1, r_1\}$ и $\{c2, r_2\}$ с расстояниями между их центрами в начале и конце шага $d = |c1_{k-1} - c2_{k-1}|$ и $b = |c1_k - c2_k|$; снова допуская движение центров шаров по двум отрезкам $c1_{k-1}c1_k$ и $c2_{k-1}c2_k$ с общим параметром $t = \text{prodel}(0, 1, d, b, r_1 + r_2) \in (0, 1]$, обновим векторы состояний и скоростей шаров в точке их касания с уровнем состояния $r_1 + r_2$:

$$c1_k = LI(c1_{k-1}, c1_k, t), \quad c2_k = LI(c2_{k-1}, c2_k, t), \quad v1_k = LI(v1_{k-1}, v1_k, t), \quad v2_k = LI(v2_{k-1}, v2_k, t). \quad (4)$$

Расчет скоростей отскока

В [1] проведено всестороннее исследование расчета скоростей отскока u_1 шара от плоскости и $\{u_1, u_2\}$ двух шаров друг от друга при скорректированных по (3, 4) скоростях в начале удара v_1 и v_2 (рис. 2). Решающую роль в этом динамическом процессе играют массы шаров $\{m_1, m_2\}$ и коэффициент восстановления (КВ) $k_B \in [0, 1]$ разности нормальных составляющих скоростей отскока $u_{2H} - u_{1H}$ относительно начальной разности скоростей $v_{1H} - v_{2H}$:

$$u_{2H} - u_{1H} = k_B (v_{1H} - v_{2H}). \quad (5)$$

Нормальная составляющая v_H является проекцией вектора v на вектор N и возвращается функцией $pr(v, N) = (v \cdot N)N / (N \cdot N)$, где « \cdot » – символ скалярного произведения векторов. Здесь же приведем функцию ортогонального дополнения $od(v, N) = v - pr(v, N)$, возвращающую касательную составляющую $v_K = v - v_H$ вектора v . Отметим ошибочность предлагаемой в [4, 5] формулы $k_B = (u_{2H} - u_{1H}) / (v_{1H} - v_{2H})$ из-за отсутствия операции деления векторов.

Численное значение коэффициента восстановления $k_B = \sqrt{h_{k+1} / h_k}$ можно найти в эксперименте вертикального падения шара на неподвижный горизонтальный пол (при $v_{1H} = v_1$, $v_2 = 0$ и $m_2 = \infty$ из (5) следует $u_1 = -k_B v_1$) и измерения высот соседних отскоков h_k и h_{k+1} по нижнему краю шара. У ваты $k_B = 0$, дерева $1/2$, стали $5/9$, слоновой кости $8/9$, стекла $15/16$. При столкновении тел из разных материалов логично использовать минимальный из двух КВ.

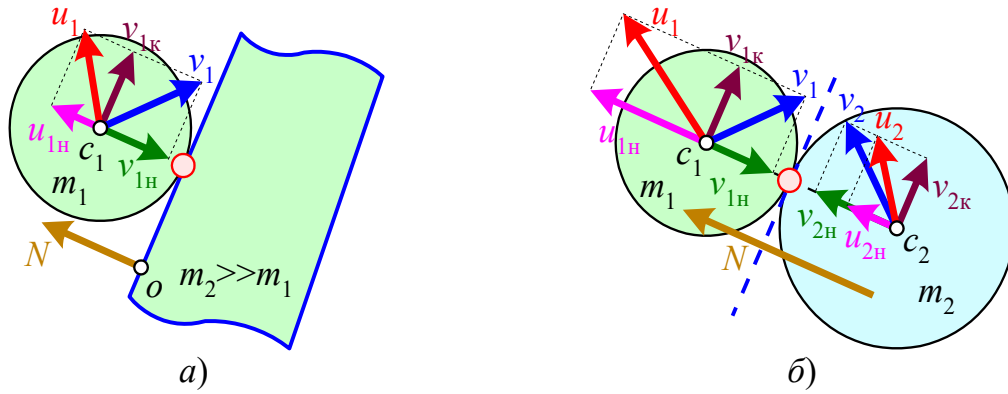


Рис. 2. Скорости отскока

Fig. 2. Rebound velocities

В [1] с помощью символьного процессора MathCAD получены общие формулы расчета скоростей отскока u_1 и u_2 двух тел, пришедших к точке касания со скоростями v_1 и v_2 :

$$u_1 = v_1 - \frac{m_2(1+k_b)(v_{1n} - v_{2n})}{m_1 + m_2}, \quad u_2 = v_2 + \frac{m_1(1+k_b)(v_{1n} - v_{2n})}{m_1 + m_2}. \tag{6}$$

В двух частных случаях, показанных на рис. 2, имеем следующие результаты.

1. При столкновении шара с неподвижной ($v_2=0$) массивной ($m_2=\infty$) стенкой

$$u_1 = v_1 - (1+k_b)pr(v, N), \quad u_2 = 0, \tag{7}$$

т.е. стена так и остается неподвижной, а шар отскакивает от нее со скоростью, зависящей от коэффициента восстановления. В одном из его крайних значений $k_b=1$ происходит абсолютно упругий отскок со скоростью $u_1 = v_1 - 2v_{1n} = v_{1k} - v_{1n}$, при которой угол падения равен углу отражения. Более сложен случай абсолютно неупругого удара с коэффициентом $k_b=0$, когда скорость отскока шара $u_1 = v_1 - v_{1n} = v_{1k}$ теряет нормальную составляющую и направлена по касательной к плоскости. Чтобы траектория дальнейшего движения шла параллельно плоскости и не «проваливалась» вниз под действием силы тяжести, ниже организуем скользящий режим (режим качения здесь не рассматривается) путем проецирования точки c_1 и вектора v_1 на касательную плоскость.

2. При столкновении двух шаров действуют общие формулы (6). Для исключения двойного расчета одинаковых фрагментов $(1+k_b)(pr(v_1, N) - pr(v_2, N))/(m_1 + m_2)$ в [1] сформирована функция, возвращающая составной вектор $[u_1 \ u_2]$ скоростей двух тел после удара:

$$\text{удар}(m1, m2, v1, v2, N, kv) := \begin{cases} w \leftarrow \frac{(1 + kv) \cdot (v1 - v2) \cdot N}{(m1 + m2) \cdot N \cdot N} \cdot N \\ (v1 - m2 \cdot w \quad v2 + m1 \cdot w) \end{cases} \tag{8}$$

Опровергнем расхожее утверждение [4-8], что при абсолютно неупругом ударе ($k_b=0$) столкнувшиеся тела будто бы «слипаются» и дальше двигаются с равными скоростями $u_1=u_2$ как единое целое массой m_1+m_2 . Сделав пробное вычитание скоростей мягкого отскока из (6)

$$u1(0) - u2(0) \text{ simplify } \rightarrow v1 - v2 - v1N + v2N,$$

видим, что они могут быть равны только при равенстве $v_{1k} = v_{2k}$ касательных составляющих начальных скоростей $v_{1k} = v_1 - v_{1n}$ и $v_{2k} = v_2 - v_{2n}$. Ниже представлена программа, иллюстрирующая этот весьма редкий случай.

В приведенных далее MathCAD-программах объекты для наглядности заданы и изображены в 2D-пространстве – шары окружностями, а плоская поверхность прямой линией.

Это несколько не сужает применимость всех используемых формул, зато делает видимыми внутренности шаров и точки их касания друг с другом и с плоскостью.

Моделирование столкновений шара с плоскостью

Первая программа моделирует отскоки шара от горизонтальной плоскости и начинается с ввода следующих исходных данных и функций:

- радиуса окружности $r=1$ и начальных значений ее центра $c_0(0,5)$ и скорости $v_0(4,1)$;
- коэффициента восстановления $k_b=0.7$;
- флага $kac \in \{0,1\}$ выполнения возврата окружности в точки касания с плоскостью;
- времени $T=4$ и кванта $\Delta=0.1$, определяющих число кадров моделирования $K=40$;
- параметров плоскости – точки $o(0,0)$ и направленного вверх вектора нормали $N(0,1)$, определяющих параметрическую модель прямой линии $p(t)=o+Vt$, вектор направления которой $V(-N_y, N_x)$ получен поворотом вектора нормали $N(N_x, N_y)$ на 90° [3];
- направленного вниз вектора ускорения свободного падения $g(0, -9.807)$;
- функции $dist(o, N, c)$ вычисления расстояния от точки c до плоскости $\{o, N\}$;
- параметрической функции $O(c, r, t)$ окружности с центром c и радиусом r .

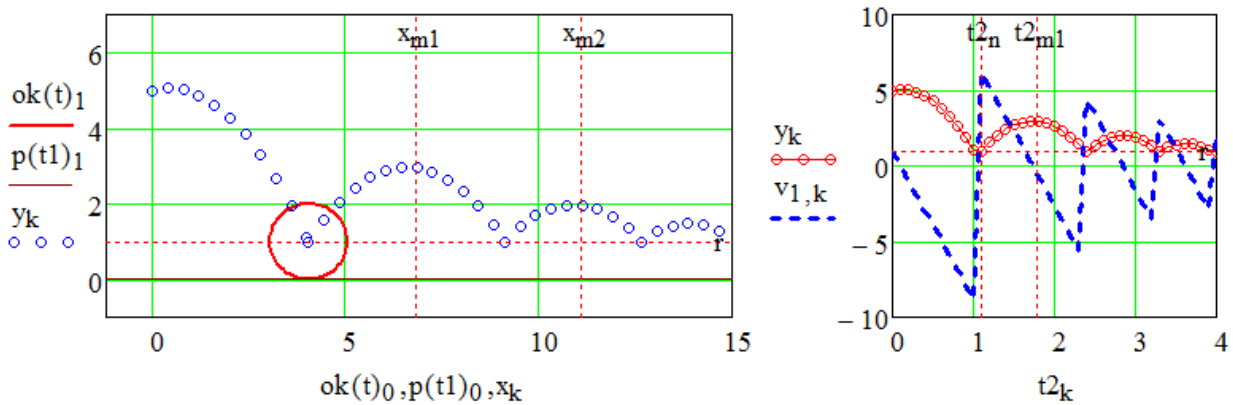
Далее следует программный блок моделирования движения тела под действием силы тяжести $F=mg$ по описанной во Введении схеме Эйлера 2-го порядка, где в цикле $k=1..K$ вычисляются векторы состояния c_k и скорости v_k , рассчитываются расстояния $\{d, b\}$ от центров шара до плоскости в начале и конце k -го шага и проверяется столкновение с ней по условию $d > r \wedge b \leq r$. При $kac \neq 0$ производится возврат шара в точку касания с обновлением по (3) векторов c_k и v_k . Если же в начале шага шар уже касается плоскости, т.е. $d=r$, то во избежание его провала под плоскость в конце шага из-за действия силы тяжести точка c_k с уровнем $b < r$ и вектор скорости v_k проецируются на плоскость касания:

$$c_k = c_k - pr(c_k - c_{k-1}, N), \quad v_k = od(v_k, N). \quad (9)$$

```
(r kv kac T Δ) := (1 0.7 1 4 0.1)      K := ceil(T ÷ Δ) → 40
(c0 v0) := [ [0] [4] ]   o1 := 0   N := stack(0, 1)
           [ [5] [1] ]   g1 := -9.807   p(t) := o + stack(-N1, N0)·t
dist(o, N, c) := (c - o)·N ÷ |N|   O(c, r, t) := c + r·stack(cos(t), sin(t))
(c v) := (c ← c0 v ← v0)
for k ∈ 1..K
  [ v<k> ← v<n←k-1> + g·Δ   c<k> ← c<n> + 0.5·(v<n> + v<k>)·Δ ]
  "Проверка столкновения"
  (d ← dist(o, N, c<n>)   b ← dist(o, N, c<k>))
  (N ← -N   d ← -d   b ← -b) if d < 0
  if b ≤ r
    if d > r
      if kac
        "Возврат в точку касания"
        t ← prodel(0, 1, d, b, r)
        (c<k> ← LI(c<n>, c<k>, t)   v<k> ← LI(v<n>, v<k>, t))
        v<k> ← v<k> - (1 + kv)·pr(v<k>, N)
    otherwise
      "Скольжение по плоскости"
      (c<k> ← c<k> - pr(c<k> - c<n>, N)   v<k> ← od(v<k>, N))
(c v)
```

Ниже показаны результаты моделирования столкновений шара с горизонтальной плоскостью, позволяющие достаточно точно программно измерить заданный коэффициент восстановления $k_b=0.7$ как по квадратному корню отношения $(y_{m2}-r)/(y_{m1}-r)=0.5$ второй высоты отскока низа шара на $m2=29$ -ом кадре к первой высоте на $m1=18$ -ом кадре, так и по прямому отношению вертикальных координат скоростей в конце и начале $n=11$ -го кадра. Переменная f равна номеру кадра $FRAME$, который можно задать вручную для фиксации центра изображаемой слева окружности в точке c_f либо, удалив ручное задание $FRAME := 11$ на желтом фоне, дать центру анимированной окружности перемещаться по точкам от c_0 до c_k , задав в панели создания анимации диапазон номеров кадров $FRAME$ от 0 до $K=40$.

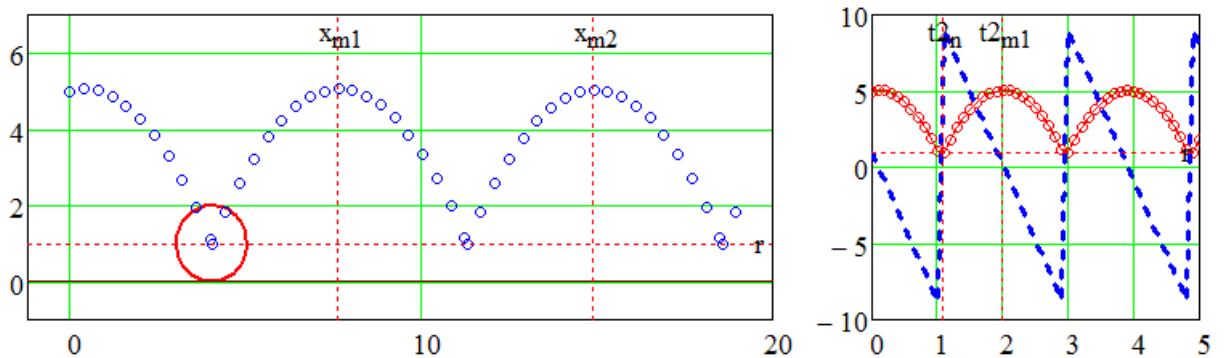
```
t := 0, 0.1..2π   FRAME := 11   f := FRAME = 11   t1 := -100..100
ok(t) := O(c<sup>f</sup>, r, t)   k := 0..K   xk := c0,k   yk := c1,k   t2k := k·Δ
NT = (0 1)   kv = 0.7   kac = 1   (n m1 m2) := (11 18 29)
```



$$\begin{pmatrix} y_{m2} \\ y_{m1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.951 \\ 2.963 \end{pmatrix} \quad \sqrt{\frac{y_{m2}-r}{y_{m1}-r}} = 0.696 \quad \begin{pmatrix} v_{1,n} \\ v_{1,n-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6.236 \\ -8.807 \end{pmatrix} \quad \frac{-v_{1,n}}{v_{1,n-1}} = 0.708$$

Отметим, что при значении $k_b < 1$ уменьшаются не только максимумы соседних отскоков, но и расстояния между ними. Следующий пример демонстрирует постоянные высоты отскоков шара и расстояния между соседними точками касаний при задании значения $k_b=1$, соответствующего абсолютно упругому удару:

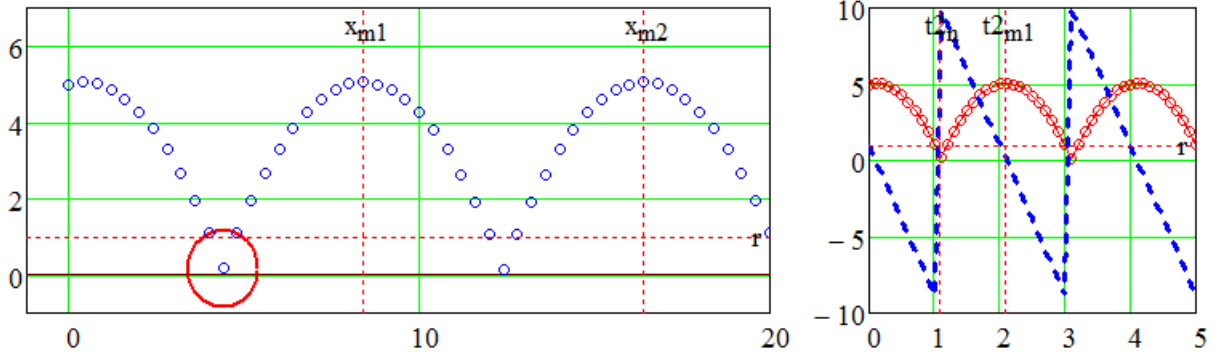
```
NT = (0 1)   kv = 1   kac = 1   (n m1 m2) := (11 20 39)
```



$$\begin{pmatrix} y_{m2} \\ y_{m1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5.04 \\ 5.046 \end{pmatrix} \quad \sqrt{\frac{y_{m2}-r}{y_{m1}-r}} = 0.999 \quad \begin{pmatrix} v_{1,n} \\ v_{1,n-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 8.909 \\ -8.807 \end{pmatrix} \quad \frac{-v_{1,n}}{v_{1,n-1}} = 1.012$$

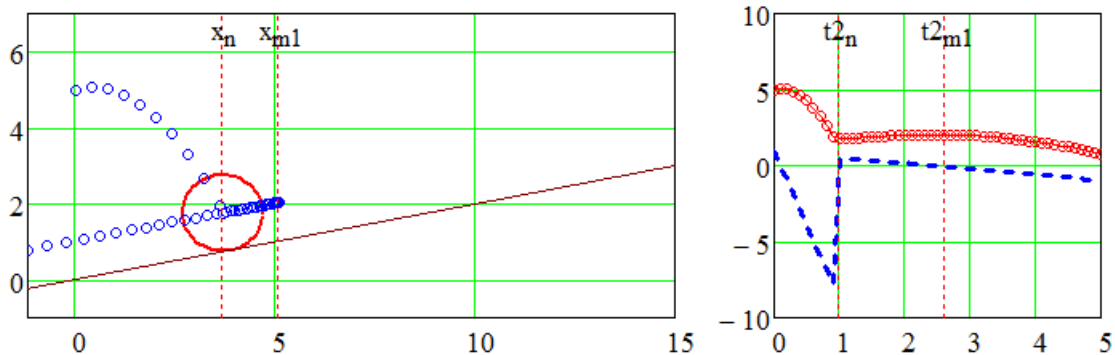
Третий пример иллюстрирует проскоки столкновений шара с плоскостью и полупогружение в нее в нижних положениях при задании флага возврата в точки касания в запрещающее значение $kac=0$. Это доказывает *обязательность выполнения операции возврата*:

$$N^T = (0 \ 1) \quad kv = 1 \quad kac = 0 \quad (n \ m1 \ m2) := (11 \ 21 \ 41)$$



Последний пример показывает траекторию абсолютно неупругих отскоков шара от наклоненной вверх плоскости с нормалью $N(-2,10)$ при коэффициенте восстановления $k_b=0$. Видно, что при первом же столкновении на $n=10$ -ом шаге скорость отскока становится параллельной плоскости. Режим параллельного скольжения поддерживается исключительно благодаря операциям проецирования (8), иначе шар безвозвратно провалится под плоскость. До $m1=26$ -го кадра его скольжение вправо является равнозамедленным до полной остановки, а далее – равноускоренным благодаря скатывающей составляющей силы тяжести.

$$N^T = (-2 \ 10) \quad kv = 0 \quad kac = 1 \quad (n \ m1 \ m2) := (10 \ 26 \ 40)$$



Моделирование столкновения двух шаров

Во второй части программы моделируется столкновение двух шаров, изображаемых окружностями. Сначала вводятся новые исходные данные (ранее введенные значения $T=4$, $\Delta=0.1$, $K=40$, $g(0, -9.807)$ и параметрическая функция окружности $O(c,r,t)$ сохраняются):

- начальные значения центров шаров $c1_0(0, -5)$, $c2_0(15,5)$ и скоростей $v1_0(0,20)$, $v2_0(-30,0)$;
- массы шаров $m_1=1$, $m_2=4$ и их радиусы $r_1=1$, $r_2=2$;
- коэффициент восстановления $k_b=1$ и флаг $kac=1$ разрешения возврата столкнувшихся окружностей в точку касания;
- коэффициент сопротивления внешней среды $k_c \geq 0$, определяющий по закону Стокса [6-8] зависимость $F_c = -k_c r v$ силы вязкого трения шара радиуса r от скорости v и при его массе m полное ускорение $a = g - k_c r v / m$. Численное значение $k_c = 1$ выбрано таким, чтобы векторы замедлений обоих шаров $a1_c(0,20)$ и $a2_c(-15,0)$ для начальных скоростей $v1_0$ и $v2_0$ были по модулям сравнимы с ускорением свободного падения $g(0, -9.807)$;

- малая величина $\varepsilon=10^{-9}$, в которую во избежание деления на $N \cdot N=0$ в (8) установятся координаты вектора нормали $N=c1_k-c2_k$ при совпадении центров шаров $c1_k$ и $c2_k$.

```

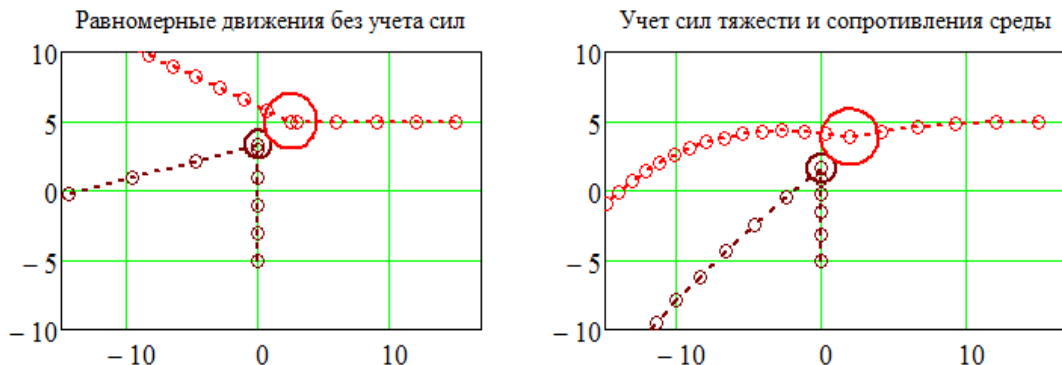
(c10 c20 v10 v20) := [ [ 0 ] [ 15 ] [ 0 ] [ -30 ] ] (m1 m2) := (1 4)
                    [ -5 ] [ 5 ] [ 20 ] [ 0 ] ] (r1 r2) := (1 2)
(kv kac) := (1 1) kc := 1. ε := 10-9 r := r1 + r2 = 3
shars(s) := (c1 ← c10 c2 ← c20 v1 ← v10 v2 ← v20 u ← -1)
            for k ∈ 1..K
                (n ← k - 1 w1 ← v1 w2 ← v2)
                [ a1 ← s · (g - kc · r1 · w1 ÷ m1) a2 ← s · (g - kc · r2 · w2 ÷ m2) ]
                (v1 ← w1 + a1 · Δ v2 ← w2 + a2 · Δ)
                [ c1(k) ← c1(n) + (v1 + w1) · Δ ÷ 2 d ← |c1(n) - c2(n)| ]
                [ c2(k) ← c2(n) + (v2 + w2) · Δ ÷ 2 b ← |c1(k) - c2(k)| ]
                "Проверка столкновения"
                if d > r ∧ b ≤ r
                    if kac
                        (t ← prodel(0, 1, d, b, r))
                        (c1(k) ← LI(c1(n), c1(k), t) c2(k) ← LI(c2(n), c2(k), t))
                        (v1 ← LI(w1, v1, t) v2 ← LI(w2, v2, t))
                        [(v1 v2) ← udar(m1, m2, v1, v2, N ← c1(u←k) - c2(k) + ε, kv)]
                        [v1u ← (pr(v1, N) od(v1, N)) v2u ← (pr(v2, N) od(v2, N))]
                (c1 c2 v1u v2u u)
    
```

Функция *shars(s)* с флажковым аргументом $s \in \{0, 1\}$, отключающим либо включающим учет сил тяжести и сопротивления внешней среды при моделировании движения шаров, возвращает матрицы их траекторий $c1=c1_0c1_1\dots c1_K$ и $c2=c2_0c2_1\dots c2_K$, матрицы нормальных и касательных составляющих векторов отскока $[v1_n v1_k]$ и $[v2_n v2_k]$, а в конце номер шага u , на котором обнаружено столкновение. Анализируя возвращенные функциями *shars(0)* и *shars(1)* значения fu и Fu , можно задать значение кадра $f=FRAME$, на котором зафиксируются положения шаров на каждом графике. Для создания анимации следует удалить ручное задание *FRAME* и ввести диапазон его изменения $[0, K]$ в окне записи анимации:

```

FRAME := 5 f := FRAME
(c1 c2 v1u v2u fu) := shars(0) o1(t) := O(c1(f), r1, t) o2(t) := O(c2(f), r2, t)
(C1 C2 V1u V2u Fu) := shars(1) O1(t) := O(C1(f), r1, t) O2(t) := O(C2(f), r2, t)

f = 5 fu = 5 (kv kac) = (1 1) (r1 r2) = (1 2) Fu = 5 f = 5
    
```



Теперь испытаем работу программы при коэффициенте восстановления $k_b=0$:

$$v1u = \begin{bmatrix} (-14.77) & (-9.23) \\ (-9.85) & (13.85) \end{bmatrix}$$

$$V1u = \begin{bmatrix} (-8.97) & (-3.94) \\ (-10.32) & (3.42) \end{bmatrix}$$

$$v2u = \begin{bmatrix} (-14.77) & (-9.23) \\ (-9.85) & (13.85) \end{bmatrix}$$

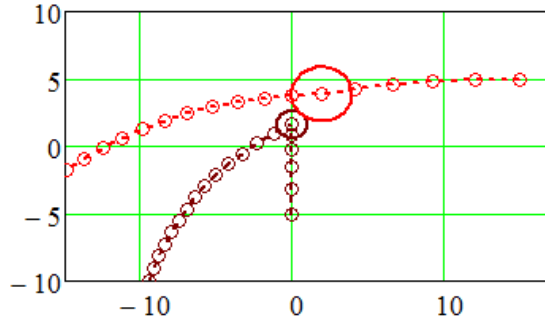
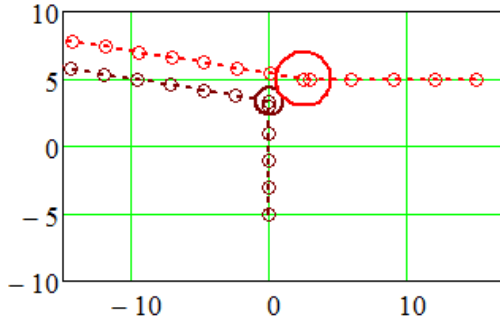
$$V2u = \begin{bmatrix} (-8.97) & (-11.12) \\ (-10.32) & (9.66) \end{bmatrix}$$

$$f = 5 \quad fu = 5 \quad (kv \quad kac) = (0 \quad 1)$$

$$(r1 \quad r2) = (1 \quad 2) \quad Fu = 5 \quad f = 5$$

Равномерные движения без учета сил

Учет сил тяжести и сопротивления среды



В соответствии с (5), на $f=5$ -ом шаге, когда обнаружены оба столкновения, получились равными нормальные составляющие скоростей отскоков $v1_n=v2_n=(-14.77, -9.85)$ и $V1_n=V2_n=(-8.97, -10.32)$, а слева (без учета сил) оказались равными еще и касательные составляющие $v1_k=v2_k=(-9.23, 13.85)$, благодаря чему оба шара, столкнувшись, летят вместе как единое целое, чего нельзя сказать о неравномерном движении шаров при учете внешних сил.

Небольшое изменение начальной скорости второго шара на $v2_0(-32,0)$ разрушает равенство касательных скоростей в момент столкновения $v1_k(-9.95, 10.98) \neq v2_k(-14.43, 15.92)$, и траектории шаров после $fu=4$ -го шага даже без учета всех сил расходятся:

$$(c10 \quad c20 \quad v10 \quad v20) = \begin{bmatrix} (0) & (15) & (0) & (-32) \\ (-5) & (5) & (20) & (0) \end{bmatrix}$$

$$v1u = \begin{bmatrix} (-12.07) & (-9.95) \\ (-10.93) & (10.98) \end{bmatrix}$$

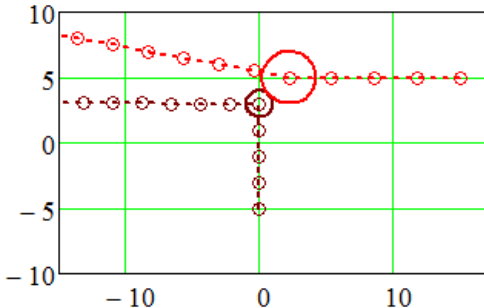
$$v2u = \begin{bmatrix} (-12.07) & (-14.43) \\ (-10.93) & (15.92) \end{bmatrix}$$

$$f = 4 \quad fu = 4 \quad (kv \quad kac) = (0 \quad 1)$$

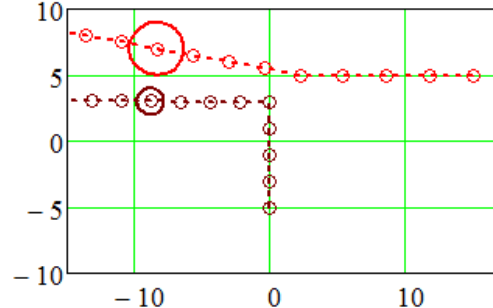
$$f = 8 \quad fu = 4 \quad (kv \quad kac) = (0 \quad 1)$$

Равномерные движения без учета сил

Равномерные движения без учета сил



⇒



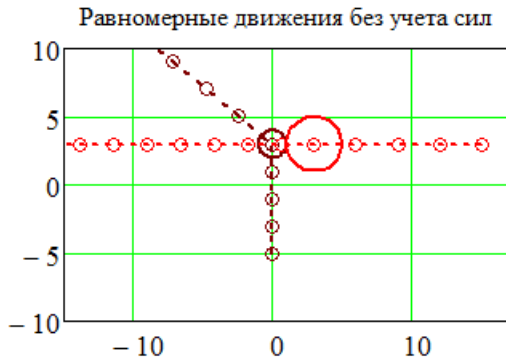
Аналогично, небольшое смещение начального положения второго шара на $c2_0(15,3)$ разрушает равенство касательных скоростей в момент столкновения $v1_k(0,20) \neq v2_k(0,0)$, и траектории шаров после него даже без учета сил расходятся, что еще раз опровергает необоснованную точку зрения о слиянии тел в одно целое после абсолютно неупругого столкновения:

$$(c10 \ c20 \ v10 \ v20) = \left[\begin{pmatrix} 0 \\ -5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 15 \\ 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 20 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -30 \\ 0 \end{pmatrix} \right]$$

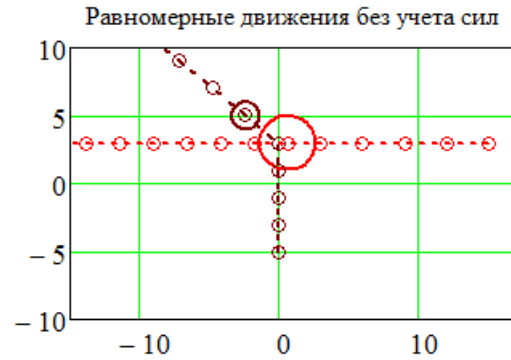
$$v1u = \left[\begin{pmatrix} -24 \\ 8 \times 10^{-9} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 6.7 \times 10^{-9} \\ 20 \end{pmatrix} \right]$$

$$v2u = \left[\begin{pmatrix} -24 \\ 8 \times 10^{-9} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \times 10^{-8} \end{pmatrix} \right]$$

$$f = 4 \quad fu = 4 \quad (kv \ kac) = (0 \ 1)$$



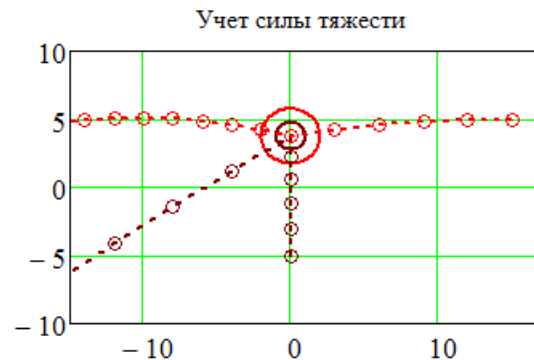
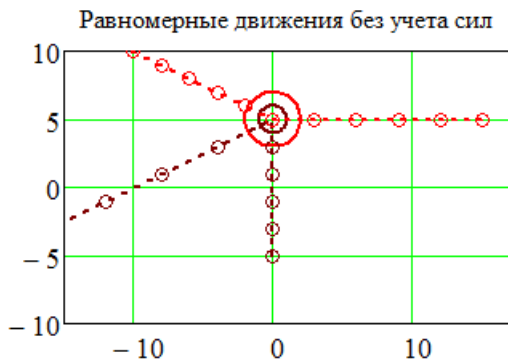
$$f = 5 \quad fu = 4 \quad (kv \ kac) = (0 \ 1)$$



Наконец, при отключении возврата шаров в точки касания установкой флажка $kac=0$, возникает недопустимая возможность проникновения шаров друг в друга при моделировании их движения как без учета, так и с учетом внешних сил:

$$(c10 \ c20 \ v10 \ v20) = \left[\begin{pmatrix} 0 \\ -5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 15 \\ 5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 20 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -30 \\ 0 \end{pmatrix} \right]$$

$$f = 5 \quad fu = 5 \quad (kv \ kac) = (1 \ 0) \quad kc = 0 \quad (r1 \ r2) = (1 \ 2) \quad Fu = 5 \quad f = 5$$



Этот пример еще раз обосновывает *необходимость* возврата столкнувшихся тел в точку касания. Отметим, что совпадение центров равномерно движущихся шаров на $f=5$ -ом кадре в точке $(0,5)$ было специально подстроено путем подбора начальных состояний $\{c10, c20\}$ и скоростей $\{v10, v20\}$, чтобы проиллюстрировать этот нежелательный эффект квантования времени моделирования при задании значения $kac=0$.

Выводы

Проведено компьютерное моделирование в MathCAD различных аспектов механического столкновения движущихся тел, в результате которых:

- объяснено, почему дискретизация времени является причиной многих нежелательных эффектов численного моделирования движения тел со столкновениями;
- получены условия столкновения тел в виде не точного равенства, а двух неравенств;

- обоснована необходимость выполнения операции возврата столкнувшихся тел в точку касания методом интерполяции;
- получены формулы расчета скоростей отскока тел в зависимости от коэффициента восстановления;
- выведены и экспериментально подтверждены условия «слипания» тел при абсолютно неупругом столкновении.

Библиографический список

1. **Никулин, Е.А.** Исследование механического удара с помощью символьного процессора MathCAD // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева. 2024. № 1. С. 7-15.
2. **Кирьянов, Д.В.** Mathcad 15 / Mathcad Prime 1/0 / Д.В. Кирьянов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 432 с.
3. **Никулин, Е.А.** Компьютерная графика. Модели и алгоритмы: учебное пособие / Е.А. Никулин. – СПб.: Лань, 2017. – 708 с.
4. **Тарг, С.М.** Краткий курс теоретической механики: учебник для вузов / С.М. Тарг. – М.: Высшая школа, 1986. – 416 с.
5. **Конгер, Д.** Физика для разработчиков компьютерных игр / Д. Конгер. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 520 с.
6. **Савельев, И.В.** Курс общей физики, том I. Механика, колебания и волны, молекулярная физика / И.В. Савельев. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1970. – 511 с.
7. **Сивухин, Д.В.** Общий курс физики. Учеб. пособие для вузов. В 5 т. Т.1. Механика / Д.В. Сивухин. – М.: ФИЗМАТЛИТ; Изд-во МФТИ, 2005. – 560 с.
8. **Матвеев, А.Н.** Механика и теория относительности: учебник для студентов вузов / А.Н. Матвеев. – М.: ОНИКС 21 век, 2003. – 432 с.

*Дата поступления
в редакцию: 11.01.2024*

*Дата принятия
к публикации: 09.03.2024*

УДК 51-74

EDN: GXBYWO

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМ В НАХОЖДЕНИИ РАСШИРЕННОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ РЕЗУЛЬТАТА КОСВЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ

А.А. ПоповORCID: 0000-0002-0598-5203 e-mail: popovanatol@inbox.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***О.Н. Косырева**ORCID: 0000-0003-2126-3275 e-mail: lelia7@list.ruДзержинский филиал Российской академии народного хозяйства и государственной службы
при Президенте Российской Федерации
*Дзержинск, Россия***С.А. Добротин**ORCID: 0000-0001-6925-2693 e-mail: zavkaf_sgpд@dzr.ranepa.ruДзержинский филиал Российской академии народного хозяйства и государственной службы
при Президенте Российской Федерации
Дзержинск, Россия

Результат измерения должен сопровождаться указанием показателя точности, в качестве которой, как правило, выступает расширенная неопределенность. Для ее расчета необходима информация о числе степеней свободы суммарной стандартной неопределенности результата косвенного измерения. Известные в нормативных документах и других источниках методики имеют ряд пробелов. Для устранения этих пробелов предложено использовать интерполяционный фактор в установлении числа степеней свободы для общего случая количества элементов в группе корреляционно зависимых входных переменных, а также предложены три подхода для определения числа степеней свободы стандартной неопределенности типа В. Выполнены соответствующие примеры расчетов, сопоставлены полученные результаты. Сделан вывод о целесообразности нахождения числа степеней свободы стандартной неопределенности типа В путем сопоставления коэффициента охвата, определяемого по методике ГОСТ Р 8.736-2011, с коэффициентом Стьюдента.

Ключевые слова: косвенные измерения, результат измерения, расширенная неопределенность, стандартная неопределенность, коэффициент охвата, число степеней свободы.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Попов, А.А. Решение проблем в нахождении расширенной неопределенности результата косвенного измерения / А.А. Попов, О.Н. Косырева, С.А. Добротин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2024. № 2. С. 32-42. EDN: GXBYWO

SOLVING PROBLEMS IN FINDING THE EXPANDED INDIRECT MEASUREMENT UNCERTAINTY

A.A. PopovORCID: 0000-0002-0598-5203 e-mail: popovanatol@inbox.ruNizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

O.N. Kosyreva

ORCID: 0000-0003-2126-3275 e-mail: lelia7@list.ru

The Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration
(The Presidential Academy, RANEPА), Dzerzhinsky branch
Dzerzhinsk, Russia

S.A. Dobrotin

ORCID: 0000-0001-6925-2693 e-mail: zavkaf_sgpд@dзr.ranepa.ru

The Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration
(The Presidential Academy, RANEPА), Dzerzhinsky branch
Dzerzhinsk, Russia

Abstract. The measurement result should be accompanied by an indication of accuracy, which is usually the expanded uncertainty. Its calculation requires information on the number of degrees of freedom of the combined standard uncertainty of the indirect measurement result. The methods presented in normative documents and other sources have a number of gaps. To eliminate these gaps, the paper proposes to use the interpolation factor in establishing the number of degrees of freedom for the general case of the number of elements in the group of correlation-dependent input variables. Three approaches for determining the number of degrees of freedom of the type B standard uncertainty are presented. The corresponding examples of calculations are performed and the results obtained are compared. It is reasonable to find the number of degrees of freedom of the type B standard uncertainty by comparing the coverage factor determined according to GOST R 8.736-2011 with the Student's t distribution quantile function.

Key words: indirect measurements, measurement result, expanded uncertainty, standard uncertainty, coverage factor, number of degrees of freedom.

FOR CITATION: A.A. Popov, O.N. Kosyreva, S.A. Dobrotin. Solving problems in finding the expanded indirect measurement uncertainty. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 2. Pp. 32-42. EDN: GXBYWO

Согласно требованиям нормативных метрологических документов, результат измерения должен указываться вместе с показателем точности [1]. В качестве него широко применяются расширенная неопределенность результата измерения U [2, 3] или доверительные границы погрешности оценки измеряемой величины [4]; данные термины являются синонимичными [5]. Расширенная неопределенность определяется как величина, кратная стандартной неопределенности:

$$U = k \cdot u(y), \quad (1)$$

где k – коэффициент охвата; $u(y)$ – стандартная неопределенность результата измерения величины y .

В случае косвенных измерений результат получается с помощью уравнения измерения:

$$y = f(X), \quad (2)$$

где X – вектор входных величин:

$$X = (x_1, \dots, x_m)^T. \quad (3)$$

Компоненты x_i данного вектора определяются, как правило, в результате прямых измерений. В этом случае точечной оценкой результата измерения является среднее арифметическое значение \bar{x}_i , получаемое осреднением результатов единичных определений:

$$\bar{x}_i = \frac{\sum_{u=1}^n x_{ui}}{n}, \quad (4)$$

где n – число единичных определений; x_{ui} – результат u -го единичного определения входной величины x_i .

Стандартная неопределенность $u(x_i)$ результата прямого измерения величины x_i представляет собой стандартное отклонение среднего значения [6, 7]:

$$u(x_i) = s(\bar{x}_i) = \sqrt{\frac{\sum_{u=1}^n (x_{ui} - \bar{x}_i)^2}{n(n-1)}}. \quad (5)$$

После линеаризации функции $f(X)$ и нахождения математического ожидания квадрата отклонения [6] стандартная неопределенность результата измерения величины y находится по формуле:

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial f}{\partial x_j} \cdot u(x_i) \cdot u(x_j) \cdot r(x_i, x_j)}, \quad (6)$$

где $r(x_i, x_j)$ – коэффициент линейной парной корреляции величин x_i и x_j .

По результатам единичных определений значений величин x_i, x_j значение коэффициента линейной парной корреляции этих величин определяется по формуле:

$$r(x_i, x_j) = \frac{\sum_{u=1}^n (x_{ui} - \bar{x}_i) \cdot (x_{uj} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{u=1}^n (x_{ui} - \bar{x}_i)^2 \cdot \sum_{u=1}^n (x_{uj} - \bar{x}_j)^2}} \quad (7)$$

Условие возможности пренебрежения остаточным членом формулы Тейлора, возникающем при аппроксимации исходной функциональной зависимости по формуле (2) линейной функцией, что лежит в основе формулы (6), определяется соотношением между остаточным членом R и стандартным отклонением $u(y)$ [8]:

$$\frac{R}{u(y)} < 0,1. \quad (8)$$

Значение остаточного члена находится по формуле:

$$R = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^m \frac{\partial^2 f}{\partial x_i^2} \cdot U^2(x_i) + 2 \cdot \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \cdot U(x_i) \cdot U(x_j) \right), \quad (9)$$

где $U(x_i)$ – расширенная неопределенность результата измерения величины x_i .

При этом значения производных ищутся в точке средних значений входных переменных.

Широко рекомендуемое в нормативных документах значение для коэффициента охвата $k = 2$ возможно только при достаточной близости значений выборочных стандартных неопределенностей $u(x_i), u(x_j)$ к соответствующим генеральным стандартным отклонениям. В противном случае в качестве коэффициента охвата рекомендуется коэффициент Стьюдента $t_p(v)$ при доверительной вероятности p и числе степеней свободы v стандартной неопределенности $u(y)$ [6, табл. G.2]. Коэффициент Стьюдента при доверительной вероятности p соответствует квантилю распределения Стьюдента уровня $1 - \frac{\alpha}{2}$, где α – уровень значимости.

Для случая независимости входных переменных, входящих в формулу (6), число эффективных степеней свободы v стандартной неопределенности $u(y)$ определяется по формуле Уэлча-Саттеруэйта [6, 9]:

$$v = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{[c_i \cdot u(x_i)]^4}{v_i}}, \quad (10)$$

где v_i – число степеней свободы стандартной неопределенности $u(x_i)$; c_i – коэффициент чувствительности по входной переменной x_i .

Коэффициент чувствительности:

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}. \quad (11)$$

Нахождение числа степеней свободы (ЧСС) в общем случае наличия в уравнении измерения как независимых, так и функционально и корреляционно зависимых входных переменных, предложено [10] осуществлять аддитивно:

$$v = v_{\text{нез}} \Big|_{i=1, g} + v_{\text{ф.з.}} \Big|_{i=g+1, g+h} + v_{\text{кор}} \Big|_{i=g+h+1, m}, \quad (12)$$

где g , h и m – число соответственно независимых, функционально зависимых и общее число входных переменных; $v_{\text{нез}}$, $v_{\text{ф.з.}}$, $v_{\text{кор}}$ – ЧСС групп слагаемых входных переменных соответственно независимых, функционально зависимых и корреляционно зависимых.

При этом для группы функционально зависимых переменных в соответствии с определением понятия ЧСС [11] предложено [10] определять ЧСС группы как ЧСС единичного элемента группы

$$v_{\text{ф.з.}} = v_i, \quad i = \overline{g+h+1, m}, \quad (13)$$

а для группы корреляционно зависимых – методом линейной интерполяции между предельными случаями независимости и функциональной зависимости между элементами группы

$$v_{\text{кор}} = v_{\text{нез}}(1-r) + r \cdot v_{\text{ф.з.}}, \quad (14)$$

где r – коэффициент линейной парной корреляции.

Однако формула (14) применима только для случая двух корреляционно зависимых входных переменных.

Отнесение входных переменных к данной группе следует проводить путем проверки значимости полученного выборочного коэффициента корреляции. Это можно делать по процентным точкам выборочного коэффициента корреляции при значении генерального коэффициента $\rho=0$ [12], либо вычисляя наблюдаемое значение критерия Стьюдента

$$t = \frac{|r| \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}, \quad (15)$$

При получении значения критерия Стьюдента t , меньшем критического $t_{\text{кр}}(\alpha, n-2)$ [6, Приложение Г], принимается положение о независимости входных переменных, в противном случае – об их корреляционной зависимости.

В расчете суммарной стандартной неопределенности $u(x_i)$ результата прямого измерения величины x_i в общем случае участвуют стандартные неопределенности как типа А, так и типа В, что влечет за собой необходимость учета составляющей типа В в расчете ЧСС v_i стандартной неопределенности $u(x_i)$. Это рекомендуется делать по формуле (10) с коэффициентами чувствительности равными единице. Для расчета ЧСС стандартной неопределенности типа В, предложено уравнение [6, уравнение (Е.7)], которое легко преобразуется к следующему виду [6, уравнение (G.3)]:

$$v_{i,B} = \frac{1}{2} \left[\frac{u[u(x_i)]}{u(x_i)} \right]^{-2}, \quad (16)$$

где $\frac{u[u(x_i)]}{u(x_i)}$ – стандартная неопределенность в оценке стандартной неопределенности, представленная в относительном виде.

Рекомендации в документе [6] по обоснованному выбору в формуле (16) численного значения этой относительной величины отсутствуют.

Таким образом, в вопросе нахождения расширенной неопределенности результата косвенного измерения существуют две проблемы:

1) в группе корреляционно зависимых входных переменных в количестве более двух отсутствует интерполяционный фактор, который можно использовать для определения ЧСС указанной группы;

2) отсутствует методика определения ЧСС стандартной неопределенности типа В для расчета общего ЧСС отдельной входной переменной x_i .

После определения указанных величин они будут использоваться для нахождения эффективного ЧСС v стандартной неопределенности u (y) и далее – для определения коэффициента охвата и расширенной неопределенности результата косвенного измерения величины y .

Для решения первой проблемы можно предложить широко используемую в статистике агрегированную характеристику группы однородных величин – среднюю арифметическую. Тогда в случае наличия более, чем двух входных переменных в группе корреляционно зависимых величин, необходимо найти по формуле (7) коэффициенты линейной парной корреляции $r(x_i, x_j)$ для всех пар (x_i, x_j) , а затем перейти к частным коэффициентам [12] $r_{ij|1\dots p}$, которые характеризуют корреляционную связь между входными переменными x_i, x_j при исключении влияния остальных p входных переменных

$$r_{ij|1\dots p} = \frac{r_{ij} - \sum_{k=1}^m r_{ik} \cdot r_{jk}}{(k \neq i; k \neq j)} \cdot \sqrt{\left(1 - \sum_{k=1}^m r_{ik}^2\right) \cdot \left(1 - \sum_{k=1}^m r_{jk}^2\right)} \quad (17)$$

Отличие в статистических свойствах выборочного частного коэффициента от обычного парного коэффициента линейной корреляции заключается в том, что полученная статистика $r_{ij|1\dots p}$ имеет число степеней свободы $n-p-2$. В остальном процедура проверки значимости ничем не отличается от описанной выше. В общем случае статистических расчетов [13] выходная переменная y также используется в формуле (17) для расчета частного коэффициента корреляции. Однако для данного случая косвенных измерений она является функционально зависимой величиной и в формуле (17) необходимо использовать только входные переменные, входящие в данную группу. Полученные значения частных коэффициентов корреляции следует усреднить по формуле (4). Полученный показатель уже можно использовать, как интерполяционный фактор в формуле (14).

Для решения второй проблемы можно предложить несколько способов.

Первый способ

Для случая прямых измерений предложен [4] простой способ нахождения коэффициента охвата k :

$$k = \frac{\varepsilon + \Theta_{\Sigma}}{S_{\bar{x}} + S_{\Theta}} \quad (18)$$

где ε – доверительные границы случайной погрешности; Θ_{Σ} – доверительные границы неисключенной систематической погрешности (НСП); $S_{\bar{x}}$ – стандартное отклонение оценки измеряемой величины; S_{Θ} – стандартное отклонение неисключенной систематической погрешности.

Сопоставляя найденное значение коэффициента охвата с табличными значениями коэффициента Стьюдента [4, 6] можно легко найти соответствующее ЧСС суммарной стандартной неопределенности результата прямого измерения.

Второй способ

Часто неопределенность типа В задается в виде границ НСП $\pm\theta$. Тогда погрешность в указании границ $\Delta\theta$ можно представить в виде значения половины разряда, следующего за разрядом последней значащей цифры. В случае использования широко рекомендуемого в нормативных документах [6] значения коэффициента охвата $k=2$, ЧСС в оценке стандартной неопределенности типа В можно представить в виде:

$$v_{i,B} = \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta\theta}{\theta} \right]^{-2}. \quad (19)$$

Третий способ

В случае возможности пренебрежения остаточным членом формулы Тейлора, возникающем при линейризации функции $f(X)$, расширенная неопределенность результата косвенного измерения $U(y)$ может быть определена из формулы (6) при замене стандартных неопределенностей на расширенные (рис. 1). В этом случае знание ЧСС стандартной неопределенности результата косвенного измерения вообще не требуется.

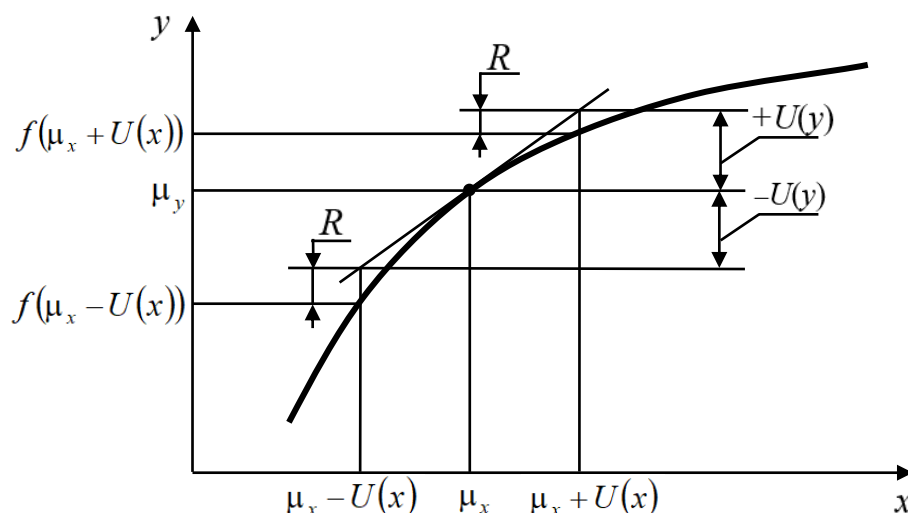


Рис. 1. Смещение границ доверительного интервала при линейризации функциональной зависимости [7]

Fig. 1. Shifting the boundaries of the confidence interval when linearizing the functional dependence [7]

Для сопоставления значений, получаемых по предложенным способом расчета, в качестве примера были выполнены расчеты расширенной неопределенности результата косвенного измерения. Исходные данные аналогичны значениям, указанным в [14], кроме того, они дополнены сведениями о НСП средств измерений.

Пример. Выполняется измерение плотности твердого тела. Уравнение измерения имеет вид:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (20)$$

где m и V – соответственно масса и объем образца.

Результаты единичных определений приведены в табл. 1.

Таблица 1.
Результаты единичных определений

Table 1.
Results of single determinations

Масса тела, г	Объем тела, см ³
252,9	195,0
252,7	195,4
253,0	195,7
252,5	195,8
252,6	195,7

Для взвешивания используются весы с приписанной погрешностью $\pm 0,1$ г, объем тела определяется методом вытеснения воды, для чего используется мерная колба с погрешностью отсчета $\pm 0,1$ мл. Методы обработки результатов прямых измерений описаны в [4]. Точечные оценки результатов, посчитанные по формуле (4):

$$\bar{m} = 252,74 \text{ г}; \quad \bar{V} = 195,52 \text{ см}^3.$$

Результат косвенного измерения по формуле (20):

$$\bar{\rho} = \frac{252,74}{195,52} = 1,29266 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}.$$

Посчитанный по формуле (7) для приведенных значений выборочный коэффициент линейной парной корреляции составил $r = -0,457$. Наблюдаемое значение критерия Стьюдента, используемое для проверки его статистической значимости, по формуле (15):

$$t = \frac{|-0,457| \sqrt{5-2}}{\sqrt{1-(-0,457)^2}} = 0,878,$$

что меньше критического значения $t_{\text{кр}}(\alpha, n-2) = 3,18$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$ [6, Приложение G]. Следовательно, величины m и V можно считать независимыми.

Стандартные отклонения случайных погрешностей результатов прямых измерений

$$S_{\bar{m}} = \sqrt{\frac{\sum (m_i - \bar{m})^2}{n(n-1)}} = 0,093 \text{ г},$$

$$S_{\bar{V}} = \sqrt{\frac{\sum (V_i - \bar{V})^2}{n(n-1)}} = 0,146 \text{ см}^2.$$

Доверительные границы случайных погрешностей

$$\varepsilon_m = t_p(v) \cdot S_{\bar{m}} = 0,257 \text{ г},$$

$$\varepsilon_V = t_p(v) \cdot S_{\bar{V}} = 0,406 \text{ см}^3.$$

В соответствии с исходными данными доверительные границы неисключенных систематических погрешностей $\theta_m = 0,1$ г; $\theta_V = 0,1$ см³. Соответствующие стандартные отклонения:

$$S_{\theta_m} = \frac{\theta_m}{\sqrt{3}} = 0,058 \text{ г},$$

$$S_{\theta_v} = \frac{\theta_v}{\sqrt{3}} = 0,058 \text{ см}^3.$$

Суммарные стандартные отклонения оценок измеряемых величин:

$$S_{m\Sigma} = \sqrt{(S_{\bar{m}})^2 + (S_{\theta_m})^2} = 0,109 \text{ г},$$

$$S_{V\Sigma} = \sqrt{(S_{\bar{V}})^2 + (S_{\theta_v})^2} = 0,157 \text{ см}^3.$$

Коэффициенты охвата в соответствии с формулой (18)

$$k_m = 2,38; k_v = 2,48.$$

Из сопоставления полученных значений коэффициентов охвата со значениями коэффициентов Стьюдента [4, Приложение Д] получаем ЧСС:

$$v_m = 6,84; v_v = 5,68.$$

Доверительные границы погрешностей оценок измеряемых величин:

$$\Delta_m = k_m \cdot S_{m\Sigma} = 0,260 \text{ г},$$

$$\Delta_v = k_v \cdot S_{V\Sigma} = 0,390 \text{ см}^3.$$

Частные производные:

$$\frac{\partial f}{\partial m} = \frac{1}{V}; \frac{\partial f}{\partial V} = -\frac{m}{V^2}. \quad (21)$$

После подстановки средних значений:

$$\frac{\partial f}{\partial m} = 5,12 \cdot 10^{-3}; \frac{\partial f}{\partial V} = -6,61 \cdot 10^{-3}.$$

Стандартная неопределенность результата косвенного измерения $u(\rho)$ по формуле (6) с учетом независимости входных переменных:

$$u(\rho) = \sqrt{(5,12 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,109^2 + (-6,61 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,157^2} = 1,18 \cdot 10^{-3} \frac{\text{г}}{\text{см}^3}.$$

Выполним проверку условия (8) возможности пренебрежения остаточным членом формулы Тейлора. Применительно к уравнению измерения (20) выражение для остаточного члена по формуле (9) примет следующий вид:

$$R = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial m^2} \cdot U^2(m) + \frac{\partial^2 f}{\partial V^2} \cdot U^2(V) + 2 \cdot \frac{\partial^2 f}{\partial m \cdot \partial V} \cdot U(m) \cdot U(V) \right). \quad (22)$$

С учетом формулы (21) выражения для частных производных второго порядка имеют вид:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial m^2} = \frac{\partial}{\partial m} \left(\frac{\partial f}{\partial m} \right) = \frac{\partial}{\partial m} \left(\frac{1}{V} \right) = 0, \quad (23)$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial V^2} = \frac{\partial}{\partial V} \left(-\frac{m}{V^2} \right) = \frac{2m}{V^3}, \quad (24)$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial m \cdot \partial V} = \frac{\partial}{\partial V} \left(\frac{\partial f}{\partial m} \right) = \frac{\partial}{\partial V} \left(\frac{1}{V} \right) = -\frac{1}{V^2}, \quad (25)$$

а их численные значения:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial V^2} = 6,763 \times 10^{-5}; \frac{\partial^2 f}{\partial m \cdot \partial V} = -2,616 \times 10^{-5}.$$

Поскольку отклонения в результатах измерения, определяемые расширенной неопределенностью, возможны в любую сторону от точечной оценки, то будем использовать знак (плюс или минус), приводящий к оценке остаточного члена сверху, т.е. со стороны больших значений. Тогда значение остаточного члена:

$$R = \frac{1}{2} \left(0 + 6,763 \cdot 10^{-5} \cdot 0,390^2 + 2 \cdot 2,616 \cdot 10^{-5} \cdot 0,260 \cdot 0,390 \right) = 7,80 \cdot 10^{-6} \frac{\Gamma}{\text{см}^3}.$$

Отношение:

$$\frac{R}{u(\rho)} = \frac{7,80 \cdot 10^{-6}}{1,18 \cdot 10^{-3}} = 6,6 \cdot 10^{-3}.$$

Таким образом, условие (8) выполняется и остаточным членом формулы Тейлора можно пренебречь.

Число эффективных степеней свободы ν стандартной неопределенности $u(\rho)$ по формулам (10) и (11):

$$\nu = \frac{(1,18 \cdot 10^{-3})^4}{\left(\frac{(5,12 \cdot 10^{-3} \cdot 0,109)^4}{6,84} + \frac{(-6,61 \cdot 10^{-3} \cdot 0,157)^4}{5,68} \right)} = 8,82.$$

Коэффициент Стьюдента, соответствующий данному числу степеней свободы:

$$t_p(\nu) = 2,27.$$

Расширенная неопределенность:

$$U(\rho) = 2,27 \cdot 1,18 \cdot 10^{-3} = 2,68 \cdot 10^{-3} \frac{\Gamma}{\text{см}^3}.$$

По второму способу нахождения ЧСС стандартной неопределенности типа В в соответствии с исходными данными $\theta_m = 0,1 \Gamma$; $\theta_V = 0,1 \text{ см}^3$. Тогда $\Delta\theta_m = 0,05 \Gamma$; $\Delta\theta_V = 0,05 \text{ см}^3$. ЧСС в соответствии с формулой (19)

$$\nu_{m,B} = \frac{1}{2} \left[\frac{0,05}{0,1} \right]^{-2} = 2;$$

$$\nu_{V,B} = \frac{1}{2} \left[\frac{0,05}{0,1} \right]^{-2} = 2.$$

Суммарные ЧСС:

$$\nu_i = \frac{u^4(x_i)}{\frac{u_A(x_i)^4}{\nu_{i,A}} + \frac{u_B(x_i)^4}{\nu_{i,B}}}. \quad (26)$$

Тогда:

$$\nu_m = \frac{0,109^4}{\frac{0,093^4}{4} + \frac{0,053^4}{2}} = 5,92;$$

$$\nu_V = \frac{0,157^4}{\frac{0,146^4}{4} + \frac{0,053^4}{2}} = 5,10.$$

Соответствующие коэффициенты охвата:

$$k_m = 2,46; k_V = 2,56$$

и расширенные неопределенности результатов прямых измерений:

$$U_m = k_m \cdot S_{m\Sigma} = 0,268 \Gamma,$$

$$U_V = k_V \cdot S_{V\Sigma} = 0,402 \text{ см}^3.$$

Значение ЧСС результата косвенного измерения по формулам (10) и (11) $\nu = 7,90$, что аналогичным образом приводит к значению коэффициента Стьюдента $t_2(\nu) = 2,31$ и расширенной неопределенности $U(\rho) = 2,73 \cdot 10^{-3} \frac{\Gamma}{\text{см}^3}$.

При расчете по третьему способу в формулу (6) вместо стандартных неопределенностей подставляются значения расширенных неопределенностей результатов измерений величин m и V . В этом случае значение расширенной неопределенности получается равным $2,90 \cdot 10^{-3} \frac{\Gamma}{\text{см}^3}$.

Полученные результаты сведены в табл. 2.

Таблица 2.
Полученные значения параметров в зависимости от способа расчета

Table 2.
Parameter values depending on the calculation method

Входные и выходная величины	ЧСС		Коэффициент охвата		Расширенная неопределенность		
	1	2	1	2	1	2	3
Масса	6,84	5,92	2,38	2,46	0,260	0,268	0,260
Объем	5,68	5,10	2,48	2,56	0,390	0,402	0,390
Плотность	8,82	7,90	2,27	2,31	$2,68 \cdot 10^{-3}$	$2,73 \cdot 10^{-3}$	$2,90 \cdot 10^{-3}$

С учетом имеющихся требований [4] по округлению значения границ погрешности результата измерения, расширенную неопределенность в данном случае необходимо округлить до двух значащих цифр. В этом случае первые два способа расчета расширенной неопределенности результата косвенного измерения дают одинаковые значения. При расчете по третьему способу значение расширенной неопределенности получается несколько большим. Причиной этого является то, что в первых двух способах использование информации о НСП ведет к увеличению ЧСС и, соответственно, к уменьшению коэффициента охвата. Однако разница между полученными значениями составляет 7 %, что говорит о возможности применения и такого способа оценки расширенной неопределенности. Преимуществом последнего способа является то, что нахождения ЧСС и коэффициента охвата при расчете расширенной неопределенности не требуется.

Выводы

1. Исследованы проблемы получения оценки расширенной неопределенности результата косвенного измерения, связанные с оценкой ЧСС суммарной стандартной неопределенности.
2. Расширено понятие интерполяционного фактора для общего случая количества элементов в группе корреляционно зависимых входных переменных.
3. Предложено три способа нахождения расширенной неопределенности результата косвенного измерения, приведен пример расчета по этим способам и сопоставлены полученные результаты.
4. Расчет по первому способу дает наименьшее значение расширенной неопределенности. Отличительной особенностью предложенного способа является нахождение ЧСС суммарной стандартной неопределенности результата прямого измерения путем сопоставления коэффициента охвата, находимого в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011, с коэффициентом распределения Стьюдента. ЧСС, соответствующее равенству этих коэффициентов, принимается в качестве ЧСС суммарной стандартной неопределенности результата прямого измерения.

Библиографический список

1. Федеральный закон № 102-ФЗ от 26.06.2008 «Об обеспечении единства измерений». [Электронный ресурс]: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_77904/ (дата обращения 10.02.2024).
2. ПМГ 96-2009. Результаты и характеристики качества измерений. Формы представления. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200079072> (дата обращения 10.02.2024).
3. РМГ 61-2010. Показатели точности, правильности, прецизионности методик количественного химического анализа. Методы оценки. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200094703> (дата обращения 10.02.2024).
4. ГОСТ Р 8.736-2011. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200089016> (дата обращения 10.02.2024).
5. **Добротин, С.А.** Общая характеристика неопределенности измерений и ее сопоставление с погрешностью измерений / С.А. Добротин, О.Н. Косырева // Актуальные вопросы современных научных исследований: сборник статей VIII Международной научно-практической конференции. В 2 частях, Пенза, 05 декабря 2023 года. – Пенза: Наука и Просвещение, 2023. С. 62-69.
6. ГОСТ 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200146871> (дата обращения 10.02.2024).
7. РМГ 29-2013. Метрология. Основные термины и определения. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200115154> (дата обращения 10.02.2024).
8. **Попов, А.А.** Оценка неопределенности результатов косвенных измерений по результатам системного анализа остаточного члена формулы Тейлора / А.А. Попов, О.Н. Косырева, С.А. Добротин // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2023. № 2. С. 14-29. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_2_14
9. Р 50.1.100-2014. Статистические методы. Три подхода к интерпретации и оценке неопределенности измерений. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200120832> (дата обращения 10.02.2024).
10. **Абдрахманов, В.И.** Оценка неопределенности измерений линейных индексов удерживания при повышении температуры капиллярной хроматографической колонки / В.И. Абдрахманов, С.А. Добротин, О.Н. Косырева, В.И. Логутов // Измерительная техника. 2023. № 1. С. 54-63. DOI: 10.32446/0368-1025it.2023-1-54-63
11. **Ферстер, Э.** Методы корреляционного и регрессионного анализа / Э. Ферстер, Б. Ренц. – Москва: Финансы и статистика, 1983. – 304 с.
12. **Большев, Л.Н.** Таблицы математической статистики / Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов. – М.: Наука, 1983. – 416 с.
13. **Айвазян, С.А.** Прикладная статистика: Исследование зависимостей: Справ. изд. / С.А. Айвазян, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1985. – 457 с.
14. МИ 2083-90. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200007609> (дата обращения 10.02.2024).

**Дата поступления
в редакцию: 15.03.2024**

**Дата принятия
к публикации: 25.04.2024**

УДК 533.6.011.5

EDN: SIGMDF

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ CAE-МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАДАЧ АЭРОДИНАМИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ РАСЧЕТА НА ТРЕХМЕРНЫХ НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ СЕТКАХ С ПЕРЕКРЫТИЯМИ

А.В. Саразов

ORCID: 0000-0002-1143-8978 e-mail: alex_sar@bk.ru

Российский федеральный ядерный центр

«Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»

Саров, Россия

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева

*Нижний Новгород, Россия***А.С. Козелков**

ORCID: 0000-0003-3247-0835 e-mail: ASKozelkov@mail.ru

Российский федеральный ядерный центр

«Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»

Саров, Россия

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева

Нижний Новгород, Россия

Рассматриваются вопросы численного моделирования задач обтекания тел со сложной геометрической формой. Представлены основные уравнения тепло- и массопереноса вязкого сжимаемого газа. Проведена модификация исходных соотношений для задач с подвижными границами, позволяющая сохранить порядок аппроксимации численной схемы путем введения вектора скорости грани контрольного объема. В качестве подхода моделирования используется методика расчета на сетках с перекрытиями. Приведены ключевые этапы предложенной технологии расчета. Для уменьшения вычислительной сложности построения интерполяционного шаблона предлагается использование иерархических структур данных. Восстановление расчетных полей на интерфейсных гранях выполняется посредством специализированных алгоритмов на основе градиентов и расширенного множества ячеек доноров. Работоспособность алгоритмов демонстрируется на примере задачи обтекания дозвуковым потоком сжимаемого газа двухзвенного профиля крыла. Анализ показал преимущество предложенных подходов интерполирования в отношении точности получаемых результатов для актуальных задач авиационной промышленности.

Ключевые слова: пакет программ ЛОГОС, уравнения Навье-Стокса, сетки с перекрытиями, интерполяционный шаблон.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Саразов, А.В. Повышение точности CAE-моделирования задач аэродинамики с использованием технологии расчета на трехмерных неструктурированных сетках с перекрытиями / А.В. Саразов, А.С. Козелков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева. 2024. № 2. С. 43-58. EDN: SIGMDF

INCREASING ACCURACY OF CAE MODELING IN AERODYNAMICS USING CALCULATION TECHNOLOGY ON THREE-DIMENSIONAL UNSTRUCTURED MESHES WITH OVERLAPS

A.V. Sarazov

ORCID: 0000-0002-1143-8978 e-mail: alex_sar@bk.ru

Russian Federal Nuclear Center – The All-Russian Research Institute of Experimental Physics

Sarov, Russia

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

Nizhny Novgorod, Russia

A.S. Kozelkov

ORCID: **0000-0003-3247-0835** e-mail: **ASKozelkov@mail.ru**

Russian Federal Nuclear Center – The All-Russian Research Institute of Experimental Physics
Sarov, Russia

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

Abstract. The paper discusses numerical simulation of flows around bodies with complex geometric shapes. The basic equations of heat and mass transfer of viscous compressible gas are given. A modification of the original relations for problems with moving boundaries is presented, which makes it possible to preserve the order of approximation of the numerical scheme by introducing the velocity vector of the control volume edge. The calculation technique on meshes with overlaps was considered as a modeling approach. The key stages of the proposed calculation technology are given. It is proposed to use hierarchical data structures to reduce the computational complexity of constructing an interpolation template. Restoration of calculated fields on interface edges is performed using specialized algorithms based on gradients and an extended set of donor cells. The problem of a subsonic flow of compressible gas around a two-section airfoil is considered to demonstrate the performance of the algorithms. The analysis showed the advantage of the proposed interpolation approaches in terms of the accuracy of the results for current problems in the aviation industry.

Key words: LOGOS software, Navier-Stokes equations, meshes with overlaps, interpolation pattern.

FOR CITATION: A.V. Sarazov, A.S. Kozelkov. Increasing accuracy of CAE modeling in aerodynamics using calculation technology on three-dimensional unstructured meshes with overlaps. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 2. Pp. 43-58. EDN: SIGMDF

Современная инженерная практика все чаще сталкивается с проблемами, связанными с оптимизацией различных модификаций образцов техники с целью улучшения аэродинамических качеств летательного аппарата. Как правило, они возникают в процессе подбора наиболее выгодного расположения того или иного проектируемого узла в общей компоновке изделия. В качестве примера можно рассмотреть различные конфигурации механизации крыла, расположения подвесного топливного бака и т.д.

Характер изменения формы или положения отдельных элементов объекта исследования, а также требования, предъявляемые к точности получаемых результатов, определяют выбор методов моделирования. В ряде случаев удается использовать одну дискретную модель для серии расчетов, отличающихся лишь координатами узлов расчетной сетки, путем использования различных алгоритмов деформирования [1, 2]. В качестве альтернативы методу деформирования расчетной сетки можно рассмотреть метод расчета на сетках с перекрытиями [3]. В силу постоянного усложнения конструкции перспективных образцов авиационной техники и режимов ее эксплуатации востребованность и актуальность исследований в данном направлении высоки [4]. Метод расчета на сетках с перекрытиями позволяет существенно сократить время подготовки задачи, поскольку подразумевает разбиение исходной геометрической модели на отдельные элементы. Полученные дискретные модели, учитывающие особенности и геометрическую форму лишь отдельного элемента общей модели, согласно идеологии рассматриваемого метода, объединяются в одну общую сетку с перекрытиями. Расчетная методика учитывает наличие возможных пересечений расчетных сеток и обеспечивает их корректное взаимодействие посредством генерации интерполяционного шаблона [5].

Помимо алгоритма построения наиболее соответствующего интерполяционного шаблона, в методике расчета на сетках с перекрытиями ключевое значение имеет выбор метода интерполяции для обеспечения требуемой точности расчета. Алгоритмы интерполяции применяются для обеспечения взаимодействия несвязанных расчетных сеток. На текущий момент не существует общепринятого метода интерполирования полей применительно к технологии расчета с использованием неструктурированных перекрывающихся сеток, что определяет актуальность подобных исследований.

1. Методика решения задачи

1.1. Основные уравнения и дискретизация

Течения вязкого сжимаемого газа описываются системой уравнений Навье-Стокса. В настоящее время ее аналитические решения получены лишь для ряда постановок задач с существенными упрощениями характеристик течения, что нехарактерно для реальных процессов. В связи с этим разработаны различные подходы для численного решения системы уравнений Навье-Стокса: метод конечных разностей, панельный метод, метод конечных элементов, метод конечных объемов. По ряду причин в настоящее время наибольшее распространение получил метод конечных объемов. Он требует наличия расчетной сетки, в которой ячейки сетки (контрольные объемы) могут быть произвольными многогранниками, заполняющими расчетную область без зазоров и наложений. Каждый многогранник ограничен произвольным числом граней, вершинами которых являются узлы сетки. Общий вид ячейки показан на рис. 1.

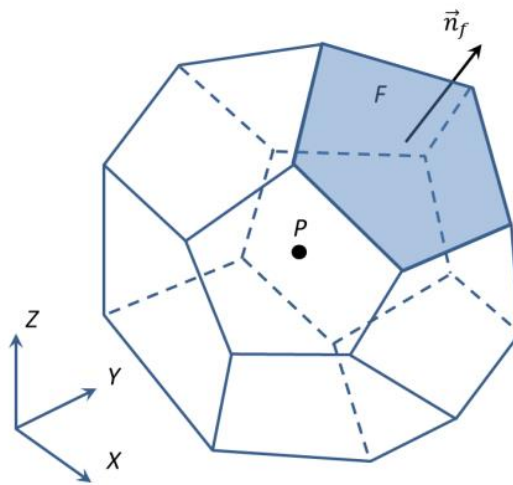


Рис. 1. Общий вид ячейки сетки:

P – центр ячейки, F – одна из граней ячейки, выделенная цветом, \vec{n}_f – нормаль к грани F

Fig. 1. General view of a mesh cell:

P – center of a mesh cell, F – one of the cell edges, highlighted in color, \vec{n}_f – normal of the F edge

Система уравнений Навье-Стокса в векторной форме имеет вид [6]:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Delta V} W dV + \oint_{\Delta S} (F - G) dS = \int_{\Delta V} H dV \quad (1)$$

где вектор W – вектор консервативных переменных, H – источниковый член, F и G – вектора конвективных и диффузионных потоков:

$$W = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} \rho u_n \\ \rho v u_n + p n_x \\ \rho v v u_n + p n_y \\ \rho w u_n + p n_z \\ \rho H u_n + p u_n \end{pmatrix}, \quad G = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{nx} \\ \tau_{ny} \\ \tau_{nz} \\ \tau u + q \end{pmatrix} \quad (2)$$

Здесь u, v, w – компоненты вектора скорости, ρ – плотность, p – давление, E – полная энергия, u_n – нормальная составляющая скорости, q – тепловой поток, τ_{ij} – компоненты тензора вязких напряжений.

Система уравнений течения вязкого газа вида (1) будет вносить погрешности в схему дискретизации в случае расчета нестационарных задач с движением отдельных границ. По

этой причине необходимо выполнить модификацию исходных уравнений путем введения в вектор конвективных потоков скорости движения грани:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Delta V} W dV + \oint_{\Delta S} (F - \vec{x}W - G) dS = \int_{\Delta V} H dV \quad (3)$$

где \vec{x} – скорость движения границы контрольного объема.

Помимо введения в систему уравнений вектора скорости движения грани, уравнение (3) также учитывает скорость изменения контрольного объема. Скорость движения грани напрямую влияет на порядок аппроксимации численной схемы. Поэтому одним из требований к алгоритму вычисления вектора скорости движения грани является удовлетворение условия геометрической консервативности (*Geometric Conservation Law*, GCL) [7]. Отметим, что сохранение порядка аппроксимации численной схемы гарантируется соблюдением условия геометрической консервативности [7].

Движение границ, в свою очередь, требует построения нестационарных схем расчета для уравнений типа (3). Один из широко применяемых подходов исходит из предположения, что течение потока в каждый момент времени рассматривается как результат установления некоторого стационарного процесса [8]. Поэтому вместо решения уравнений вида (3) рассматриваются модифицированные уравнения:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Delta V} W dV + \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{\Delta V} W dV + \oint_{\Delta S} (F - \vec{x}W - G) dS = \int_{\Delta V} H dV, \quad (4)$$

где τ – псевдовремя.

Построение численной схемы основано на использовании теоремы о среднем. В методе конечных объемов средние значения расчетных полей в ячейке и на гранях отнесены к центрам ячейки и граней соответственно. Следовательно, выражение вида (4) будет иметь вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} (WV)_P + \frac{\partial}{\partial \tau} (WV)_P + \sum_{f=1}^N [F(W) - \vec{x}W - G(W, \nabla W)]_f S_f - (H(W, \nabla W))_P V_P^{n+1} = 0 \quad (5)$$

где n – шаг по времени, N – количество граней в ячейке P .

Выражение (5) можно представить в операторной форме:

$$\frac{\partial}{\partial t} (WV)_P + \frac{\partial}{\partial \tau} (WV)_P + L(W) = 0 \quad (6)$$

где:

$$L(W) = \sum_{f=1}^N [F(W) - \vec{x}W - G(W, \nabla W)]_f S_f - (H(W, \nabla W))_P V_P^{n+1} \quad (7)$$

Выражение (7) представляет собой разностный оператор, содержащий аппроксимацию конвективных и диффузионных потоков с учетом движения граней контрольного объема. По причине того, что разностный оператор $L(W)$ основан на неявных аппроксимациях потоков с использованием односторонних разностей, аппроксимация выражения вида (4) имеет первый порядок по пространству. Для решения нелинейного уравнения вида (6) на новый момент времени применяется метод итераций по нелинейности. Тогда выражение (7) можно представить в виде:

$$L(W^{\gamma+1}) = L(W^{\gamma+1}) - L(W^{\gamma}) + L(W^{\gamma}) = \Delta L_1(W^{\gamma+1}, W^{\gamma}) + L_2(W^{\gamma}) \quad (8)$$

где γ – индекс итерации, а выражение для члена $L_2(W^{\gamma})$ приведено ниже:

$$L_2(W^{\gamma}) = \sum_{f=1}^N [F(W^{\gamma}) - \vec{x}W^{\gamma} - G(W^{\gamma}, \nabla W^{\gamma})]_f S_f - (H(W^{\gamma}, \nabla W^{\gamma}))_P V_P \quad (9)$$

$$\Delta L_1(W^{\gamma+1}, W^{\gamma}) = \sum_{f=1}^N \left[\frac{\partial F}{\partial W} - \vec{x} - \frac{\partial G}{\partial W} \right]_f^{\gamma} (W^{\gamma+1} - W^{\gamma})_f S_f - \frac{\partial H}{\partial W}_P^{\gamma} (W^{\gamma+1} - W^{\gamma})_P \quad (10)$$

На основании выражений (8)-(10) численная схема решения уравнений Навье-Стокса может быть представлена в разностной форме:

$$\left(\frac{2V_P^{n+1} - V_P^n + V_P^{n+1}}{\Delta t} \right) \Delta W_P^{\gamma+1} + \sum_{f=1}^N \left[\frac{\partial F}{\partial W} - \bar{x} - \frac{\partial G}{\partial W} \right]_f \Delta W_f^{\gamma+1} S_f - \frac{\partial H}{\partial W_P} \Delta W_P^{\gamma+1} V_P^{n+1} = R(W) \quad (11)$$

Правая часть уравнений является невязкой уравнений баланса:

$$R(W) = (2V_P^{n+1} - V_P^n) \frac{W_P^n - W_P^\gamma}{\Delta t} - \sum_{f=1}^N \left[F - \bar{x}W - G \right]_f \Delta S_f + H_P^\gamma V_P^{n+1} \quad (12)$$

Первым этапом расчета конвективных потоков является реконструкция расчетных величин слева и справа от грани ячейки, после чего применяются схемы типа *Pou* [9] и AUSMP [10]. Данные схемы относят к схемам типа Годунова, имеющим ясную физическую интерпретацию. Вычисление диффузионных потоков выполняется с применением явной схемы, где градиенты и расчетные параметры в центрах ячейки интерполируются в центры граней.

Дополнительно для возможности численного моделирования задач обтекания подвижных тел с использованием подхода сеток с перекрытием требуется построение интерполяционного шаблона, обеспечивающего взаимодействие независимых сеток.

1.2. Интерполяционный шаблон

Технология расчета на основе сеток с перекрытиями, как было отмечено выше, подразумевает применение нескольких не связанных друг с другом сеток как единого целого. Поэтому в объединенной дискретной модели существуют области пространства, где две или более сеток перекрываются друг с другом. Соответственно, одной из центральных задач рассматриваемой методики является построение интерполяционного шаблона, который обеспечивает сопряжение независимых сеток. Построение подобного шаблона взаимодействия состоит из этапов определения интерфейсов, поиска нерасчетных областей дискретных моделей и восстановления полей на интерфейсах. По причине высокой востребованности подобной техники расчета в инженерных приложениях алгоритмы сопряжения должны базироваться на предположении, что ячейками расчетной сетки являются произвольные многогранники. В свою очередь, интерполяционные шаблоны, созданные на основе различных подходов [5], могут отличаться друг от друга (рис. 2).

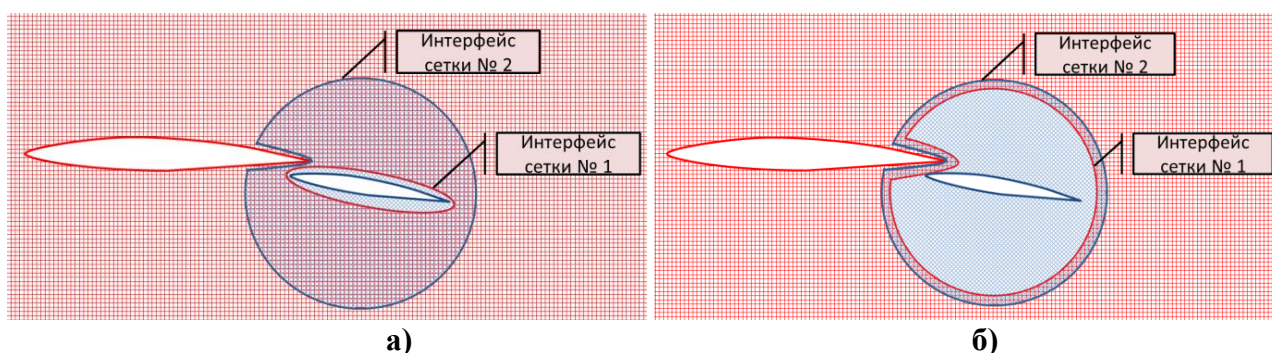


Рис. 2. Интерполяционные шаблоны для двухзвенного профиля крыла:

а) большие перекрытия, б) минимизация перекрытий

Fig. 2. Interpolation templates for a two-section airfoil:

a) large overlaps, b) minimizing overlaps

Как правило, подходы, обеспечивающие минимизацию перекрестов [11], являются предпочтительными ввиду экономии вычислительных ресурсов и повышают устойчивость итерационного процесса к различным родам осцилляциям. В случае движения или изменения формы одной из границ процедуру маркировки необходимо повторить для новой конфигурации формы обтекаемого объекта.

Тем не менее, методы маркировки (определения нерасчетных областей), построение интерфейсов взаимодействия являются скорее технической стороной расчета на сетках с перекрытиями, тогда как подходы восстановления расчетных полей на интерфейсах в большинстве своем относятся к методическим аспектам, влияющим на конечный результат моделирования. С развитием технологии расчета на сетках с перекрытиями проводились исследования, направленные на повышение качества получаемого решения с помощью алгоритмов интерполяции высокой точности [12, 13]. Также предпринимались попытки построения консервативных схем расчета [14-17]. Подобные подходы можно условно разделить на две категории. В первую группу входят методики, где выполнение законов сохранения гарантировалось путем применения специальных схем расчета, основанных на использовании геометрических характеристик элементов сетки [13, 14]. Основным недостатком данного подхода состоит в том, что реализация его для произвольных трехмерных сеток крайне затруднительна. Методы второй группы основываются на построении сетки без перекрытий на основе перекрывающихся сеток [17] (рис. 3).

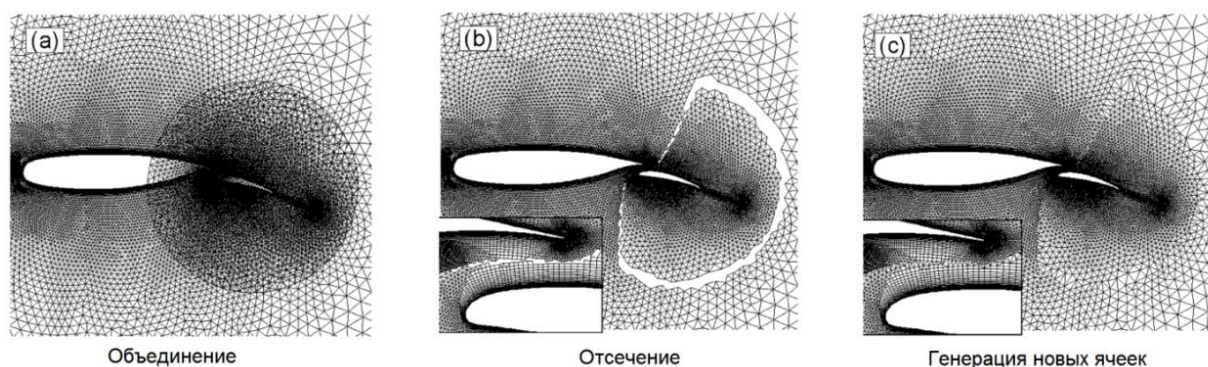


Рис. 3. Методика DRAGON

Fig. 3. DRAGON method

Методы восстановления значения полей на интерфейсах, гарантирующие консервативность, в большинстве случаев задают высокие требования к дискретной модели и детально проработаны для регулярных двумерных расчетных сеток. Применение подобных подходов к реконструкции для трехмерных неструктурированных расчетных сеток весьма проблематично, особенно для нестационарных задач с движением границ. По этой причине на практике точность результатов достигается качественными методами интерполирования. Это позволяет использовать известные схемы расчета сжимаемых и несжимаемых течений без каких-либо ограничений, что является достоинством подобных подходов.

Наиболее распространенными методами интерполяции [12] для численного моделирования задач с сетками с перекрытием являются:

- метод обратных взвешенных расстояний;
- метод трилинейной интерполяции.

Поскольку подходы интерполирования отличаются реализацией и требованиями к входным данным, это оказывает влияние как на построение интерполяционного шаблона, так и на получаемые результаты. Рассмотрим каждый из представленных подходов.

1.3. Метод обратных взвешенных расстояний

Метод обратных взвешенных расстояний опирается на геометрическое распределение ключевых точек, на основе которых происходит восстановление полей. На рис. 4 представлен результат процедуры поиска доноров на примере двумерной задачи.

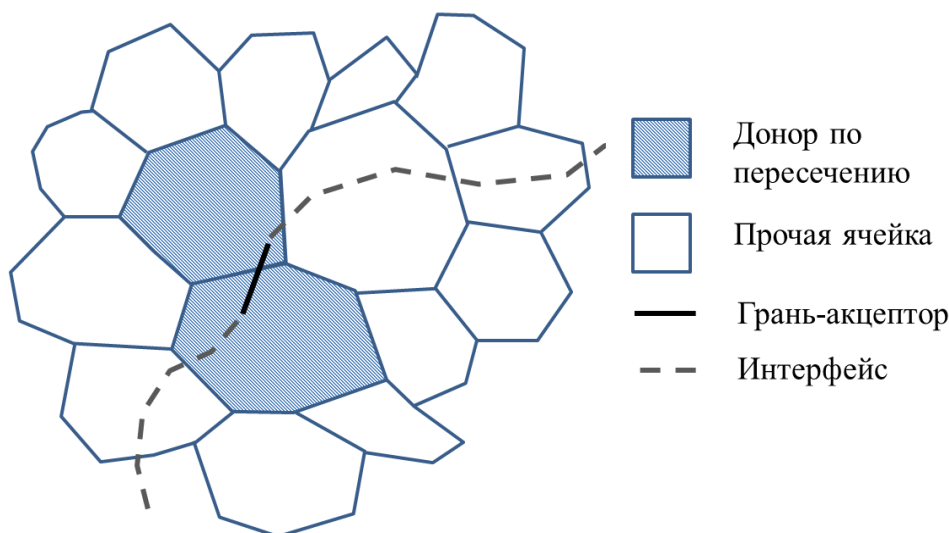


Рис. 4. Результат поиска доноров для метода обратных взвешенных расстояний

Fig. 4. Result of donor search for the inverse distance weighting

Данный метод интерполирования предполагает, что ячейка, имеющая наименьшее расстояние от центра до грани интерфейса, имеет большой весовой коэффициент. Расчет величин проводится с помощью формулы:

$$\varphi(x_a, y_a, z_a) = \frac{\sum_{i=1}^N \omega_i(s_i) \varphi(x_i, y_i, z_i)}{\sum_{k=1}^N \omega_k(s_k)}, \quad (13)$$

Весовая функция ω_i определяется соотношением:

$$\omega_i(s_i) = \frac{1}{\left\| \{(x_a - x_i), (y_a - y_i), (z_a - z_i)\} \right\|^p}, \quad (14)$$

где x_a, y_a, z_a – координаты центра грани-акцептора, x_i, y_i, z_i – центр ячейки i -го донора, p – положительная константа.

Выбор степени p обусловлен плавностью изменения интерполируемой величины при изменении начальных данных алгоритма, и, как правило, на практике выбор $p=2$ дает наиболее качественные результаты.

1.4. Метод трилинейной интерполяции

Метод трилинейной интерполяции [5] является расширением линейной интерполяции для трехмерного пространства. Значение функции формируется на основе 8 точек, окружающих целевую точку (рис. 5).

В отличие от предыдущего метода интерполяции, при построении шаблона взаимодействия необходимо гарантировать нахождение точки внутри параллелепипеда. С целью оптимизации вычислительного процесса взамен параллелепипеда используется куб, центр которого совпадает с центром интерфейсной грани. Для каждой грани акцептора необходимо построить обрамляющий куб так, чтобы центр грани находился строго внутри. При поиске доноров для каждой грани используется не сама грань, а куб, содержащий центр грани. На рис. 6 представлен результат поиска доноров для грани-акцептора на примере двухмерной задачи.

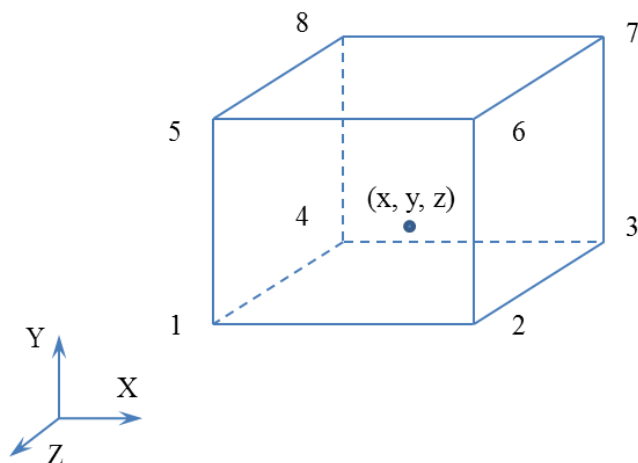


Рис. 5. Шаблон трилинейной интерполяции

Fig. 5. Trilinear interpolation pattern

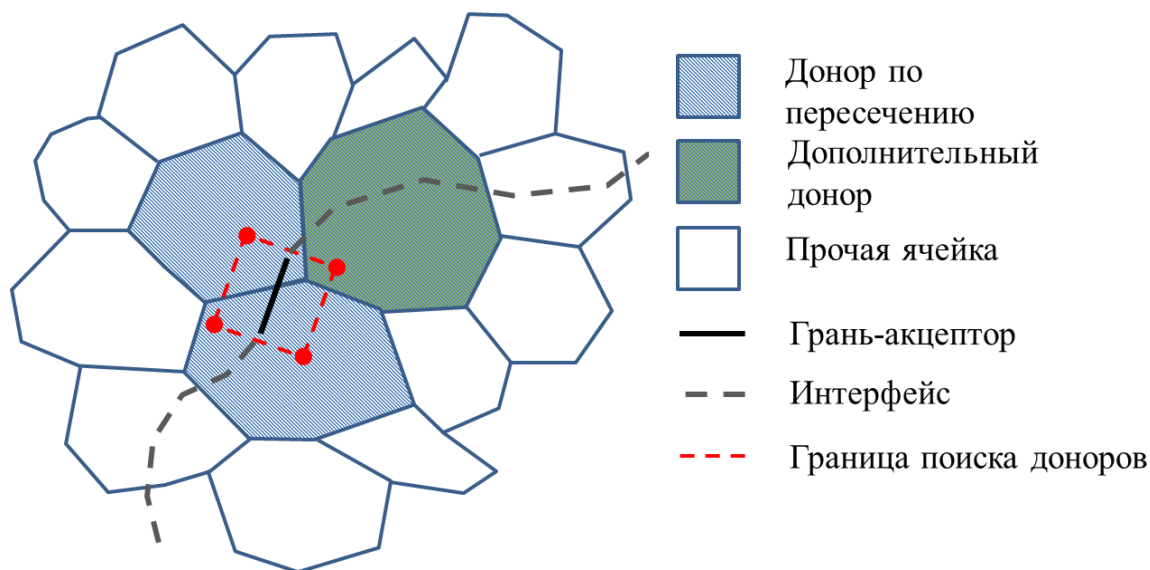


Рис. 6. Результат поиска доноров для трилинейной интерполяции

Fig. 6. Result of donor search for the trilinear interpolation

В отличие от метода обратных взвешенных расстояний, множество доноров содержит еще одну ячейку по причине расширенного шаблона интерполяции.

Процедура поиска доноров для интерфейсов состоит из двух этапов:

- поиск ячеек, пересекающихся с кубом, соответствующим грани интерфейса;
- анализ полученного множества на предыдущем шаге с целью поиска ячеек, содержащих вершины куба.

Процедура поиска ячеек основана на применении эффективных структур данных, таких как альтернативные бинарные деревья [18]. Поиск ячеек, содержащих вершины куба проводится прямым перебором полученного ранее множества ячеек. Ячейки, не содержащие вершины куба, не участвуют в процессе восстановления расчетных данных для текущей грани-акцептора. Описанная процедура выполняется для всех интерфейсных граней.

По завершении построения интерполяционного шаблона в процессе расчета восстановление данных выполняется по формуле:

$$\begin{aligned}
\varphi(x_a, y_a, z_a) = & \frac{\varphi(x_1, y_1, z_1)}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)(z_2 - z_1)}(x_2 - x_a)(y_2 - y_a)(z_2 - z_a) + \\
& + \frac{\varphi(x_1, y_1, z_2)}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)(z_2 - z_1)}(x_2 - x_a)(y_2 - y_a)(z_a - z_1) + \\
& + \frac{\varphi(x_1, y_2, z_1)}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)(z_2 - z_1)}(x_2 - x_a)(y_a - y_1)(z_2 - z_a) + \\
& + \frac{\varphi(x_1, y_2, z_2)}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)(z_2 - z_1)}(x_2 - x_a)(y_a - y_1)(z_a - z_1) + \\
& + \frac{\varphi(x_2, y_1, z_1)}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)(z_2 - z_1)}(x_a - x_1)(y_2 - y_a)(z_2 - z_a) + \\
& + \frac{\varphi(x_2, y_1, z_2)}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)(z_2 - z_1)}(x_a - x_1)(y_2 - y_a)(z_a - z_1) + \\
& + \frac{\varphi(x_2, y_2, z_1)}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)(z_2 - z_1)}(x_a - x_1)(y_a - y_1)(z_2 - z_a) + \\
& + \frac{\varphi(x_2, y_2, z_2)}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)(z_2 - z_1)}(x_a - x_1)(y_a - y_1)(z_a - z_1)
\end{aligned} \tag{15}$$

Данный тип интерполяции обладает повышенной устойчивостью в силу расширенного шаблона взаимодействия, и рекомендуется для задач, в которых происходит проникновение твердых тел друг в друга.

2. Сравнительный анализ исходных методов интерполяции

С целью проведения сравнительного анализа подходов восстановления данных на гранях-акцепторах и алгоритмов интерполирования рассматривается двухзвенный элементарный профиль крыла GA(W)-1 с однощелевым выдвигным закрылком [19] (рис. 7).

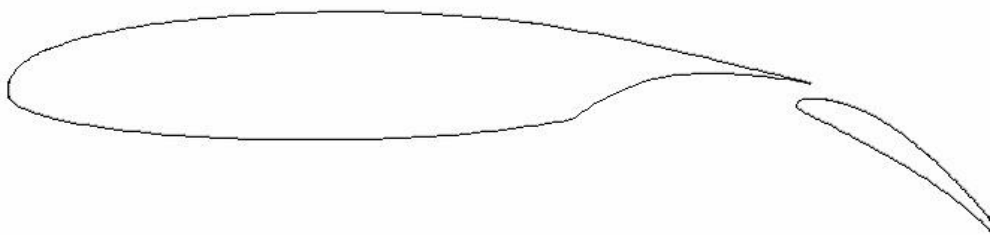


Рис. 7. Общий вид двухзвенного профиля GA(W)-1

Fig. 7. General view of the two-section airfoil GA(W)-1

Результаты каждого метода интерполирования сравниваются с коэффициентами подъемной силы (C_{ya}) и коэффициентами сопротивления (C_{xa}) для различных углов атаки (α), полученными с использованием сетки без перекрытий и в ходе натурального эксперимента. Для численного моделирования применялась расчетная сетка, состоящая из 587 167 ячеек с двумя топологически несвязанными регионами. На рис. 8 представлена дискретная модель вблизи профиля крыла.

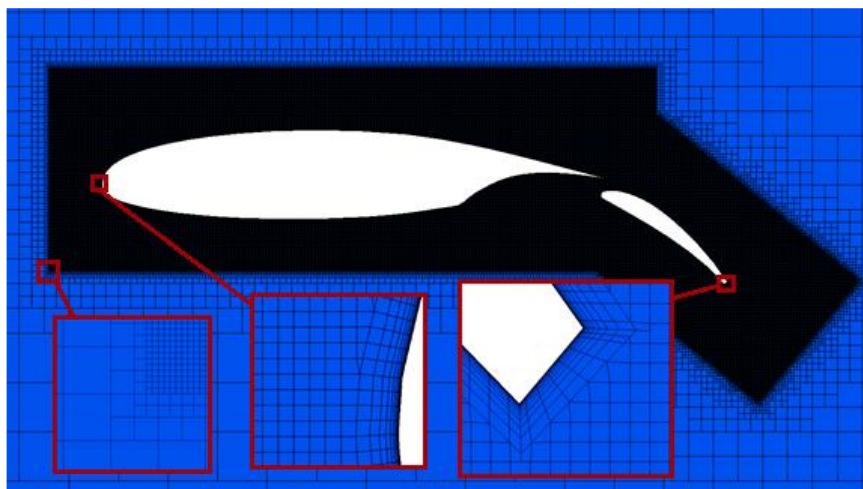


Рис. 8. Активные ячейки

Fig. 8. Active cells

Расчет аэродинамических нагрузок на профиль GA(W)-1 производился для углов атаки в диапазоне $\alpha = -2^\circ \div 14^\circ$ и числа Маха $M_\infty = 0.21$. Число Рейнольдса взято равным $Re = 2.2 \times 10^6$. В качестве параметров начальной инициализации использовались следующие величины: $P_\infty = 47096 \text{ Па}$, $T_\infty = 288 \text{ К}$, $\rho_\infty = 0.56968 \text{ кг/м}^3$, $c = 321 \text{ м/с}$, $\mu = 1.85e-5 \text{ Па} \cdot \text{с}$, где P_∞ – давление, T_∞ – температура, ρ_∞ – плотность, c – скорость звука, μ – динамическая вязкость.

На открытых границах в качестве граничного условия использовался свободный поток с числом Маха $M = 0.21$ и направлением потока, соответствующим указанным выше углам атаки. Воздух рассматривается как идеальный газ, для описания турбулентных характеристик использовалась модель Спаларта-Аллмараса [20].

Представленные выше методы и алгоритмы, как и все расчеты в данной работе, реализованы в ЛОГОСе – российском пакете программ инженерного анализа (CAE), предназначенном для решения широкого круга промышленных задач [21-23].

На рис. 9 представлено распределение числа Маха вблизи профиля для угла атаки $\alpha = 0^\circ$, используется метод обратной весовой интерполяции. Видна непрерывная структура течения, полученная с применением методики расчета на сетках с перекрытиями.

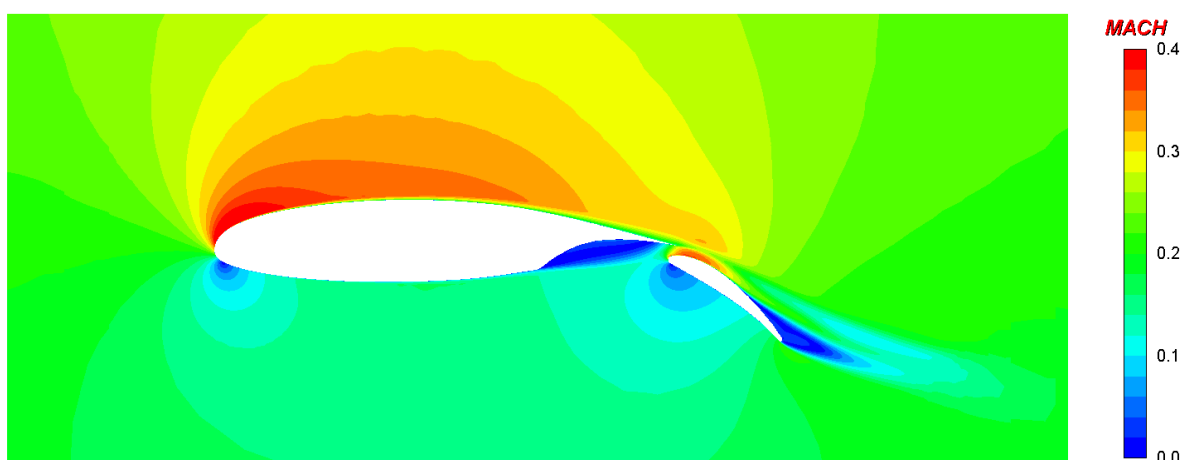


Рис. 9. Распределение числа Маха

Fig. 9. Mach number distribution

Для количественного анализа ниже приводятся графики коэффициентов подъемной силы и лобового сопротивления для двух методов интерполяции.

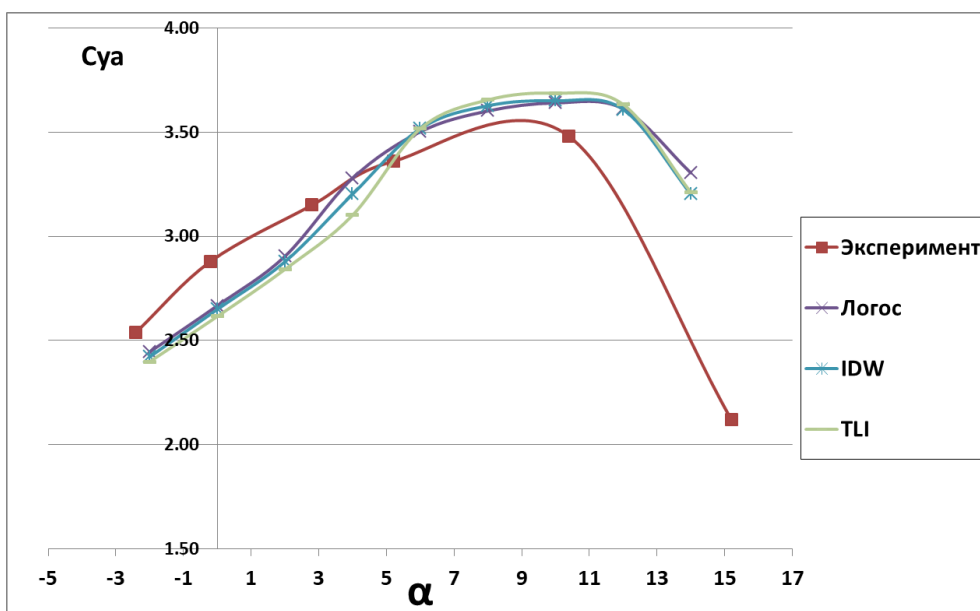


Рис. 10. График изменения коэффициента подъемной силы

Fig. 10. Lift coefficient curve

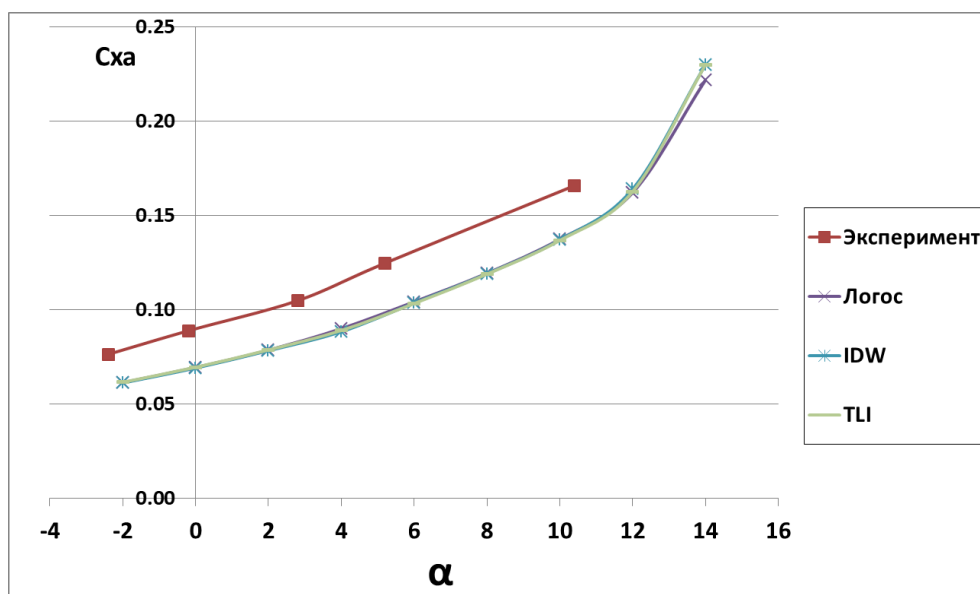


Рис. 11. График изменения коэффициента лобового сопротивления

Fig. 11. Drag coefficient curve

Результаты моделирования показывают хорошее согласование с экспериментальными данными и результатами расчета на сетке без перекрытий по коду ЛОГОС. Однако при больших углах атаки имеется небольшое завышение коэффициента подъемной силы – так же, как и у результатов, полученных на сетке без перекрытий.

Более детальный анализ показал, что метод трилинейной интерполяции в среднем проигрывает методу обратных взвешенных расстояний. Это обусловлено более диссипативными свойствами данного метода интерполирования для данного типа задач, характеризующимися сложной структурой потока на дозвуковых режимах.

Несмотря на хорошее согласование результатов, ни один из подходов технологии расчета на сетках с перекрытиями не дал идеального совпадения интегральных величин с результатами, полученными в расчете с эквивалентной сеткой без перекрытий. Поэтому для задач в нестационарной постановке, требующих высокой точности результатов, подобные методы могут привести к неверным результатам. Для повышения точности численного моделирования необходимо проводить дальнейшие исследования, направленные на обеспечение консервативности путем геометрических операций и вычисления точных весов для каждого донора.

3. Разработанные методы интерполяции

3.1. Метод интерполяции с использованием градиентов

Как и в случае с методом обратных взвешенных расстояний, интерполяционный шаблон по построению обеспечивает геометрическую близость акцепторов и доноров (рис. 4), поэтому, основываясь на одном доноре, значение полей на интерфейсной грани можно восстановить по формуле:

$$\varphi(x_a, y_a, z_a) = \varphi(x_i, y_i, z_i) + \nabla \varphi(x_i, y_i, z_i) \cdot \vec{S}, \quad (16)$$

где $\vec{S} = \{(x_a - x_i), (y_a - y_i), (z_a - z_i)\}$, а x_a, y_a, z_a – координаты центра грани-акцептора, x_i, y_i, z_i – центр ячейки i -го донора.

Тем не менее, подобная запись будет справедлива для каждого донора, поэтому возникает вопрос минимизации возможной ошибки. Пусть целевая функция метода наименьших квадратов будет иметь вид:

$$\sum_{i=1}^N \varepsilon^2 = \sum_{i=1}^N \left(\varphi(x_a, y_a, z_a) - \varphi(x_i, y_i, z_i) - \nabla \varphi(x_i, y_i, z_i) \cdot \vec{S}_i \right)^2 \rightarrow \min \quad (17)$$

В данном случае задача интерполяционные веса $\varphi(x_a, y_a, z_a)$ каждого донора определяются путем решения оптимизационной задачи вида (17) для всех расчетных полей.

3.2. Метод весовой интерполяции

Идея подхода основана на трilinearной интерполяции и призвана уменьшить диссипативные свойства алгоритма при расширенном шаблоне. Данный алгоритм требует для расчета полей на акцепторах наличия четырех точек, образующих тетраэдр (рис. 12).

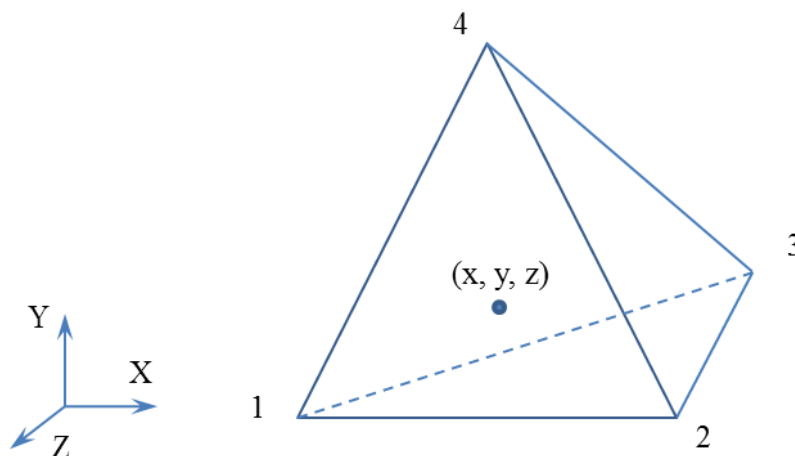


Рис. 12. Шаблон весовой интерполяции

Fig. 12. Weight interpolation pattern

Как и в случае с трилинейной интерполяцией, в операции поиска доноров используются геометрические характеристики тетраэдра, связанного с конкретной гранью интерфейса. Тетраэдр ориентируется в пространстве так образом, чтобы центры интерфейсной грани и тетраэдра совпадали, и одна из граней тетраэдра была перпендикулярна нормали грани-акцептора (рис. 13).

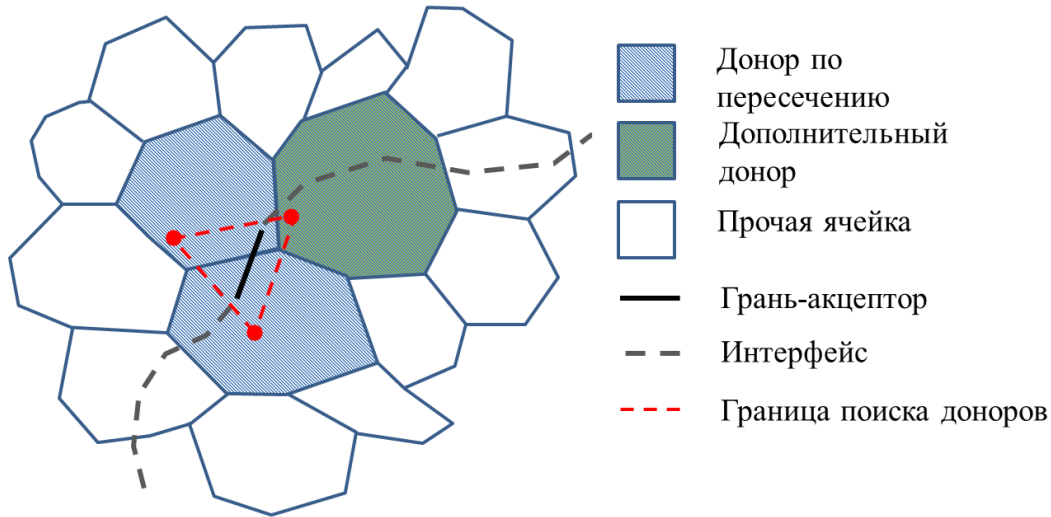


Рис. 13. Результат поиска доноров для весовой интерполяции

Fig. 13. Result of donor search for weight interpolation

Множество доноров для конкретной грани дополняется еще одним донором, как и в случае с трилинейной интерполяцией. Шаги построения интерполяционного шаблона также аналогичны этапам, используемым в случае с трилинейной интерполяцией.

Значение полей формируется на основе выражения:

$$\varphi(x_a, y_a, z_a) = \omega_1 \tilde{\varphi}_1(x_a, y_a, z_a) + \omega_2 \tilde{\varphi}_2(x_a, y_a, z_a) + \omega_3 \tilde{\varphi}_3(x_a, y_a, z_a) + \omega_4 \tilde{\varphi}_4(x_a, y_a, z_a), \quad (18)$$

где $\omega_1 = 1$, $\omega_2 = (x - x_a)$, $\omega_3 = (y - y_a)$, $\omega_4 = (z - z_a)$.

С целью минимизации вычислительных операций в методе интерполяции весовыми функциями используется правильный тетраэдр с центром в точке (x_a, y_a, z_a) . Коэффициенты $\tilde{\varphi}_i$ выбираются таким образом, чтобы значение функции в j -ой вершине было равно $\varphi_j(x_j, y_j, z_j)$.

Принимая во внимание вышесказанное, вычисление значений полей на акцепторах сводится к выражению:

$$\varphi(x, y, z) = \sum_{i=1}^4 W_i \varphi(x_i, y_i, z_i), \quad (19)$$

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{k=1}^4 w_k}, \quad (20)$$

Весовые коэффициенты w_i вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} W_1 &= s_{22} \cdot s_{33} \cdot s_{44} + s_{23} \cdot s_{34} \cdot s_{42} + s_{32} \cdot s_{43} \cdot s_{24} - s_{42} \cdot s_{33} \cdot s_{24} - s_{22} \cdot s_{43} \cdot s_{34} - s_{32} \cdot s_{23} \cdot s_{44} \\ W_2 &= s_{41} \cdot s_{33} \cdot s_{24} + s_{21} \cdot s_{43} \cdot s_{34} + s_{31} \cdot s_{23} \cdot s_{44} - s_{21} \cdot s_{33} \cdot s_{44} - s_{21} \cdot s_{43} \cdot s_{34} - s_{31} \cdot s_{23} \cdot s_{44} \\ W_3 &= s_{21} \cdot s_{32} \cdot s_{44} + s_{31} \cdot s_{42} \cdot s_{24} + s_{41} \cdot s_{22} \cdot s_{34} - s_{41} \cdot s_{32} \cdot s_{24} - s_{21} \cdot s_{42} \cdot s_{34} - s_{31} \cdot s_{22} \cdot s_{44} \\ W_4 &= s_{41} \cdot s_{32} \cdot s_{23} + s_{21} \cdot s_{42} \cdot s_{33} + s_{31} \cdot s_{22} \cdot s_{43} - s_{21} \cdot s_{32} \cdot s_{43} - s_{41} \cdot s_{22} \cdot s_{33} - s_{31} \cdot s_{42} \cdot s_{23} \end{aligned} \quad (21)$$

где

$$\begin{aligned}
 s_{21} &= x_1 - x_a, s_{31} = y_1 - y_a, s_{41} = z_1 - z_a, \\
 s_{22} &= x_2 - x_a, s_{32} = y_2 - y_a, s_{42} = z_2 - z_a, \\
 s_{23} &= x_3 - x_a, s_{33} = y_3 - y_a, s_{43} = z_3 - z_a, \\
 s_{24} &= x_4 - x_a, s_{34} = y_4 - y_a, s_{44} = z_4 - z_a
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

Для более детального анализа результатов ниже приводятся графики аэродинамических коэффициентов, полученными различными методами интерполирования.

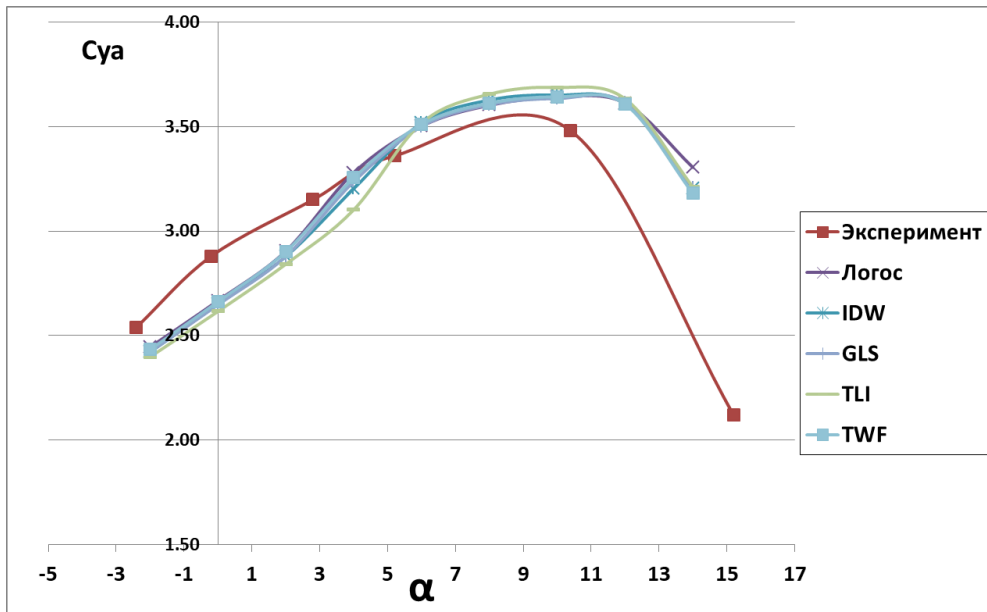


Рис. 14. График изменения коэффициента подъемной силы

Fig. 14. Lift coefficient curve

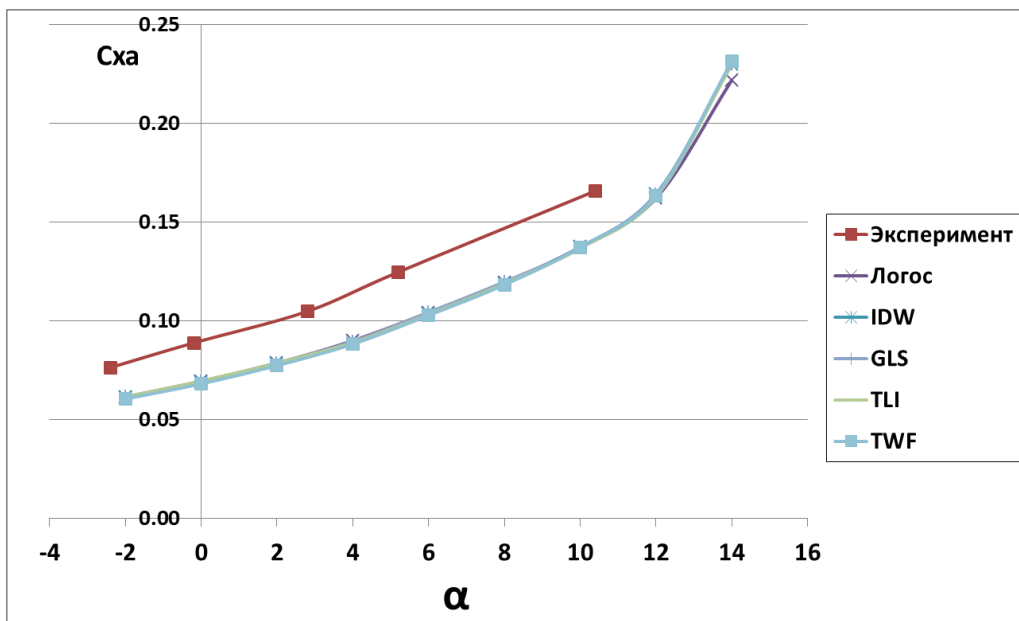


Рис. 15. График изменения коэффициента лобового сопротивления

Fig. 15. Drag coefficient curve

Результаты, полученные на основе разработанных и описанных выше методов, хорошо согласуются с результатами, полученными в ходе натурального эксперимента и путем расчета на сетке без перекрытий. Метод с применением градиентов расчетных полей позволил улучшить результаты, полученные с помощью метода обратных взвешенных расстояний. Метод интерполирования весовыми функциями дал лучшие результаты на расширенном шаблоне, в отличие от трилинейной интерполяции.

Заключение

Исследованы аспекты численного моделирования задач аэродинамики на основе метода расчета на сетках с перекрытиями. Предложенный метод позволяет использовать, помимо регулярных дискретных моделей, неструктурированные сетки. Применение данного метода предполагает построение отдельных сеток, учитывающих лишь геометрические особенности одного элемента модели, что существенно сокращает время подготовки.

Важным этапом рассматриваемого метода расчета является генерация интерполяционного шаблона, предназначенного для обеспечения взаимодействия пар *донор-акцептор*. Результаты моделирования на сетках с перекрытиями зависят от свойств построенного шаблона взаимодействия, включающего процедуры маркировки и определения интерфейсов, а также от выбора метода интерполирования расчетных величин. В работе представлены подходы, используемые при восстановлении данных на интерфейсах. Выбор того или иного подхода влияет на построение шаблона интерполяции. Метод восстановления значений расчетных полей на основе градиентов позволяет не только учесть геометрические характеристики ячеек, но и свойства потока.

Описанные методы продемонстрированы на характерной задаче. Сравнительный анализ результатов, полученных разными методами интерполяции, показал хорошее согласование друг с другом, с результатами моделирования с применением сетки без перекрытий, а также с результатами натуральных экспериментов.

Результаты получены при поддержке национального проекта «Наука и университеты» в рамках программы Минобрнауки РФ по созданию молодежных лабораторий № FSWE-2024-0001 (научная тема: «Разработка численных методов, моделей и алгоритмов для описания течений жидкостей и газов в естественных природных условиях, и условиях функционирования промышленных объектов в штатных и критических условиях на суперкомпьютерах экса- и зеттапроизводительности»), а также при поддержке научной программы Национального центра физики и математики, направление № 2 «Математическое моделирование на супер-ЭВМ экса- и зеттапроизводительности. Этап 2023-2025».

Библиографический список

1. **Гильманов, А.Н.** Методы адаптивных сеток в задачах газовой динамики. – М.: Наука. ФИЗМАТЛИТ, 2000. – 248 с.
2. **Анучина, Н.Н.** О методах расчета течений сжимаемой жидкости с большими деформациями // Числ. метод. сплош. сред. – Новосибирск: ИТПМ. 1970. Т. 1. № 4. С. 3-84.
3. **Benek, J. A.** A 3-D Chimera Grid Embedding Technique / J.A. Benek, P.G. Buning, J.L. Steger // AIAA Paper. № 85-1523, 1985.
4. **Саразов, А.В.** Моделирование динамики полета летательного аппарата с учетом работы силовой установки и органов управления / А.В. Саразов, А.С. Козелков, А.А. Уткина, А.В. Корнев // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. 2022. Т. 1. С. 203-204.
5. **Wang, Z.J.** A Fully Automated Chimera Methodology for Multiple Moving Body Problems / Z.J. Wang, V. Parthasarathy // International Journal for Numerical Methods in Fluids, vol. 33, № 7, pp 919-938, 2000.
6. **Волков, К.Н.** Течения и теплообмен в каналах и вращающихся полостях / К.Н. Волков, В.Н. Емельянов – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 488 с.

7. **Thomas, P.D.** Geometric conservation law and its application to flow computations on moving grids / P.D. Thomas, C.K. Lombard // AIAA Journal (1979), V. 17, № 10, pp. 1030-1037.
8. **Blazek, J.** Computational fluid dynamics: principles and applications. – Elsevier, 2001. – 470 p.
9. **Roe, P. L.** Introduction to computational fluid dynamics. Lecture Notes to a Short Course at Cranfield Institute of Technology, May 27-29, 1986.
10. **Weiss, J.M.** Preconditioning Applied to Variable and Const Density Flows / J.M. Weiss, W.A. Smith // AIAA Journal 33 (1995) 2050-2057/
11. **Deryugin, Yu.N.** Features of overset meshes methodology on unstructured grids / Yu.N. Deryugin, A.V. Sarazov, R.N. Zhuchkov // Mathematical Models and Computer Simulation. – 2017. – Volume. 9. Issue 5. – Pp. 587-597.
12. **Lee, K.R.** High-Order Interpolation Method for Overset Grid Based on Finite Volume Method / K.R. Lee, J.H. Park, K.H. Kim // AIAA Journal, 2011, Vol. 49, No. 7, pp. 1387-1398.
13. **Hahn, S.** Extension of CHIMPS for Unstructured Overset Simulation and Higher-Order Interpolation / S. Hahn, G. Iaccarino, S. Ananthan, D. Baeder // AIAA Paper, 2009-3999.
14. **Marsha, J. Berger.** On conservation at grid interfaces. // SIAM Journal on Numerical Analysis, 24(5):967–984, 1987.
15. **Wang, Z.F.** A unified conservative zonal interface treatment for arbitrarily patched and overlapped grids. / Z.F. Wang, H.Q. Yang // AIAA Paper No. 94-0320, 1994.
16. **Tang, H.** An Overset Grid Method for 3D unsteady incompressible flows / H. Tang, S.C. Jones, F. Sotiropoulos // Journal of Computational Physics, 2003, 191(2), 567-600.
17. **Jung, M. S.** A Conservative Overset Mesh Scheme via Intergrid Boundary Reconnection on Unstructured Meshes./ M. S. Jung, O. J. Kwon. // AIAA Paper 2009-3536, 2009.
18. **Bonet, J.** An alternating digital tree (ADT) algorithm for 3D geometric searching and intersection problems / J. Bonet, J. Peraire // International Journal for Numerical Methods in Engineering 1991; 31, 1–17.
19. **Wentz, W.H.** Development of a Fowler Flap System for High Performance General Aviation Airfoil / W.H. Wentz, H.C. Seetharam // NASA CR-2443, 1974.
20. **Дмитриев, С.М.** Применение полуэмпирических моделей турбулентности для моделирования турбулентной конвекции / С.М. Дмитриев, О.Л. Крутякова, А.С. Козелков, А.А. Куркин, В.В. Курулин, Д.А. Уткин // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2019. № 2. С. 18-33.
21. **Kozelkov, A.S.** Application of Mathematical Modeling to Study Near-Field Pressure Pulsations of a Near-Future Prototype Supersonic Business Aircraft / A.S. Kozelkov, D.Yu. Strelets, M.S. Sokuler, R.H. Arifullin // J. Aerosp. Eng., 2022, 35(1): 04021120.
22. **Kozelkov, A.S.** Two Methods to Improve the Efficiency of Supersonic Flow Simulation on Unstructured Grids / A.S. Kozelkov, A.V. Struchkov, D.Yu. Strelets // Fluids 2022, 7, 136. <https://doi.org/10.3390/fluids7040136>.
23. **Struchkov, A.V.** Numerical simulation of aerodynamic problems based on adaptive mesh refinement method / A.V. Struchkov, A.S. Kozelkov, K.N. Volkov, A.A. Kurkin, R.N. Zhuchkov, A.V. Sarazov // Acta Astronautica v. 172, July 2020, pp. 7-15.

*Дата поступления
в редакцию: 21.03.2024*

*Дата принятия
к публикации: 24.04.2024*

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.039.52

EDN: YQPN1Y

**О ВАЛИДАЦИОННОЙ ОЦЕНКЕ МОДЕЛЬНЫХ ПОДХОДОВ
К ОПИСАНИЮ ДИНАМИКИ ЯРУ****Д.Е. Богомолов**

ORCID: 0009-0007-8405-344X e-mail: bogomolov_de@okbm.nnov.ru

ОКБМ «Африкантов»
Нижний Новгород, Россия**Д.Г. Кресов**

ORCID: 0009-0002-6169-7801 e-mail: dkresov@okbm.nnov.ru

ОКБМ «Африкантов»
Нижний Новгород, Россия**С.С. Григорьев**

ORCID: 0009-0002-2206-7196 e-mail: grigorev_ss@okbm.nnov.ru

ОКБМ «Африкантов»
Нижний Новгород, Россия**Е.В. Оленская**

ORCID: 0009-0001-8366-9740 e-mail: olenskaya_ev@okbm.nnov.ru

ОКБМ «Африкантов»
Нижний Новгород, Россия

Решена задача выбора оптимальной модели динамики реакторной установки по критерию минимального отклонения расчетных значений параметров реактора от экспериментально полученных данных. При необходимости валидации моделей на группе режимов по нескольким параметрам задача приобретает многокритериальный характер. Для решения применены методы поддержки принятия решений *SAW*, *TOPSIS* и *ELECTRE*. Методом *SAW* проведен анализ чувствительности результатов к экспериментальным погрешностям измерений и к варьируемой значимости валидируемых параметров реакторной установки. Результаты позволяют ограничить исходный набор моделей для последующего уточнения рассматриваемых физических предпосылок.

Ключевые слова: валидация, кинетика, модель динамики реакторной установки, многокритериальный анализ, коэффициент важности, *SAW*, *TOPSIS*, *ELECTRE*, анализ чувствительности.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Богомолов, Д.Е. О валидационной оценке модельных подходов к описанию динамики ЯРУ / Д.Е. Богомолов, Д.Г. Кресов, С.С. Григорьев, Е.В. Оленская // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2024. № 2. С. 59-68. EDN: YQPN1Y

**ON THE VALIDATION ASSESSMENT OF MODEL APPROACHES
TO DESCRIPTION OF NUCLEAR REACTOR PLANT DYNAMIC****D.E. Bogomolov**

ORCID: 0009-0007-8405-344X e-mail: bogomolov_de@okbm.nnov.ru

«Afrikantov» Joint Stock Company
Nizhny Novgorod, Russia

D.G. Kresov

ORCID: **0009-0002-6169-7801** e-mail: **dkresov@okbm.nnov.ru**

«Afrikantov» Joint Stock Company
Nizhny Novgorod, Russia

S.S. Grigoryev

ORCID: **0009-0002-2206-7196** e-mail: **grigorev_ss@okbm.nnov.ru**

«Afrikantov» Joint Stock Company
Nizhny Novgorod, Russia

E.V. Olenskaya

ORCID: **0009-0001-8366-9740** e-mail: **olenskaya_ev@okbm.nnov.ru**

«Afrikantov» Joint Stock Company
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The paper presents a solution to the problem of selecting an optimal model of the reactor plant dynamics according to the criterion of the minimum deviation of the calculated and experimentally obtained data of reactor parameters. This problem becomes multi-criteria in case of validation models on a group of modes with different parameters. SAW, TOPSIS and ELECTRE methods of decision support are used for the solution. The sensitivity analysis of the results to experimental measurement errors and to the varying significance of the validated reactor plant parameters was carried out by SAW methods. According to the authors, these results make it possible to limit the initial set of models for the subsequent refinement of the physical assumptions under consideration.

Key words: validation, kinetics, reactor plant dynamic model, multi-criteria analysis, importance factor, SAW, TOPSIS, ELECTRE, sensitivity analysis.

FOR CITATION: D.E. Bogomolov, D.G. Kresov, S.S. Grigoryev, E.V. Olenskaya. On the validation assessment of model approaches to the description of the nuclear reactor plant dynamic. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 2. Pp. 59-68. EDN: YQPNIY

Введение

При анализе переходных процессов в ядерной реакторной установке (ЯРУ) исходными данными для динамических кодов служат, в том числе, результаты статических нейтронно-физических расчетов. При этом в расчетной практике широкого использования инженерных кодов в приближении точечного описания нейтронной кинетики сохраняется ряд неопределенностей в описании реактивных эффектов. К таким неопределенностям можно отнести степенную зависимость эффективного коэффициента размножения (или реактивности) от нейтронного поля, а для водо-водяных реакторов с канальной компоновкой активной зоны – вклады в Т-эффект канального и межканального теплоносителей. При углубленных исследовательских проработках одного из проектов транспортной ЯРУ указанные вклады по результатам стационарных нейтронно-физических расчетов для начала кампании были оценены в соотношениях 50 / 50 % в диффузионном приближении и 80 / 20 % при использовании статистического метода Монте-Карло соответственно для канального и межканального теплоносителей. Определение зависимости реактивности ρ от коэффициента объемной неравномерности нейтронного поля ($\rho = f[K_V^X]$) также представляет собой нетривиальную задачу [1] с учетом нахождения показателя χ в теоретически возможном диапазоне от 0 до 2.

С целью оценки чувствительности результатов расчета динамики по модели точечной кинетики к указанным неопределенностям была проведена серия расчетов пяти режимов с пусками ГЦН, характеризующимися наиболее значительными (среди режимов нормальной эксплуатации) возмущениями реактивности:

- 1) запуск исходно остановленного ГЦН на малую скорость (МС);
- 2) перевод единственного работающего на МС ГЦН на большую скорость (БС);
- 3) перевод одного из исходно работающих на МС ГЦН на большую скорость;

4) последовательный с интервалом 30 с перевод двух исходно работающих на МС ГЦН на БС;

5) последовательный с интервалом 30 с запуск двух исходно остановленных ГЦН на МС.

Расчеты были проведены для следующих моделей представления реактивности: «50/50; 0», «50/50; 2», «80/20; 0», «80/20; 2», где отношение отражает вклад в Т-эффект канального и межканального теплоносителя, а цифра – показатель степени χ . Каждая из указанных моделей была соотнесена с экспериментальными результатами. Расчеты динамики выполнялись по аттестованному в НТЦ ЯРБ инженерному коду *ЕСКМ-3Д* [2, 3]. В качестве оцениваемых величин были выбраны значения измеренных мощности и давления в первом контуре (в качестве характеристики интеграла выделившейся в теплоносителе энергии). При моделировании системы управления инерционность измерений мощности принималась равной 0,5 с, а показания давления рассчитывались с учетом места расположения манометра на газовой трассе системы компенсации давления. Экспериментальная погрешность измерений мощности $\pm 2,5\% N_{\text{ном}}$, давления первого контура $\pm 3,2\% P_{\text{ном}}$.

Примеры динамики отклонений моделируемой измеренной мощности от экспериментальных значений представлены на рис. 1-3. Визуальная оценка отклонений не позволяет выделить ни одну из моделей, которая бы наилучшим образом совпадала с экспериментом. При этом указанная трудность реализуется как для любого из режимов, так и для всей рассматриваемой совокупности процессов. Поэтому выбор требует поиска специальных методов оценки. В качестве таковых в настоящей работе рассматриваются три известных алгоритма многокритериального анализа, применяемых при решении инженерных и технико-экономических вопросов [4, 5], а также в анализе расчетных нейтронно-физических моделей [6].

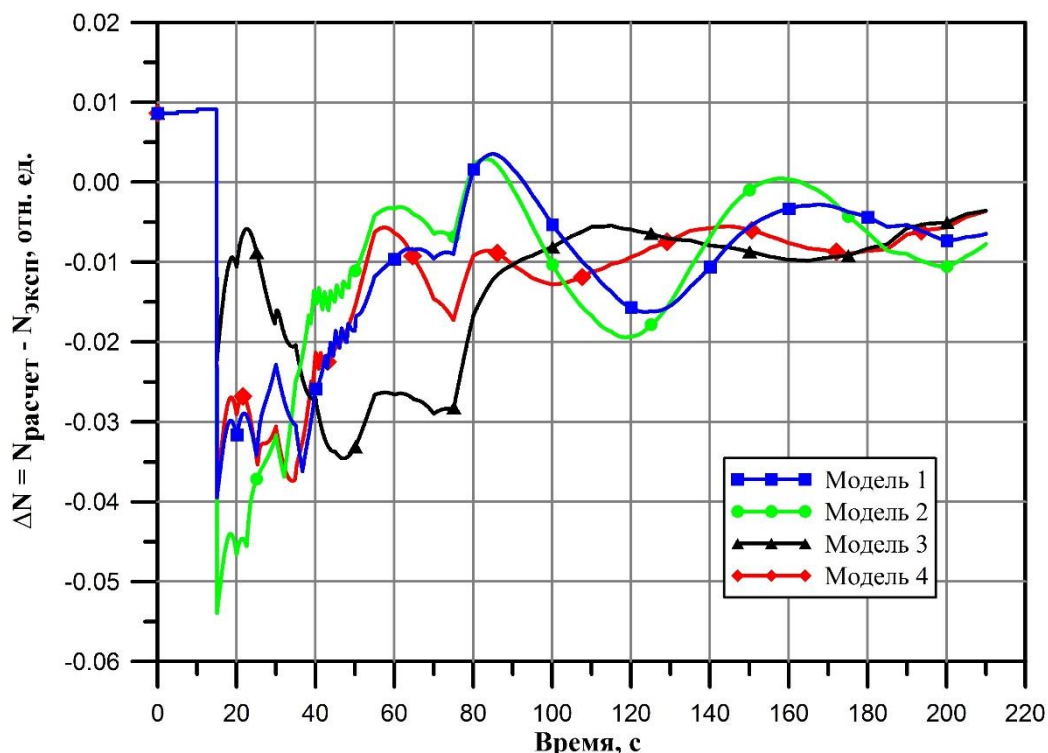


Рис. 1. Отклонения расчетных от экспериментальных значений мощности для режима 1

Fig. 1. Deviations between calculated and experimental values of power for mode 1

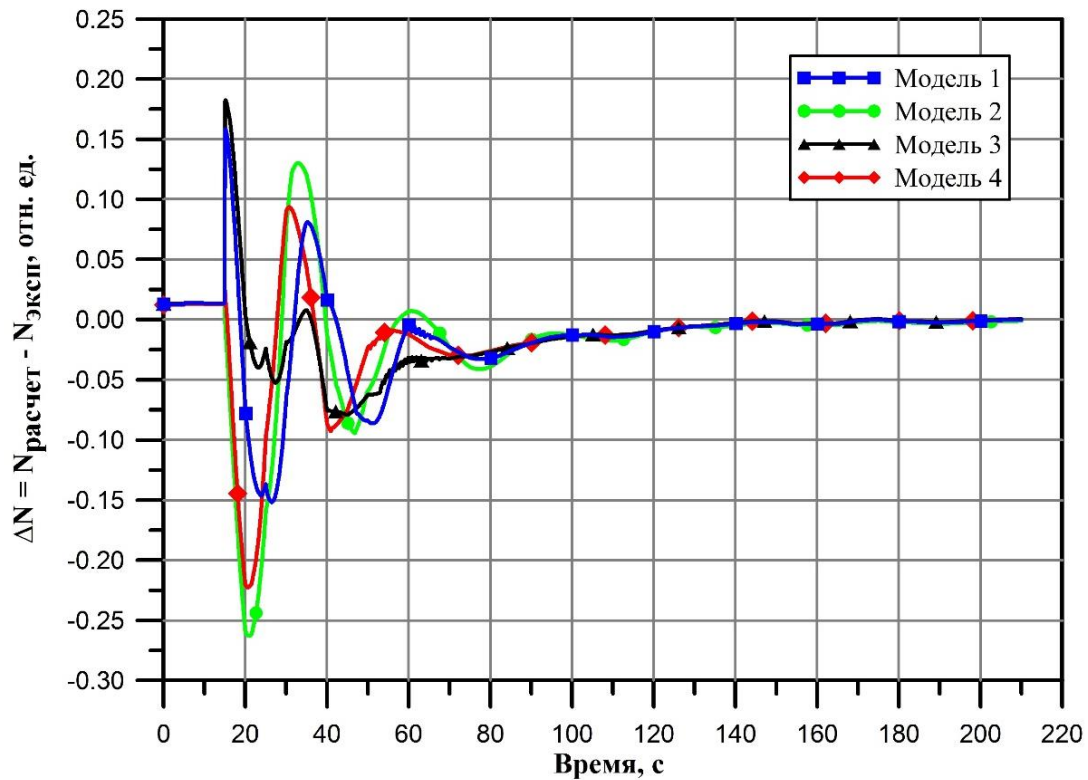


Рис. 2. Отклонения расчетных от экспериментальных значений мощности для режима 3

Fig. 2. Deviations between calculated and experimental values of power for mode 3

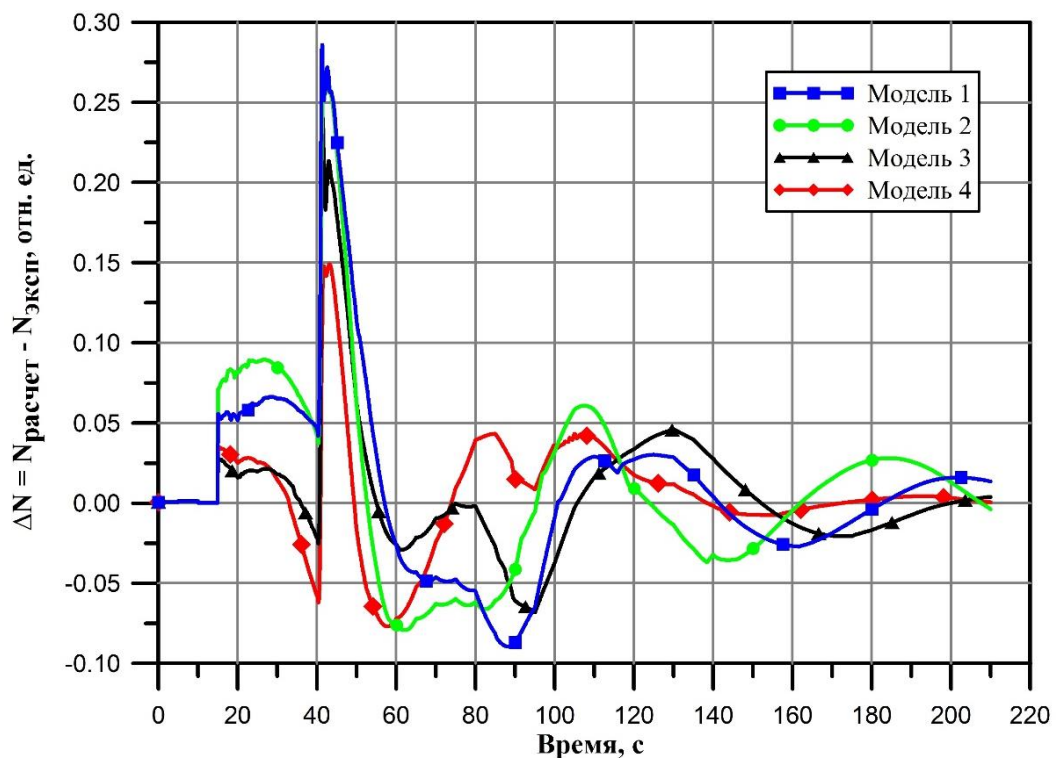


Рис. 3. Отклонения расчетных от экспериментальных значений мощности для режима 5

Fig. 3. Deviations between calculated and experimental values of power for mode 5

Методы многокритериального анализа

Для решения многокритериальной задачи выбраны широко известные и применяемые методы *SAW* [7], *TOPSIS* [8], *ELECTRE* [9, 10]. Многокритериальные методы принятия решений подобные используемым в настоящей работе хорошо показывают себя в задачах малой и средней сложности [10].

Метод *SAW* (*Simple Additive Weighting*) широко распространенный метод принятия решений в условиях многокритериальной задачи требующей ранжирования альтернатив. Основан на определении взвешенной суммы критериев. Выбор расчетной модели проводился по критерию максимальной разности между максимальным и анализируемым отклонением расчетных данных от экспериментальных значений параметров.

Метод *TOPSIS* (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) основан на определении решения максимально приближенного к «идеальному» состоянию и максимально отдаленного от «антиидеального» (или «идеально-негативного»). Конечным критерием, по которому производится ранжирование, в методе *TOPSIS* выступает относительная близость к «идеальному» состоянию.

Метод *ELECTRE* (*ELimination Et Choix Traduisant la REalite*) основан на использовании чувствительных показателей сравнимости – индексов согласия и несогласия. Индекс согласия рассчитывается на основе выполнения выдвигаемой гипотезы превосходства одной модели над другой. Индекс несогласия рассчитывается по наиболее противоречащему гипотезе критерию. Решение по методу *ELECTRE* определяется путем сравнения выбранных уровней согласия и несогласия с соответствующими им индексами. Уровни согласия и несогласия в общем случае выбираются лицом, принимающим решение. При этом разрешающее правило имеет вид бинарного соотношения, для которого индекс согласия не меньше уровня согласия, а индекс несогласия не больше выбранного уровня несогласия.

Пример решения бинарного соотношения с двумя несравнимыми между собой моделями (в примере это модели 2 и 4) представлен на рис. 4. Имеется два характерных решения бинарного соотношения – точки *A* и *B*. Первая характеризуется максимальным уровнем согласия, вторая – минимальным уровнем несогласия соответственно.

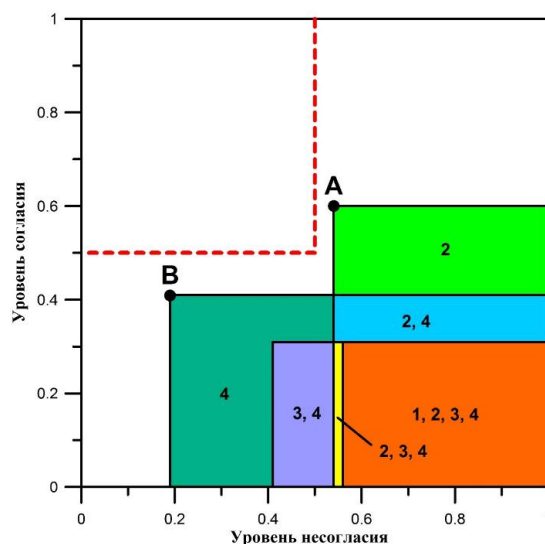


Рис. 4. Решение бинарного соотношения метода ELECTRE
 1, 2, 3, 4 – номера расчетных моделей; *A* – максимизация уровня согласия;
B – минимизация уровня несогласия

Fig. 4. Solution of binary relation of ELECTRE method
 1, 2, 3, 4 – design models numbers; *A* – agreement level maximization;
B – unconformity level minimization

Оценка расчетных моделей по отклонению расчетов от эксперимента

Экспериментальные и расчетные значения мощности и давления были предварительно нормализованы на их величину в номинальном режиме работы ЯРУ. Исходные данные для многокритериального анализа были представлены в виде массивов отклонений расчетных значений от экспериментальных данных для каждого момента записи в расчете, экспериментальные данные были аппроксимированы под соответствующий расчетному временной шаг. Далее формировались количественные «оценки» расчетных моделей путем арифметического усреднения полученных на предыдущем шаге массивов величин отклонений, взятых по модулю. В результате было получено по 10 «оценок» для каждой модели (табл. 1) – усредненные соответствующим образом отклонения параметров мощности и давления первого контура для каждого рассмотренного режима. Соответственно первые пять «оценок» – это отклонения значений мощности (ΔN), «оценки» с 6 по 10 – отклонения значений давления (ΔP). Следующий шаг после оценки моделей – определение количественных коэффициентов важности [11] (или весовых коэффициентов) критериев оценки. Коэффициент важности – величина, которая показывает степень приоритетности одного показателя (или критерия) задачи принятия решений перед другим [11, 12]. Сумма коэффициентов важности равна единице. Определение коэффициентов важности критериев само по себе является нетривиальной задачей. Методы решения этой задачи составляют теорию важности критериев [11].

Для первого приближения в настоящей работе коэффициенты важности каждого критерия оценки приняты равными друг другу и численно равны 0,1 отн. ед.

Таблица 1.
«Оценка» расчетных моделей

Table 1.
«Evaluation» of design models

«Оцениваемый» параметр/номер режима ЯРУ	Модель 1	Модель 2	Модель 3	Модель 4
$\Delta N/1$	0,0114	0,0117	0,0128	0,0123
$\Delta N/2$	0,0462	0,0458	0,0464	0,0471
$\Delta N/3$	0,2387	0,2409	0,2385	0,2394
$\Delta N/4$	0,1154	0,1152	0,1175	0,1173
$\Delta N/5$	0,0418	0,0449	0,0265	0,0207
$\Delta P/1$	0,0037	0,0036	0,0016	0,0023
$\Delta P/2$	0,0085	0,0074	0,0113	0,0086
$\Delta P/3$	0,0197	0,0131	0,0224	0,0164
$\Delta P/4$	0,0225	0,0213	0,0275	0,0233
$\Delta P/5$	0,0507	0,0490	0,0427	0,0374

Результаты ранжирования моделей

В табл. 2 приведены результаты ранжирования расчетных моделей.

Таблица 2.
Результаты ранжирования расчетных моделей

Table 2.
Ranking results of design models

Ранг	Методы		
	SAW	TOPSIS	ELECTRE (A/B)*
1	Модель 4	Модель 4	Модель 2 / Модель 4
2	Модель 2	Модель 3	Модель 4 / Модель 3

Окончание табл. 2.
Результаты ранжирования расчетных моделей

Table 2 continued.
Ranking results of design models

Ранг	Методы		
	SAW	TOPSIS	ELECTRE (A/B)*
3	Модель 3	Модель 2	Модели 1 и 3 / Модель 2
4	Модель 1	Модель 1	– / Модель 1
* «А» и «В» аналогично обозначениям рис. 4 («А» характеризуется максимальным уровнем согласия, «В» характеризуется минимальным уровнем несогласия)			

Учет влияния погрешностей измерения параметров мощности реактора и давления первого контура проводился в формате многовариантного анализа с применением метода SAW. В каждом варианте значения экспериментальные данных либо смещались с определенным знаком на величину погрешности соответствующего параметра, либо сохранялись в номинальном состоянии. Причем вариант, в котором значения мощности и давления сохранены в номинальном состоянии, соответствует результатам, приведенным в табл. 2.

В качестве вариантов рассматривались следующие комбинации:

- 1) мощность и давление учтены без смещения на величину погрешности (номинальный случай);
- 2) и мощность, и давление смещены вверх («в плюс») на величину погрешности;
- 3) и мощность, и давление смещены вниз («в минус») на величину погрешности;
- 4) давление смещено вверх на величину погрешности, мощность без смещения;
- 5) давление смещено вниз на величину погрешности, мощность без смещения;
- 6) мощность смещена вверх на величину погрешности, давление без смещения;
- 7) мощность смещена вверх на величину погрешности, давление смещено вниз на величину погрешности;
- 8) мощность смещена вниз на величину погрешности, давление без смещения;
- 9) мощность смещена вниз на величину погрешности, давление смещено вверх на величину погрешности.

По итогам многовариантного анализа с применением многокритериальных методов сформирована лепестковая диаграмма (рис. 5), на которой отражены ранги расчетных моделей для каждого варианта по каждому используемому методу многокритериального анализа. Внешняя окружность диаграммы соответствует первому (лучшему) рангу. Из диаграммы видно, что модель 4 наиболее стабильна в качестве наиболее предпочтительной – не опускается ниже второго ранга. Модель 1, в свою очередь, показывает наихудшие результаты.

Чувствительность решения к значениям коэффициентов важности

Для вышеописанной задачи критерии сравнения альтернативных моделей (критерии оценки) принимались равными друг другу. Однако при замене оцениваемых параметров и (или) при увеличении их количества может возникнуть необходимость решения задачи определения коэффициентов важности (весовых коэффициентов) для каждого критерия. При этом значительное изменение упомянутых коэффициентов может привести к иным результатам многокритериального анализа.

В рамках настоящей работы был проведен анализ чувствительности результатов многокритериального анализа к значениям коэффициентов важности критериев оценки, относящихся к параметрам мощности и давления первого контура. Для случая с двумя параметрами осуществлялся дискретный анализ по всему диапазону возможных значений коэффициентов важности, например, для обобщенного критерия по мощности в диапазоне от 0 до 1 с шагом, равным 0,025.

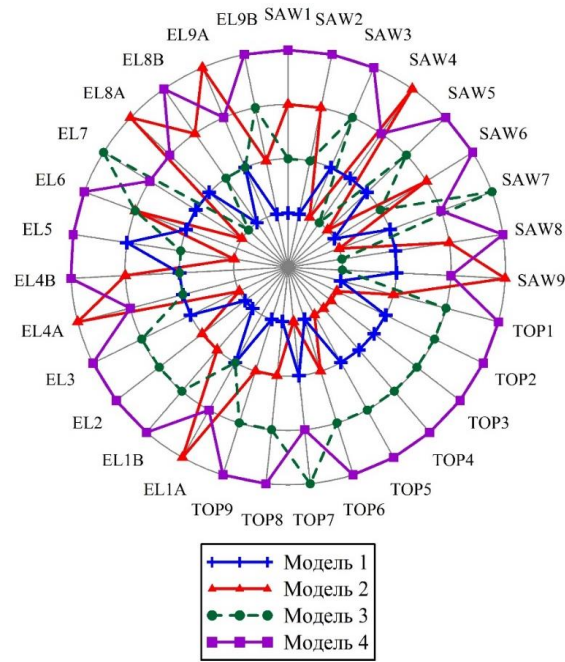


Рис. 5. Результаты ранжирования с учетом влияния погрешностей
 номера 1-9 – варианты учета влияния погрешностей; маркер «А» – максимизация уровня согласия (для ELECTRE); маркер «В» – минимизация уровня несогласия (для ELECTRE)

Fig. 5. Ranking results taking into account the influence of errors
 numbers 1-9 – options for taking into account the effect of errors; marker «A» – agreement level maximization (for ELECTRE); marker «B» – unconformity level minimization (for ELECTRE)

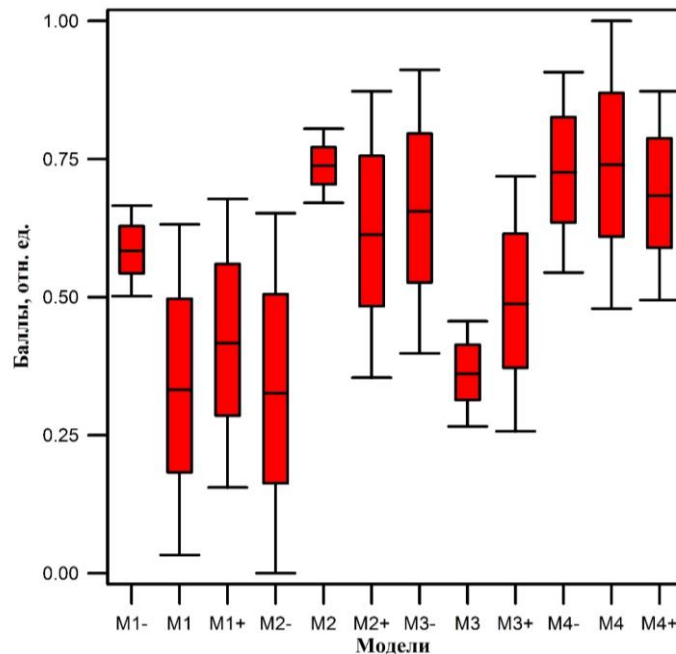


Рис. 6. Результаты анализа чувствительности решения многокритериальной задачи к коэффициенту важности:

M1, M2, M3, M4 – соответствующие расчетные модели;

знак «-» – вариант с значениями параметров отклоненными вниз на величину погрешности; знак «+» – вариант с значениями параметров отклоненными вверх на величину погрешности

Fig. 6. Sensitivity analysis of multi-criteria problem solution in accordance with importance factor:
M1, M2, M3, M4 – corresponding design models; sign «-» – option with parameter values deviated downward by the amount of error; sign «+» – option with parameter values deviated upward by the amount of error

В рамках данного анализа чувствительности были рассмотрены три варианта для каждой расчетной модели: мощность и давление учтены без отклонения (номинальный случай); и мощность, и давление отклонены вверх на величину погрешности; и мощность, и давление отклонены вниз на величину погрешности. Результаты анализа приведены на рис. 6 в виде диаграммы размаха по аналогии с [6]. По результатам варьирования коэффициентов превосходства в паре исследуемых параметров можно говорить о заметном влиянии значений этих коэффициентов на результат решения многокритериальной задачи. Стоит заметить, что модель 4 в отличие от остальных находится в верхней половине диаграммы (рис. 6) как в номинальном расчете, так и с учетом влияния погрешностей.

В ходе анализа чувствительности также были выявлены следующие тенденции:

- 1) при смещении веса в сторону большей важности мощности начинает лидировать модель 2;
- 2) при смещении веса в сторону большей важности давления модель 4 продолжает быть оптимальной;
- 3) в области значений коэффициента важности от 0,08 до 0,12 отн. ед. расчетные модели 2 и 4 близки друг к другу по итоговым баллам.

Заключение

Многокритериальные методы поддержки принятия решений, поддающиеся независимой проверке, позволили формализовать выбор расчетной модели динамики по критерию наименьшего отклонения расчетных мощности и давления от экспериментальных данных. При этом решения по всем используемым методам хорошо согласуются между собой как в номинальной постановке задачи, так и при учете погрешностей измерений.

В качестве наиболее предпочтительной признана модель 4 (с доминирующим вкладом канального теплоносителя в Т-эффект и квадратичной зависимостью коэффициента размножения от объемной неравномерности нейтронного поля). Вместе с тем, анализ чувствительности решения к варьируемой значимости (важности) контролируемых параметров показывает возможность смены модели-лидера с четвертой на вторую (с 50 % вкладом МКП в Т-эффект). Следовательно, представляется целесообразным расширение перечня анализируемых параметров для получения статистически более значимой оценки. Полученный результат, тем не менее, показывает возможность ограничения параметрической области исследований для получения следующего приближения в перспективе.

Положительный опыт исследований делает возможным расширение области использования аппарата многокритериальной оценки моделей, например, применительно к задачам обоснования безопасности при переориентации критериев оценки на консервативное описание динамики.

Библиографический список

1. **Кресов, Д.Г.** Методика учета влияния нейтронного поля на эффекты реактивности в инженерных расчетах / Д.Г. Кресов, Е.В. Оленская // «ВАНТ. Физика ядерных реакторов». 2023. Вып. 2. С. 40-46.
2. Программное средство *ЕСКМ-3Д*: Аттестационный паспорт программного средства / Организация разработчик : АО «ОКБМ Африкантов» / А.В. Давыдов, О.Б. Клочков, А.В. Куликов, Д.Г. Кресов // Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности. – М.: 2015. – 6 с. – Рег. номер ПС № 726 от 11.10.2011. Рег. номер паспорта аттестации ПС № 367 от 18.03.2015.
3. **Давыдов А.В.**, Клочков О.Б., Кресов Д.Г., Куликов А.В. / Программа *ЕСКМ-3Д* // Свидетельство о гос. регистрации №2011615838 от 27.07.2011.
4. **Ильмурзаева, Д.Р.** Анализ и сравнение алгоритмов многокритериального поиска на примере выбора центрифуг / Д.Р. Ильмурзаева, Т.В. Савицкая // *Успехи в химии и химической технологии*. 2020. Т. 14. № 6. С. 115-117.

5. Применение методов многокритериального анализа решений для сравнительной оценки вариантов ядерно-энергетических систем. Обзор заключительного отчета. IAEA INPRO. – 24 с. [Электронный ресурс] // Режим доступа: https://www.iaea.org/default/files/20/04/inpro-kind_rus.pdf (дата обращения 23.01.2024).
6. **Андрианов, А.А.** Сравнение моделей реакции глубокого расщепления на основе методов многокритериального анализа решений / А.А. Андрианов, Ю.А. Коровин, И.С. Купцов, А.Ю. Конобеев, О.Н. Андрианова // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2018 № 2. С. 157-168.
7. **Поддиновский, В.В.** Метод взвешенной суммы критериев в анализе многокритериальных решений: *pro et contra* / В.В. Поддиновский, М.А. Потапов // Бизнес-информатика. 2013. № 3(25). С. 41-48.
8. **Кочкина, М.В.** Анализ многокритериальных методов принятия управленческих решений (на примере задачи выбора поставщиков материально-технических ресурсов). Электронный образовательный ресурс для студентов экономических направлений подготовки / Составители: Кочкина М.В., Карамышев А.Н., Махмутов И.И., Исавин А.Г., Розенцвайг А.К. – Набережные Челны: Издательство-полиграфический центр НЧИ К(П)ФУ, 2017. – 31 с.
9. **Ларичев, О.И.** Теория и методы принятия решений, а также Хроника событий в Волшебных Странах: Учебник / О.И. Ларичев. – М.: Логос, 2000. – 296 с.
10. **Демидовский, А.В.** Сравнительный анализ методов многокритериального принятия решений: ELECTRE, TOPSIS и ML-LDM // Материалы Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://scm.etu.ru/assets/files/2020/scm20/papers/4/234.pdf> (дата обращения 15.01.2024)
11. **Поддиновский, В.В.** Идеи и методы теории важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений / В.В. Поддиновский. – М.: Наука, 2019. – 103 с.
12. **Ларичев, О.И.** Теория и методы принятия решений, а также Хроника событий в Волшебных странах: Учебник / О.И. Ларичев. – М.: Логос, 2002. – 392 с.

*Дата поступления
в редакцию: 19.02.2024*

*Дата принятия
к публикации: 10.04.2024*

УДК 621.039

EDN: HOZUUR

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ГАЗОВОЙ СИСТЕМЕ КОМПЕНСАЦИИ ДАВЛЕНИЯ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК ТИПА «РИТМ» В РЕЖИМЕ РАЗОГРЕВА

В.И. ПолуничевORCID: 0000-0003-1859-9616 e-mail: dep59@okbm.nnov.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***А.Ю. Савельев**ORCID: 0009-0009-2010-699X e-mail: alesha.savelev.com@mail.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***А.Н. Соколов**ORCID: 0009-0003-5313-9620 e-mail: asokmail@mail.ruАО «ОКБМ Африкантов», *Нижний Новгород, Россия***В.М. Сосин**ORCID: 0009-0004-5821-6290 e-mail: vmsosin@yandex.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Представлены результаты исследования возможных причин превышения проектных значений давления в первом контуре реакторных установок типа «РИТМ» с газовой системой компенсации давления в режимах разогрева, стационарной работы после разогрева и в переходных процессах. Проведен анализ тепло-гидравлических процессов, происходящих в оборудовании газовой системы компенсации давления в данных режимах, приводящих к изменению температуры воды и газа. Разработана методика расчета и представлены расчетные оценки процессов теплообмена в системе компенсации и первом контуре. Определено изменение температуры воды и газа в оборудовании системы и, в соответствии с этим, изменение давления в первом контуре. Исследованы процессы растворения, выделения и переноса газов в системе компенсации и первом контуре перед разогревом, в процессе и после разогрева. Разработана методика оценки влияния указанных процессов на давление в контуре, приведены результаты расчета. Предложены возможные варианты модернизации системы и изменения режимов работы установки.

Ключевые слова: универсальный атомный ледокол, реактор интегрального типа модульный (РИТМ), газовая система компенсации давления, теплообмен, растворение и выделение газа в теплоносителе, режим разогрева.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Полуничев, В.И. Анализ процессов теплообмена в газовой системе компенсации давления реакторных установок типа «РИТМ» в режиме разогрева / В.И. Полуничев, А.Ю. Савельев, А.Н. Соколов, В.М. Сосин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2024. № 2. С. 69-77. EDN: HOZUUR

ANALYSIS OF HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES IN GAS PRESSURE COMPENSATION SYSTEM OF RITM TYPE REACTOR INSTALLATIONS IN HEATING MODE

V.I. PolunichevORCID: 0000-0003-1859-9616 e-mail: dep59@okbm.nnov.ruNizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.Yu. Savelyev

ORCID: **0009-0009-2010-699X** e-mail: **alesha.savelev.com@mail.ru**

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

A.N. Sokolov

ORCID: **0009-0003-5313-9620** e-mail: **asokmail@mail.ru**

«Afrikantov» Joint Stock Company
Nizhny Novgorod, Russia

V.M. Sosin

ORCID: **0009-0004-5821-6290** e-mail: **vmsosin@yandex.ru**

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

Abstract. This paper presents the results of a study of possible reasons for pressure increase above design values in the primary circuit of RITM type reactor installations with a gas pressure compensation system in heating modes, stationary operation after heating and in transients. An analysis of thermal-hydraulic processes occurring in the equipment of the gas pressure compensation system in these modes, leading to changes in the temperature of water and gas, was carried out. A calculation method has been developed and estimates of heat and mass transfer processes in the compensation system and the primary circuit were carried out. The change in temperature of water and gas in the system equipment and the change in pressure in the primary circuit were determined. The processes of dissolution, release and transfer of gases in the compensation system and the primary circuit before heating, during and after heating were studied. A methodology for assessing the influence of these processes on the pressure in the circuit has been developed, and the calculation results are presented. Possible options for upgrading the system and changing the operating modes of the installation are proposed.

Key words: universal nuclear icebreaker, reactor integral type modular (RITM), gas pressure compensation system, heat and mass transfer, dissolution and release of gas in the coolant, heating mode.

FOR CITATION: V.I. Polunichev, A.Yu. Savelyev, A.N. Sokolov, V.M. Sosin. Analysis of heat and mass transfer processes in gas pressure compensation system of RITM type reactor installations in heating mode. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 2. Pp. 69-77. EDN: HOZUUR

Введение

Исследованиям процессов растворения, выделения и переноса газов в первом контуре и их влиянию на характеристики реакторных установок (РУ) посвящено ограниченное количество работ. Наиболее системно они исследованы еще в начале развития атомной энергетики [1, 2]. В работе [2] в общем плане эти процессы рассмотрены для РУ с газовой системой компенсации. Вместе с тем, к настоящему времени накоплен обширный опыт эксплуатации таких установок на отечественных атомных судах, при этом выявлены некоторые проблемы в работе систем компенсации и их негативное влияние на работу РУ в различных режимах, которые полностью не решены до настоящего времени.

Современные установки типа «РИТМ» для новых ледоколов и станций малой мощности имеют газовую систему компенсации давления (СКД), отличающуюся от предыдущих поколений. В систему, кроме компенсаторов, введены гидроаккумуляторы (ГА), на некоторых новых установках газ системы компенсации полностью сосредоточен в КД и ГА, в то время как в системе компенсации установок предыдущих поколений типа ОК-900 основная часть газа находится в баллонах, расположенных в аппаратном помещении, в котором температура поддерживается системой кондиционирования в узком диапазоне. Кроме того, увеличен объем первоначального заполнения теплоносителем оборудования системы компенсации, в КД установлены буферные емкости (БЕ). В ходе испытаний установки РИТМ-200 головного

универсального атомного ледокола в режиме разогрева при достижении температуры теплоносителя первого контура близкой к номинальной, имело место нехарактерное для РУ типа ОК-900 превышение давлением проектных значений (рис. 1). При дальнейшей работе установки после разогрева давление некоторое время медленно снижалось на значительную величину, затем стабилизировалось. Подобные процессы также не наблюдались в РУ типа ОК-900, и проектные расчетные данные не предсказывали таких результатов. Эти обстоятельства потребовали поиска причин указанных явлений.

Целью данной работы является анализ возможных процессов, вызвавших повышение давления в первом контуре при разогреве РУ и его снижение через некоторое время после разогрева.

Основные задачи работы:

- исследование тепло-гидравлических процессов, происходящих в газовой системе компенсации давления в данном режиме, влияющих на температуру воды и газа в оборудовании системы компенсации;
- анализ процессов растворения и переноса газа в системе;
- разработка методик и выполнение расчетных оценок;
- разработка предложений по возможным вариантам модернизации системы и оптимизации режима разогрева.

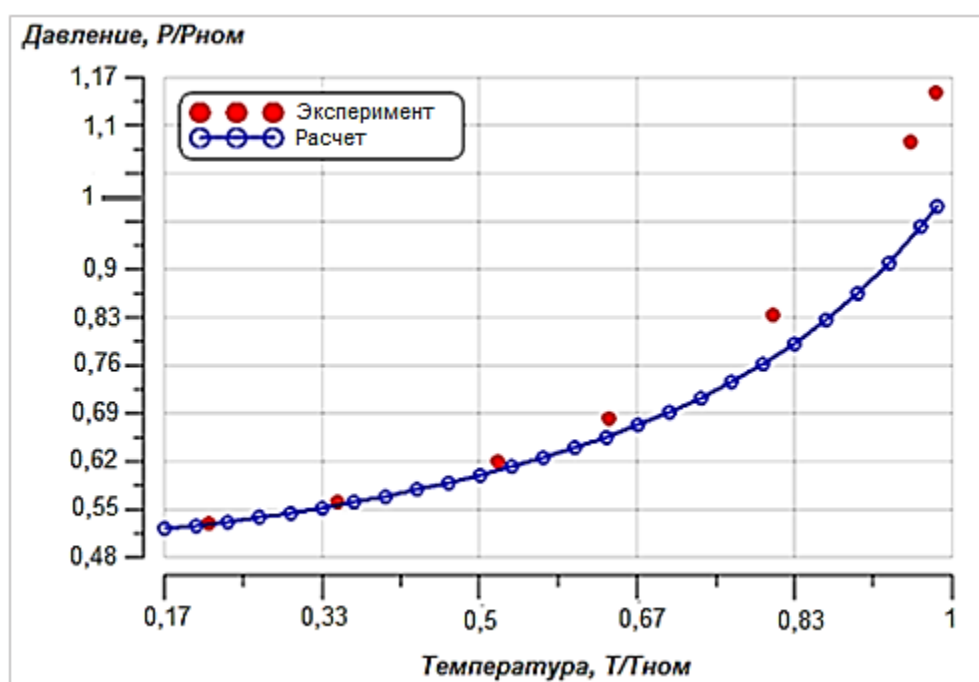


Рис. 1. Зависимость давления первого контура от температуры при разогреве РУ

Fig 1. Dependence of pressure of the primary circuit on temperature during heating of the reactor installation

Ранее в этом направлении были проведены исследования, результаты которых, в частности, опубликованы в [3]. В данной работе проанализированы процессы растворения, выделения и переноса газа в теплоносителе первого контура в РУ типа «РИТМ» и влияние этих процессов на изменение давления в режимах разогрева и расхолаживания. При этом принималось, что в режимах разогрева и нормальной работы температура воды и газа в КД и ГА остается одинаковой и неизменной. Однако данная предпосылка потребовала расчетного обоснования в связи с тем, что реально полученное давление в первом контуре в режиме разогрева установки при испытаниях оказалось существенно выше расчетного.

На первом этапе проведено исследование изменения температуры воды и газа в системе компенсации в режиме разогрева: разработана методика оценки температуры этих сред в режиме разогрева и выполнен расчет.

Методика расчета температур воды и газа в системе компенсации давления в режиме разогрева

Процессы тепломассопереноса при расчете температурных полей в оборудовании системы компенсации в режиме разогрева исследовались в соответствии с расчетной схемой (рис. 2).

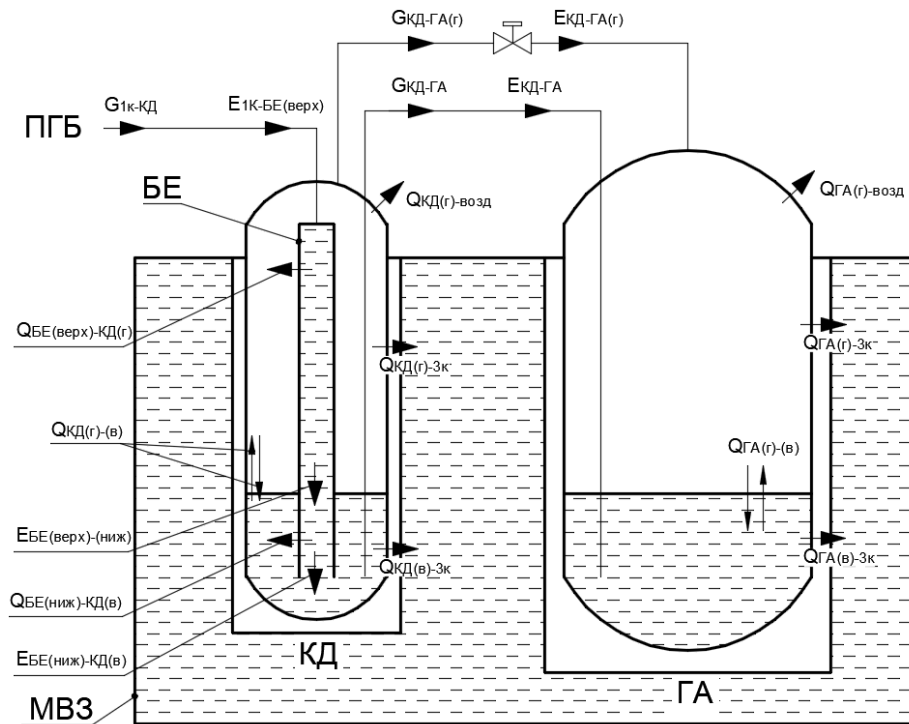


Рис. 2. Расчетная схема системы компенсации давления

Fig. 2. Calculation diagram of the pressure compensation system

Стрелками показаны:

- G_{i-j} – перенос массы воды (газа) от i к j ;
- E_{l-n} – передача тепла от l к n вместе с массой G_{i-j} ;
- Q_{l-n} – передача тепла через поверхность между l и n ;

$$E_{l-n} = G_{i-j} \cdot C_p(\bar{T}_{l-n}) \cdot \Delta T_{l-n}$$

$$Q_{l-n} = k_{l-n} \cdot F_{l-n} \cdot \Delta T_{l-n}$$

где $C_p(\bar{T}_{l-n})$ – изобарная теплоемкость при средней между l и n температуре $\bar{T}_{l-n} = \frac{T_l + T_n}{2}$;

$\Delta T_{l-n} = T_n - T_l$; k_{l-n} – коэффициент теплопередачи, характеризующий теплообмен между l и n ;

F_{l-n} – площадь теплообмена между l и n .

Индексы i, j, l, n указывают на емкость, из которой или в которую переносится масса или тепло. Например, $E_{\text{БЕ(ниж)-КД}}$ – означает передачу тепла от нижней части буферной емкости к КД вместе с массой воды расходом $G_{1к-КД}$; $Q_{\text{ГА(в)-(г)}}$ – характеризует теплообмен между водой и газом в ГА через поверхность испарения.

1. Уравнения сохранения энергии:

– для воды в верхней части БЕ:

$$m_{\text{БЕ(в)}}^{\text{верх}} \cdot \text{Cp}(T_{\text{БЕ}}^{\text{верх}}) \frac{dT_{\text{БЕ(в)}}^{\text{верх}}}{d\tau} = E_{1\text{к}-\text{БЕ(верх)}} - Q_{\text{БЕ(верх)}-\text{КД(г)}}, \quad (1)$$

где m – масса; T – температура; $\text{Cp}(T)$ – изобарная теплоемкость при температуре T ; τ – время;

– для воды в нижней части БЕ:

$$m_{\text{БЕ(в)}}^{\text{ниж}} \cdot \text{Cp}(T_{\text{БЕ}}^{\text{ниж}}) \frac{dT_{\text{БЕ(в)}}^{\text{ниж}}}{d\tau} = E_{\text{БЕ(верх)}-\text{БЕ(ниж)}} - Q_{\text{БЕ(ниж)}-\text{КД(в)}}; \quad (2)$$

– для воды в КД:

$$m_{\text{в}}^{\text{КД}} \cdot \text{Cp}(T_{\text{в}}^{\text{КД}}) \frac{dT_{\text{в}}^{\text{КД}}}{d\tau} = E_{\text{БЕ(ниж)}-\text{КД}} + Q_{\text{БЕ(ниж)}-\text{КД}} - Q_{\text{КД(в)}-\text{зк}} + Q_{\text{КД(в)}-(\text{г})}, \quad (3)$$

где индекс зк – вода третьего контура в баке МВЗ;

– для воды в ГА:

$$m_{\text{в}}^{\text{ГА}} \cdot \text{Cp}(T_{\text{в}}^{\text{ГА}}) \frac{dT_{\text{в}}^{\text{ГА}}}{d\tau} = E_{\text{КД}-\text{ГА}} - Q_{\text{ГА(в)}-\text{зк}} + Q_{\text{ГА(в)}-(\text{г})}; \quad (4)$$

– для газа в КД:

$$m_{\text{г}}^{\text{КД}} \cdot \text{Cp}(T_{\text{г}}^{\text{КД}}) \frac{dT_{\text{г}}^{\text{КД}}}{d\tau} = Q_{\text{БЕ(верх)}-\text{КД(г)}} - Q_{\text{КД(г)}-\text{зк}} - Q_{\text{КД(г)}-\text{возд}} - Q_{\text{КД(в)}-(\text{г})} + A_{\text{КД}}^{\text{газ}}, \quad (5)$$

где A – энергия сжатого газа, индекс возд – воздух в реакторном помещении;

– для газа в ГА:

$$m_{\text{г}}^{\text{ГА}} \cdot \text{Cp}(T_{\text{г}}^{\text{ГА}}) \frac{dT_{\text{г}}^{\text{ГА}}}{d\tau} = E_{\text{КД}-\text{ГА(г)}} - Q_{\text{ГА(г)}-\text{зк}} - Q_{\text{ГА(г)}-\text{возд}} - Q_{\text{ГА(в)}-(\text{г})} + A_{\text{ГА}}^{\text{газ}}. \quad (6)$$

2. Уравнения сохранения массы:

– для воды в КД:

$$\frac{dm_{\text{в}}^{\text{КД}}}{d\tau} = G_{1\text{к}-\text{КД}} - G_{\text{КД}-\text{ГА}}; \quad (7)$$

– для воды в ГА:

$$\frac{dm_{\text{в}}^{\text{ГА}}}{d\tau} = G_{\text{КД}-\text{ГА}}. \quad (8)$$

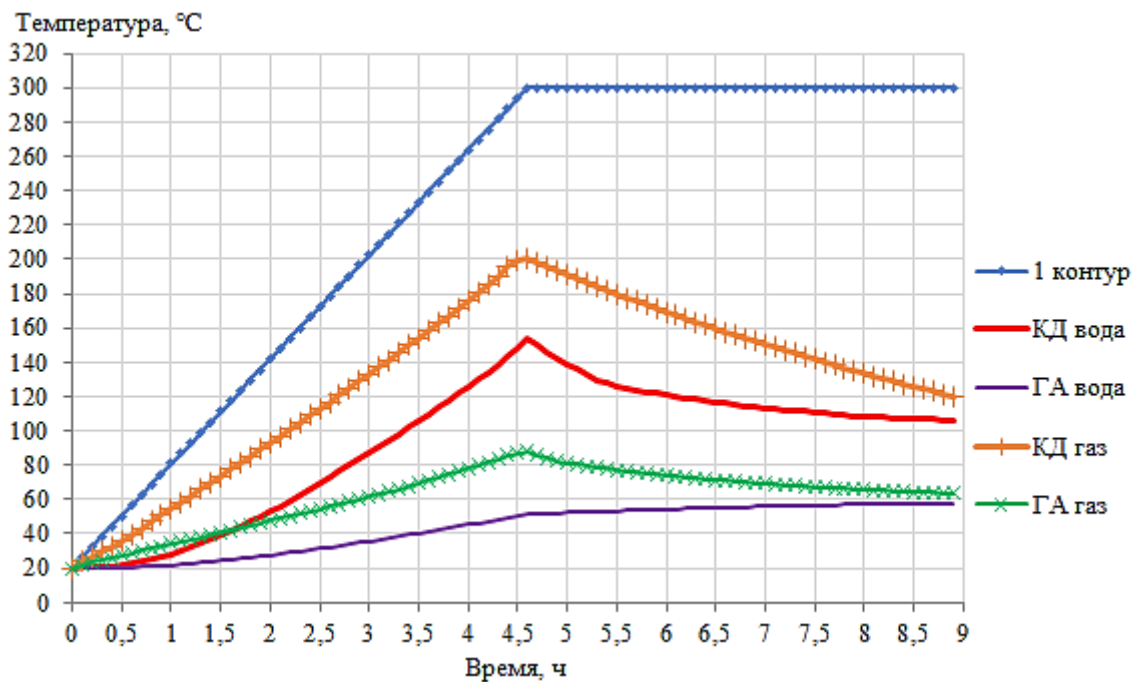
2. Уравнение сохранения количества движения газа из КД в ГА:

$$\frac{L_{\text{КД}-\text{ГА}}}{S_{\text{КД}-\text{ГА}}} \cdot \frac{dG_{\text{КД}-\text{ГА(г)}}}{d\tau} = (P_{\text{КД}} - P_{\text{ГА}} - \Delta P_{\text{пот}}), \quad (9)$$

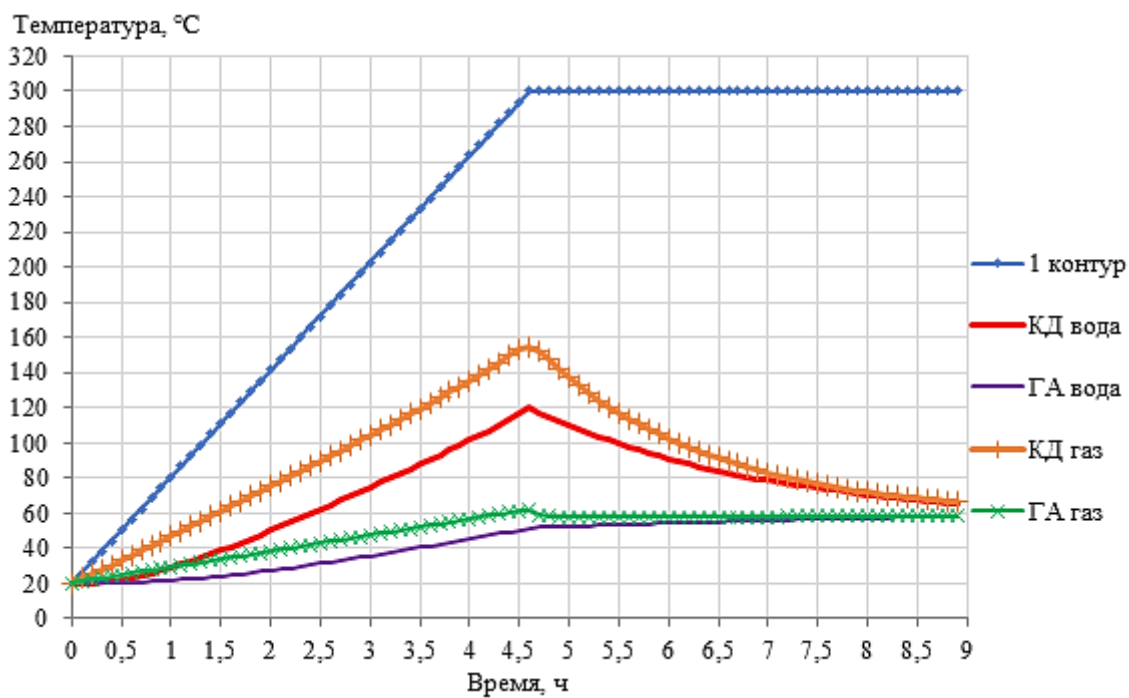
где $L_{\text{КД}-\text{ГА}}$, $S_{\text{КД}-\text{ГА}}$ – длина и площадь проходного сечения трубопровода, соединяющего КД и ГА по газу; $P_{\text{КД}}$, $P_{\text{ГА}}$ – давление в КД, ГА; $\Delta P_{\text{пот}}$ – потери давления.

Для расчета температур использовались следующие исходные данные: $P_0 = 6,6$ МПа – давление первого контура в расхоленном состоянии; $T_0 = 20$ °С – температура в расхоленном состоянии; $\bar{T}_{1\text{к}} = 300$ °С – средняя температура теплоносителя в номинальном режиме; $V_{1\text{к}} = 25$ м³ – объем первого контура (без СКД); $V^{\text{КД}} = 6,8$ м³ – объем КД; $V^{\text{ГА}} = 15$ м³ – объем ГА; $V_{\text{пз}}^{\text{КД}} = 2,72$ м³, $V_{\text{пз}}^{\text{ГА}} = 6$ м³ – объемы первоначальной заливки в КД и ГА соответственно. Скорость разогрева РУ выбрана усредненной 60 °С/ч, при максимальных значениях 50 °С/ч до достижения 200 °С и 100 °С/ч, начиная от 200 °С. Результаты расчета температур при решении системы уравнений (1)-(9) представлены на рис. 3 (а).

Расчет был проведен по схеме (рис. 2), в которой КД и ГА расположены в «сухом» кессоне, их охлаждение происходит водой бака металловодной защиты (МВЗ) через слой воздуха. Оценочный расчет проведен и для другой схемы, в которой КД и ГА размещены непосредственно в воде бака МВЗ. Результаты приведены на рис. 3 (б).



а)



б)

Рис. 3. Распределение температур в первом контуре и системе компенсации в режиме разогрева при размещении элементов системы: а) в «сухом» кессоне; б) в воде бака МВЗ

Fig. 3. Temperature distribution in the primary circuit and compensation system in the heating mode when placing system elements: a) in a «dry» caisson; b) in the water of the metal-water protection tank

Результаты расчета показывают большой рост температур воды и газа в компенсаторе при разогреве РУ. При расположении КД в «сухом» кессоне температуры газа и воды в нем в конце разогрева достигают соответственно 200 и 150 °С, при размещении КД в воде бака МВЗ – соответственно 160 и 120 °С. Проектное значение температуры в системе компенсации со-

ставляют 60 °С, что значительно ниже полученных результатов. Из расчета следует, что основное влияние на повышение температуры в режиме разогрева оказывает буферная емкость, в которой вода находится при высокой температуре. Размещение компенсатора давления в воде бака МВЗ существенного снижения температуры не вызвало. На втором этапе выполнен анализ влияния изменения температуры воды и газа в системе компенсации на давление в первом контуре, разработана методика оценки данного изменения, проведены оценочные расчеты.

Методика расчета изменения давления в первом контуре при изменении температуры в системе компенсации в режиме разогрева

Масса воды, вытесненной из первого контура в систему компенсации:

$$m_{\text{ВВ}} = V_{1\text{К}}(\rho_{0\text{В}} - \rho_{1\text{В}}), \quad (10)$$

где $\rho_{0\text{В}}, \rho_{1\text{В}}$ – плотности воды в первом контуре в начале и конце разогрева.

Масса воды первоначальной заливки в КД и ГА:

$$m_{\text{ПЗ}}^{\text{КД}} = V_{\text{ПЗ}}^{\text{КД}} \cdot \rho_{0\text{В}} m_{\text{ПЗ}}^{\text{ГА}} = V_{\text{ПЗ}}^{\text{ГА}} \cdot \rho_{0\text{В}}. \quad (11)$$

В конце разогрева уровни воды в КД и ГА различны из-за разности температур. Условие равновесия исходит из равенства гидростатических давлений:

$$\rho_{1\text{В}}^{\text{КД}} \cdot h_{1\text{В}}^{\text{КД}} = \rho_{1\text{В}}^{\text{ГА}} \cdot h_{1\text{В}}^{\text{ГА}}, \quad (12)$$

где $\rho_{1\text{В}}^{\text{КД}}, \rho_{1\text{В}}^{\text{ГА}}$ – плотности воды в конечном состоянии; $h_{1\text{В}}^{\text{КД}}, h_{1\text{В}}^{\text{ГА}}$ – установившиеся высоты в КД и ГА.

Представляя высоту как отношение объема к площади поперечного сечения, а объем как отношение массы к плотности и учитывая (12), получаем соотношение:

$$\frac{m_{1\text{В}}^{\text{КД}}}{S_{\text{КД}}} = \frac{m_{1\text{В}}^{\text{ГА}}}{S_{\text{ГА}}}, \quad (13)$$

где $m_{1\text{В}}^{\text{КД}}, m_{1\text{В}}^{\text{ГА}}$ – массы воды в конечном состоянии; $S_{\text{КД}}, S_{\text{ГА}}$ – площади поперечных сечений, $\frac{S_{\text{КД}}}{S_{\text{ГА}}} = 0,45$.

По закону сохранения массы воды в СКД:

$$m_{\Sigma} = m_{\text{ВВ}} + m_{\text{ПЗ}}^{\text{КД}} + m_{\text{ПЗ}}^{\text{ГА}} = m_{1\text{В}}^{\text{КД}} + m_{1\text{В}}^{\text{ГА}} = \text{const} \quad (14)$$

Установившиеся объемы воды в КД и ГА:

$$V_{1\text{В}}^{\text{КД}} = \frac{m_{1\text{В}}^{\text{КД}}}{\rho_{1\text{В}}^{\text{КД}}} V_{1\text{В}}^{\text{ГА}} = \frac{m_{1\text{В}}^{\text{ГА}}}{\rho_{1\text{В}}^{\text{ГА}}}. \quad (15)$$

Объемы газа в КД и ГА в конце разогрева:

$$V_{1\text{Г}}^{\text{КД}} = V^{\text{КД}} - V_{1\text{В}}^{\text{КД}} V_{1\text{Г}}^{\text{ГА}} = V^{\text{ГА}} - V_{1\text{В}}^{\text{ГА}}. \quad (16)$$

Уравнения состояния газа в КД и ГА в начале и конце разогрева:

$$P_0 V_{0\text{Г}}^{\text{КД}} = m_{0\text{Г}}^{\text{КД}} R T_0 P_0 V_{0\text{Г}}^{\text{ГА}} = m_{0\text{Г}}^{\text{ГА}} R T_0, \quad (17)$$

$$P_1 V_{1\text{Г}}^{\text{КД}} = m_{1\text{Г}}^{\text{КД}} R T_{1\text{Г}}^{\text{КД}} P_1 V_{1\text{Г}}^{\text{ГА}} = m_{1\text{Г}}^{\text{ГА}} R T_{1\text{Г}}^{\text{ГА}}, \quad (18)$$

где P_1 – давление в первом контуре в конце разогрева, $T_{1\text{Г}}^{\text{КД}}, T_{1\text{Г}}^{\text{ГА}}$ – температуры газа в конце разогрева в КД и ГА соответственно, $m_{0\text{Г}}^{\text{КД}}, m_{0\text{Г}}^{\text{ГА}}$ – начальные массы газа, $m_{1\text{Г}}^{\text{КД}}, m_{1\text{Г}}^{\text{ГА}}$ – конечные массы газа после разогрева, R – газовая постоянная.

Давление P_1 в КД и ГА одинаково, выражение (18) записывается:

$$\frac{m_{1\text{Г}}^{\text{КД}}}{V_{1\text{Г}}^{\text{КД}}} T_{1\text{Г}}^{\text{КД}} = \frac{m_{1\text{Г}}^{\text{ГА}}}{V_{1\text{Г}}^{\text{ГА}}} T_{1\text{Г}}^{\text{ГА}}. \quad (19)$$

В процессе разогрева газ массой Δm перемещается из КД в ГА. С учетом (17)-(19) формируется система:

$$\begin{cases} m_{1Г}^{КД} = m_{0Г}^{КД} - \Delta m \\ m_{1Г}^{ГА} = m_{0Г}^{ГА} + \Delta m \\ \frac{m_{1Г}^{КД}}{V_{1Г}^{КД}} T_{1Г}^{КД} = \frac{m_{1Г}^{ГА}}{V_{1Г}^{ГА}} T_{1Г}^{ГА} \\ \frac{P_1}{P_0} = \frac{V_{0Г}^{КД}}{V_{1Г}^{КД}} \cdot \frac{m_{1Г}^{КД}}{m_{0Г}^{КД}} \cdot \frac{T_{1Г}^{КД}}{T_0} \end{cases} \quad (20)$$

Данные для расчета давления в конце разогрева взяты из предыдущего раздела: начальное давление P_0 , объемы воды и газа, температуры воды и газа в КД и ГА (рис. 3). При решении системы (20), с учетом (10)-(16), получены следующие результаты: давление первого контура в конце разогрева при расположении КД и ГА в «сухом» кессоне $P_1 = 19,47$ МПа; при расположении в воде бака МВЗ – $P_1 = 17,52$ МПа. Высокая температура в компенсаторе в конце разогрева вызывает существенный рост давления в первом контуре. При размещении оборудования в «сухом» кессоне давление превышает номинальное значение на 3,38 МПа, при размещении в воде бака МВЗ – на 1,43 МПа.

На третьем этапе проведена оценка влияния растворения газа в теплоносителе после разогрева на снижение давления.

Оценка влияния растворения газа в теплоносителе после разогрева на снижение давления в первом контуре

В процессе разогрева, который длится около пяти часов, вода из первого контура вытесняется в систему компенсации, при этом газоперенос из системы компенсации в первый контур отсутствует. Дополнительное растворение газа в воде системы компенсации при установившемся давлении после разогрева происходит медленно и занимает более сотни часов [4], поэтому количеством растворившегося газа в воде системы компенсации за время разогрева можно пренебречь.

При дальнейшей длительной работе РУ после разогрева с температурой в КД и ГА на уровне $T_{уст} = 60^\circ\text{C}$ и давлении $P_{1к} = 16,09$ МПа продолжается растворение газа в воде КД и ГА и перенос его за счет массообмена в воду первого контура до достижения равновесной концентрации при установившихся параметрах [4]. Давление при этом снижается.

$$P'_{1к} = P_{1к} \frac{V_{Г} - V_{рас}}{V_{Г}}, \quad (21)$$

где $V_{Г} = 6,1\text{м}^3$ – суммарный объем газа в СКД до растворения, $V_{рас}$ – объем газа, растворившегося в воде СКД и первого контура.

Перед разогревом установки ($P_0 = 6,6\text{МПа}$, $T_0 = 20^\circ\text{C}$) вода первого контура и системы компенсации содержит растворенный газ концентрацией C_0 . После процессов разогрева, стабилизации температур в СКД, растворения газа его концентрация в воде равна C . Объем растворившегося газа:

$$V_{рас} = (C - C_0) \cdot m_{в}^{сум}, \quad (22)$$

где $m_{в}^{сум}$ – суммарная масса воды в первом контуре и системе компенсации.

По закону Генри:

$$C_0 = k(T_0) \cdot (P_0 - P_S(T_0)), \quad (23)$$

$$C = k(T_{уст}) \cdot (P_{1к} - P_S(T_{уст})), \quad (24)$$

где $k(T)$ – коэффициент Генри при температуре T , $P_S(T)$ – давление насыщенных паров при T .

Результаты решения уравнения (21), с учетом (22)-(24) показали снижение давления в первом контуре за счет дополнительного растворения газа с 16,09 МПа до 15,58 МПа, т.е. на 0,51 МПа. Если разогрев установки производится после расхолаживания со снятием давления до атмосферного, то падение давления практически удваивается [3]. Длительная работа установки с такими отклонениями от номинального давления предполагается недопустимой.

Заключение

Анализ процессов тепломассопереноса в газовой системе компенсации давления при разогреве РУ показал следующие результаты: температура воды и газа в компенсаторе в режиме разогрева повышается и значительно превышает проектные значения в конце разогрева; это приводит к превышению номинального давления в первом контуре на 3,38 МПа при размещении оборудования системы компенсации в «сухом» кессоне и на 1,43 МПа – при размещении в воде бака МВЗ.

В процессе дальнейшей работы установки после разогрева происходит растворение газа в воде системы компенсации до равновесной концентрации при установившемся давлении и перенос его в первый контур до выравнивания концентраций. При этом часть газа дополнительно уходит в раствор, что вызывает снижение давления на 0,51 МПа относительно номинального при любом размещении оборудования системы компенсации. Такие отклонения давления в первом контуре в рассматриваемом режиме существенно превышают допустимые и требуют поиска решений.

Для снижения влияния на давление температуры газа в системе компенсации при разогреве и нормальной работе установки предлагаются следующие три варианта.

1. Увеличить объем газа в СКД, при этом большую его часть разместить в кондиционируемом помещении с регулируемой температурой для поддержания давления в узком диапазоне, например, в аппаратной, как это было на установках типа ОК-900 на атомных судах и плавучей атомной станции.
2. Исключить из компенсатора буферную емкость и установить ее в виде отдельной конструкции на трубопроводе между ПГБ и компенсатором.
3. Снизить скорость разогрева установки.

Для снижения влияния на уменьшение давления растворения газа в воде СКД и первого контура предлагается снизить объем воды в СКД за счет исключения гидроаккумуляторов из системы компенсации и уменьшения объема воды первоначальной заливки, а также увеличить объем газа в системе компенсации.

При проектировании РУ с ВВР и газовой системой компенсации давления необходимо учитывать процессы, рассмотренные в данной работе, и анализировать альтернативные варианты систем, в том числе, паровую систему компенсации.

Библиографический список

1. Коэн, П. Технология воды энергетических реакторов / П. Коэн. – М.: Атомиздат, 1973. – 327 с.
2. Герасимов, В.В. Водный режим атомных электростанций / В.В. Герасимов, А.И. Касперович, О.И. Мартынова. – М.: Атомиздат. 1976. – 398 с.
3. Полуничев, В.И. Исследование процессов растворения, выделения и переноса газов в первом контуре реакторных установок и их влияния на точность поддержания давления в первом контуре / В.И. Полуничев, М.С. Кабина // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. № 3 (142). С. 71-81.
4. Филимонов, А.Ф. Газовыделение и газоперенос в оборудовании первого контура реакторных установок с газовой системой компенсации давления / А.Ф. Филимонов, В.И. Полуничев, А.Е. Помысухина // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. № 3 (106). С.101-110.

*Дата поступления
в редакцию: 01.04.2024*

*Дата принятия
к публикации: 25.04.2024*

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 629.3

EDN: LLNATD

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ С РОТОРНО-ВИНТОВЫМ ДВИЖИТЕЛЕМ

А.А. АникинORCID: 0000-0003-0368-4199 e-mail: anikin.zvm@mail.ruНижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***С.А. Карасева**ORCID: 0000-0002-1666-777X e-mail: geliosveta@gmail.ruНижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***Ю.И. Молев**ORCID: 0000-0002-0429-4590 e-mail: moleff@yandex.ruНижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***У.Ш. Вахидов**ORCID: 0000-0003-4109-8406 e-mail: umar-vahidov@mail.ruНижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***В.В. Беляков**ORCID: 0000-0003-0203-9403 e-mail: belyakov@nntu.ruНижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***В.С. Макаров**ORCID: 0000-0002-4423-5042 e-mail: makv12010@gmail.comНижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Рассмотрены результаты экспериментальных исследований транспортно-технологической платформы с роторно-винтовым движителем (ТТП с РВД). Представлены основные характеристики и внешний облик ТТП РВД ЗВМ 2902 производства ООО «Завод вездеходных машин», определены цель, задачи и основные параметры ее испытаний. Дано краткое описание применяемых приборов и оборудования, а также измеряемых величин. Испытания проведены на трех характерных участках с разными значениями влажности и прочностным свойствам илового осадка, а также на воде (мерные участки на иловых площадках длиной 20 м и длиной 50 м на воде). Получены значения скоростей движения ТТП с РВД от частоты вращения роторов. Построены графики изменения тяги на крюке ТТП с РВД в зависимости от влажности илового осадка при движении на различных передачах, а также от скорости вращения движителей на участках с различной влажностью ила и на воде, даны значения

расхода топлива. Анализ полученных результатов позволяет дать рекомендации по повышению производительности и проходимости амфибийной ТТП с РВД. Данная работа продолжает исследования Нижегородской научно-практической школы транспортного снеговедения.

Ключевые слова: проходимость, роторно-винтовой движитель, испытания, ил, вода, тяга на крюке, скорость, топливная экономичность.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Аникин, А.А. Экспериментальные исследования транспортно-технологической платформы с роторно-винтовым движителем / А.А. Аникин, С.А. Карасева, У.Ш. Вахидов, В.В. Беляков, В.С. Макаров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2024. № 1. С. 78-89. EDN: LLNATD

EXPERIMENTAL STUDIES OF TRANSPORTATION AND TECHNOLOGICAL PLATFORM WITH ROTARY-SCREW PROPULSOR

A.A. Anikin

ORCID: **0000-0003-0368-4199** e-mail: **anikin.zvm@mail.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

S.A. Karaseva

ORCID: **0000-0002-1666-777X** e-mail: **geliosveta@gmail.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Y.I. Molev

ORCID: **0000-0002-0429-4590** e-mail: **moleff@yandex.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

U.Sh. Vakhidov

ORCID: **0000-0003-4109-8406** e-mail: **umar-vahidov@mail.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

V.V. Belyakov

ORCID: **0000-0003-0203-9403** e-mail: **belyakov@nntu.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

V.S. Makarov

ORCID: **0000-0002-4423-5042** e-mail: **makv12010@gmail.com**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

The paper discusses the results of experimental studies of a technological platform with a rotary-screw propulsion unit. The main characteristics and external appearance of the research object TTP RVD ZVM 2902 produced by company JSC «Zavod vezdekhodnykh mashin» are presented. The purpose and objectives of testing an amphibious transport and technological platform with a rotary-screw propulsion unit (TTP with RSP) are given. The main parameters that need to be obtained when testing an amphibious TTP with a rotary-screw propulsion unit have been determined. A brief description of the instruments and equipment used for testing is given, and the measured quantities are shown. The tests were carried out in three characteristic areas with different humidity values and strength properties of the silt sediment, as well as on water. Tests were carried out on measuring sections 20 m long on silt pads and 50 m long on water. The results of tests of an amphibious TTP with a rotary-screw propulsor are presented. The values of the speed of movement of a TTP with a rotary-screw propulsor were obtained depending on the rotor speed. Diagrams of changes in drawbar

pull of a TTP with a rotary-screw propulsor were constructed depending on the moisture content of the sludge sediment when moving in various gears, as well as on the rotation speed of the propulsors in areas with different moisture content of the sludge and on water. Fuel consumption values are given. Analysis of the results obtained allows us to draw some conclusions and make recommendations aimed at increasing the performance and cross-country ability of an amphibious vehicle with a rotary-screw propulsion unit. This work was carried out as a continuation of research conducted at the Nizhny Novgorod Scientific and Practical School of Transport Snow Science.

Key words: crossability, rotary-screw propulsor, tests, silt, water, drawbar pull, speed, fuel efficiency.

FOR CITATION: Anikin A.A., S.A. Karaseva, Yu.I. Molev, U.Sh. Vakhidov, V.V. Belyakov, V.S. Makarov. Experimental studies of transportation and technological platform with rotary-screw propulsor. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 2. Pp. 78-89. EDN: LLNATD

Введение

Данная работа продолжает исследования транспортно-технологических машин с роторно-винтовым двигателем [1-2], проводившиеся Нижегородской научно-практической школе транспортного снеговедения [3-6]. Большой вклад в разработку данных машин внесли ученые и исследователи из Отраслевой научно-исследовательской лаборатории вездеходных машин (ОНИЛ ВМ) и научно-исследовательской лаборатории по разработке льда, снега и мерзлого грунта (РАЛСЧЕМГ) при Горьковском политехническом институте (ныне Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева – НГТУ) [7, 8]. Их исследования продолжили А.Ф. Николаев, А.П. Куляшов, Ю.П. Адясов, В.Е. Колотилин, Л.С. Левшунов, В.Н. Худяков, В.А. Шапкин, Ю.И. Молев, У.Ш. Вахидов, В.В. Беляков, В.С. Макаров

Машины с роторно-винтовым двигателем (РВД) имеют ограниченную область применения, тем не менее, интерес к ним в последние годы возобновился. Так, в НГТУ им. Р.Е. Алексеева были проведены научно-исследовательские работы по исследованию вибраций и шума, создаваемыми данными машинами при движении [9-17], также изучались водоходные качества машин с РВД [18-21]. Большой комплекс работ был посвящен применению машин с РВД в качестве спасательных средств при эвакуации с нефтегазовых платформ, находящихся на арктическом шельфе [22-24]. Практическим результатом исследований стала разработка и создание двух образцов транспортно-технологических платформ с РВД (ТП с РВД) в НИЛ «Транспортных машин и транспортно-технологических комплексов» [25], ТП с РВД ЗВМ-2901 и ТП с РВД ЗВМ-2902. Серийно данные машины производятся в ООО «Завод Вездеходных Машин» [26].

В рамках данной статьи приведены результаты экспериментальных исследований и испытаний по определению основных динамических и эксплуатационных качеств транспортно-технологической платформы с роторно-винтовым двигателем ТП с РВД ЗВМ-2902.

Одна из задач ТП с РВД – механизированная обработка иловых площадок (перемешивания ила), что необходимо для станций аэрации в комплексе очистных сооружений. Однако практика эксплуатации иловых площадок показывает, что процесс обезвоживания иловых осадков в естественных условиях протекает неудовлетворительно. На площадках хорошо приживаются сорняки, которые быстро покрывают всю их поверхность, что вызывают заболачивание и замедляет процесс обезвоживания иловых осадков. В этих условиях особо важно ускорить процесс обезвоживания осадка в естественных условиях, для чего необходимо перемешивание ила. Однако специфические физико-механические свойства илообразных осадков, их низкая несущая способность и значительная глубина (до 3 м) исключают возможность применения для их обработки существующих гусеничных и колесных машин, а также средств с судовыми двигателями. Применение машины с РВД для обработки иловых площадок основано на том, что роторно-винтовые двигатели могут иметь большое водоизмещение, позволяющее обеспечивать допустимое погружение их в ил под весом машины. В этих условиях винтовые

лопасти движителей при вращении способны создать силу тяги, превышающую сопротивление движению машины. При взаимодействии лопасти с илом происходит перемешивание верхнего слоя ила на глубину погружения лопасти. При определенной конструкции движителей обработка площадок может проводиться без дополнительных навесных или прицепных орудий. Подход к применению машин с РВД для обработки иловых площадок очистных сооружений в нашей стране был разработан в ОНИЛ ВМ во второй половине прошлого века. Поэтому данный опыт был применен при проектировании ТП с РВД ЗВМ-2901 и ТП с РВД ЗВМ-2902. Испытания, проведенные для машины ТП с РВД ЗВМ-2902 имеют практическую ценность и определенное научное значение.

Описание объекта испытаний

Непосредственный объект испытаний – амфибийная ТП с РВД ЗВМ-2902 (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид ТП с РВД ЗВМ-2902

Fig. 1. Appearance of TP with RSP ZVM-2902

Краткие технические характеристики ТП с РВД ЗВМ-2902 приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Краткая техническая характеристика ТП с РВД ЗВМ-2902

Table 1.

Brief technical characteristics of TP with RSP ZVM-2902

№ п/п	Параметр	Значение
1	Вес снаряженной машины, кг	4000
2	Габаритные размеры: длина/ ширина/ высота, мм	5500 / 2800 / 2800
3	Число движителей	4
4	Диаметр базового цилиндра движителей, мм	800
5	Диаметр по винтовым лопастям, мм	1000
6	Ход винтовой линии, м	1950
7	Число заходов лопастей движителей	3
8	Колея (расстояние между осями движителей), мм	1800
9	Дорожный просвет, мм	600
10	Максимальная мощность двигателя кВт (л.с.)	87,5 (119)
11	Максимальный крутящий момент двигателя, Нм	420
12	Максимальная теоретическая скорость на льду, км/час	25
13	Максимальная теоретическая скорость на плаву, км/час	10

Цель и задачи испытаний амфибийной ТП с РВД

Цель испытаний амфибийной ТП с РВД – определение основных динамических и эксплуатационных качеств машины, использование полученных результатов для улучшения ее конструкции и повышения производительности, а также при создании новой, более совершенной машины.

В соответствии с целью были определены задачи испытаний по определению следующих параметров:

- скорость движения ТП с РВД без нагрузки на различных передачах в различных условиях;
- степень буксования движителей;
- максимальные тяговые усилия на различных передачах;
- расход топлива.

Методика испытаний амфибийной технологической платформы с РВД

Методика испытаний ТП с РВД ЗВМ-2902 была разработана в НИЛ «ТМ и ТТК» НГТУ с использованием опыта ОНИЛ ВМ по проведению испытаний экспериментальных образцов вездеходных машин. В соответствии с методикой в ходе испытаний замерялись и регистрировались следующие основные параметры:

- путь, пройденный машиной;
- время движения на мерном участке;
- число оборотов движителей;
- крутящий момент на валу силовой передачи;
- сила тяги;
- расход топлива.

Для оценки среды, взаимодействующей с движителями, на участках испытаний производился отбор проб ила с последующим лабораторным анализом с применением полевой лаборатории Литвинова (ПЛЛ-9) и в соответствии с методиками [27].

Приборы и оборудование для проведения испытаний

Перечень средств измерений и испытательного оборудования, необходимых для проведения испытаний ТП РВД ЗВМ, представлен в табл. 2.

Таблица 2.
Перечень средств измерений и испытательного оборудования,
необходимых для проведения испытаний

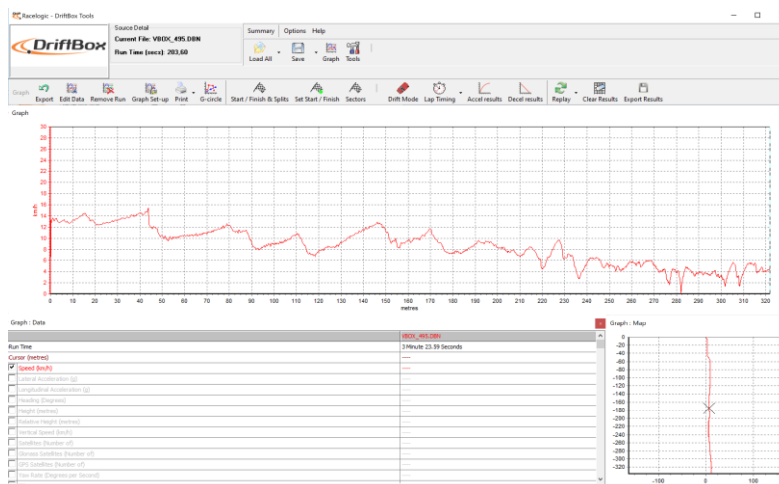
Table 2.
List of measuring instruments and test equipment required for testing

Измеряемая величина	Ед. изм.	Средства измерения
Скорость движения	км/ч	RaceBox
Обороты двигателя	об/мин	RaceBox
Крутящий момент	Н/м	Тензовал
Тяговые усилия	Н	Динамометр ДОУ-3-100И
Расход топлива	л	Расходомер DFL3x

Для определения пройденного пути, скорости и времени движения использовался измерительный комплекс *Racebox* [28] (рис. 2). Устройство имеет современный навигационный модуль GPS/ГЛОНАСС, который обрабатывает данные о местоположении и скорости до 16 раз в секунду. Использование различных форм записи экспериментальных данных позволяет их анализировать в различных программах, пример приведен на рис. 2 б.



a



б

Рис. 2. Измерительный комплекс Racebox:

a – общий вид оборудования, б – интерфейс для анализа полученных данных

Fig. 2. Racebox measuring complex:

a – general view of the equipment, b – interface for analyzing the data received

Racebox оснащен беспроводным модулем Bluetooth 4.0 (BLE), позволяющим получать данные о работе машины от OBD-адаптеров, тем самым определяя число оборотов двигателя машины. Для измерения крутящего момента на валу силовой передачи применялся тензовал, аналогичный приведенному на рис. 3. Его конструкция позволяет определять значения крутящего момента.

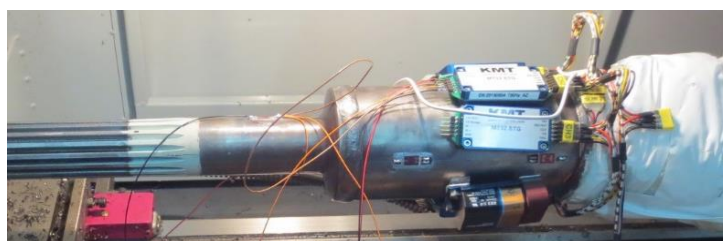


Рис. 3. Тензовал

Fig. 3. Strain-gage shaft



Рис. 4. Электронный динамометр ДОУ-3-100И

Fig. 4. Electronic dynamometer DOU-3-100I

Определение тяговых усилий было осуществлено при помощи датчика силы электронного динамометра ДОУ-3-100И, позволяющего производить запись полученных данных. Внешний вид датчика показан на рис. 4. При расчете расхода топлива применялся расходомер Corrsys-Datron DFL3x. Датчики системы DFL предназначены для замера расходования топлива в двигателях внутреннего сгорания. Внешний вид DFL3x показан на рис. 5.



Рис. 5. Расходомер DFL3x-5bar с процессором сигналов

Fig. 5. Flow meter DFL3x-5bar with signal processor

Характеристика участков испытаний

Для испытания ТП с РВД с целью определения его основных тягово-динамических качеств были выбраны три типичных участка иловых площадок с различной влажностью и физико-механическими свойствами илового осадка, на которых условия движения ТП с РВД и тягово-динамические показатели были различными. Характеристика участков по усредненным значениям, влажности и прочностным свойствам илового осадка приведены в табл. 3.

Таблица 3.

Усредненные значения влажности и сопротивления сдвигу илового осадка на участках испытаний

Table 3.

Average values of humidity and shear strength of sludge at test sites

№ участка	Влажность осадка на глубине 0,5 м, %	Сопротивление сдвигу на глубине 0,5 м, кПа
1	66-68	3,5
2	75-77	0,5
3	82-83	0,2

Влажность илового осадка на участках определялась лабораторным анализом проб, взятых с глубины 0,5 м. Оценка прочностных свойств илового осадка на участках производилась по сопротивлениям сдвига илового осадка на глубине 0,5 м и в поверхностном слое колеи, полученным в результате пенетрацион-сдвиговых испытаний на исследуемых участках.

Длина мерных участков принималась равной 20 м на иловых площадках и 50 м на воде на основании анализа результатов контрольных заездов.

Результаты испытаний амфибийной ТП с РВД

При измерении скорости ТП с РВД учитывалось движение машины по мерному участку. По полученным данным определялись значения времени движения, пройденного пути и скорости движения в каждый момент времени. Заезд считался состоявшимся в случае если разница абсолютных значений скоростей в каждый момент времени и средней путевой скорости не превышали 5 % от последней. Буксование машины определялось, как относительная потеря теоретической скорости, определяемой по частоте вращения двигателя.

Результаты замеров ТП с РВД на различных участках иловых площадок и воде представлены на рис. 6, где показаны значения скоростей движения ТП с РВД в зависимости от частоты вращения роторов: $V_{\text{теор}}$ – скорость без учета буксования, V_1 , V_2 , V_3 – скорости на характерных участках с разной влажностью, V_4 – скорость на воде. Тяговые усилия ТП с РВД также измерялись на мерных участках. Тяговая нагрузка создавалась при помощи лебедки грузового автомобиля. Величины тяговых усилий на крюке ТП с РВД, полученные при испытаниях на участках с различной влажностью и физико-механическими свойствами ила и на воде приведены на рис. 7-8. Движение ТП с РВД по воде соответствует влажности 100 %.

Графики для участка № 1 не показаны, так как экспериментально была получена только одна точка. Также при заездах был определен часовой расход топлива при испытаниях и определялся при помощи оборудования показанного на рис. 5. При испытаниях замеры расхода горючего проводились на мерных участках длиной 20 м на иловых площадках и длиной 50 м на воде. Результаты замеров расхода топлива при максимальных скоростях движения на различных передачах и на участках с различной влажностью илового осадка, а также при движении по воде, представлены в табл. 4.

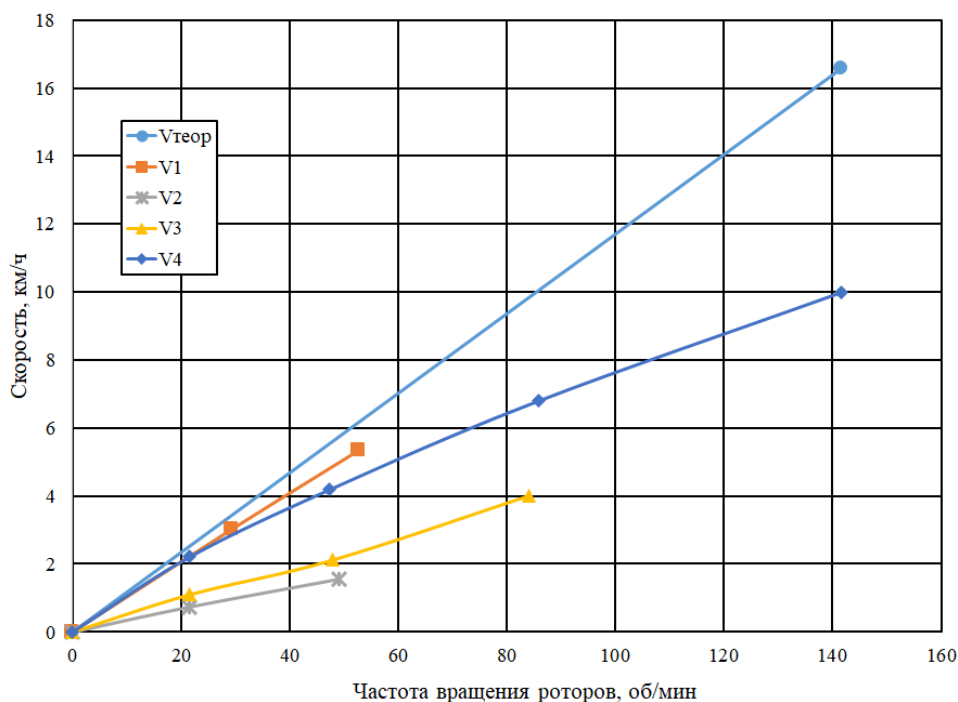


Рис. 6. Значения скоростей движения ТП с РВД в зависимости от частоты вращения роторов

Fig. 6. Values of movement speeds of TP with RSP depending on the rotor speed

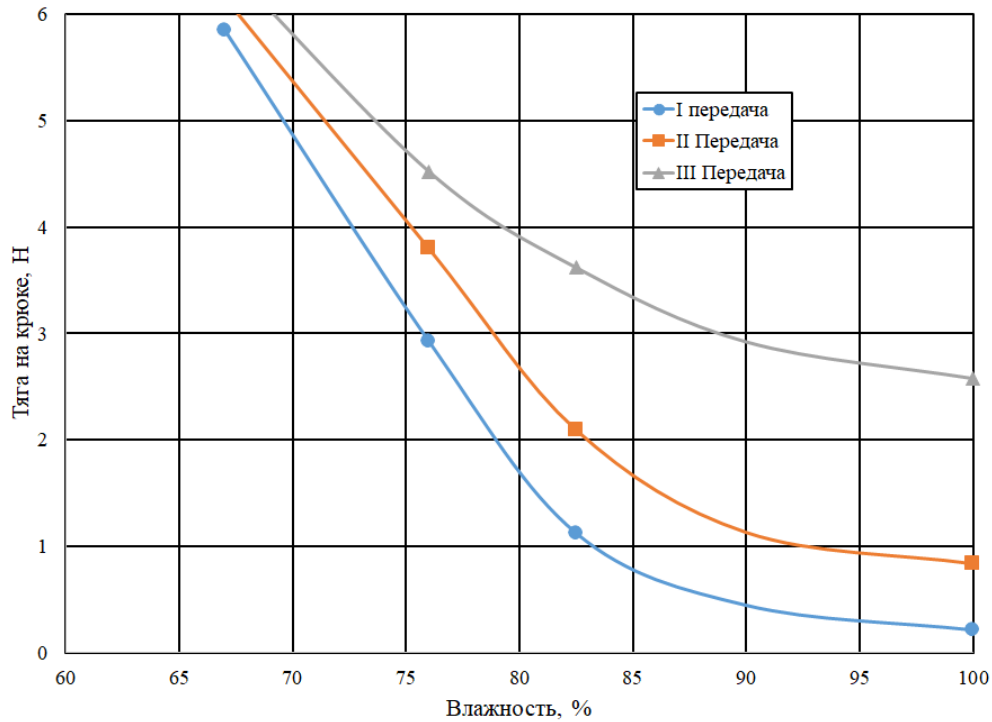


Рис. 7. Графики изменения тяги на крюке ТП с РВД в зависимости от влажности илового осадка при движении на различных передачах

Fig. 7. Graphs of changes in drawbar pull of a TP with RSP depending on the moisture content of the silt sediment when driving in different gears

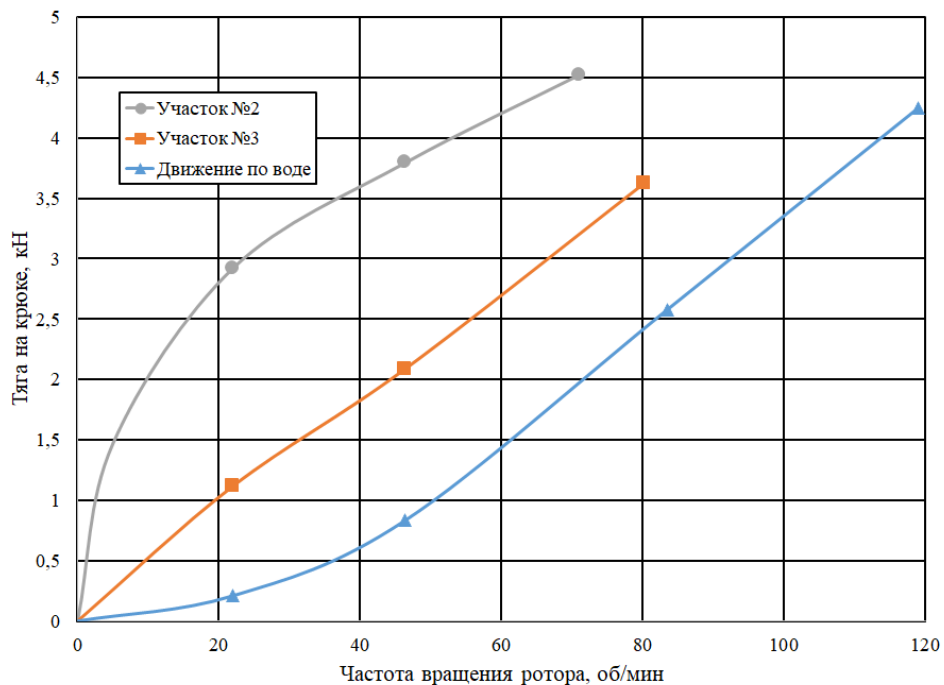


Рис. 8. Графики зависимостей тяги на крюке ТП с РВД от скорости вращения движителей на участках с различной влажностью ила и на воде

Fig. 8. Graphs of the dependence of the drawbar pull of a TP with RSP on the rotation speed of the propellers in areas with different moisture content of sludge and on water

Таблица 4.
Результаты топливно-экономических испытаний ТП с РВД

Table 4.
Results of fuel-economic tests of TP with RSP

№ участка	Влажность, %	Передача в КПП	V_{\max} , км/ч	Q , л/час
1	66-68	1	3,02	36,9
		2	5,34	24,8
2	75-77	1	0,74	17,9
		2	1,56	31,3
3	82-83	1	1,1	17,4
		2	2,12	19,6
		3	4	33,9
4	Движение по воде	1	2,2	24,2
		2	4,2	22,3
		3	6,8	19,8
		4	10	29,1

Результаты и выводы

Анализ результатов скоростных испытаний показывает, что наиболее сложные условия для работы амфибийной болотоходной роторно-винтовой машины возникают на участках с влажностью 75-77 %. Буксование движителей на них превышает 70 %, а скорость движения составляет около 1,5 км/час. С уменьшением влажности до 66-68 % значительно возрастают прочностные свойства илового осадка, уменьшается погружение движителей в ил, буксование уменьшается до 11-13 %, а максимальная скорость ТП с РВД возрастает до 5,4 км/час. С увеличением влажности осадка с 75-77 % до 82-83 % уменьшается сопротивление движению машины, уменьшается буксование до 56 %, а скорость возрастает до 4 км/час. При скоростных испытаниях на воде получены максимальные скорости ТП с РВД до 10 км/час. Также на воде машина имеет хорошую остойчивость и управляемость.

Результаты тяговых испытаний роторно-винтовой машины показывают, что тяга на крюке значительно зависит от скорости вращения движителей и максимальные ее значения достигаются на высших передачах. С уменьшением влажности илового осадка тяга на крюке ТП с РВД возрастает на каждой передаче. Максимальная тяга на крюке (5847 Н) получена на участках с влажностью илового осадка 66-68 %. Коэффициент сцепления в этом случае равен 0,15. Топливо-экономические испытания болотохода показали, что расход топлива резко уменьшается с увеличением рабочих скоростей.

Испытания показали надежную работу приборов и оборудования, позволивших получить качественные и количественные сведения, необходимые анализа. Анализ данных, полученных в ходе испытаний, позволяет дать рекомендации по повышению производительности и проходимости амфибийной ТП с РВД. Роторно-винтовая машина ТП РВД ЗВД 2901 показала хорошую работоспособность и достаточно высокую проходимость в тяжелых условиях эксплуатации на иловых площадках. Для уменьшения буксования на участках с высокой влажностью (более 70 %) и увеличения тяги на крюке рекомендуется увеличить высоту лопастей движителей.

Библиографический список

1. Вездеходные транспортно-технологические машины. Основы теории движения: монография / под общ. ред. В.В. Белякова и А.П. Куляшова. – Н. Новгород: ТАЛАМ, 2004. – 961 с.

2. **Аникин, А.А.** Отраслевая научно-исследовательская лаборатория вездеходных (снегоходных машин). К 50-летию со дня основания (1962–2012 гг.). Монография / А.А. Аникин и др. Н. Новгород: НГТУ им Р.Е. Алексеева, 2012. – 272 с.
3. **Беляков, В.В.** Нижегородская научно-практическая школа транспортного снеговедения // Научно-практические школы Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. Юбилейное издание к 105-летию НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Часть 2. Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2022. С. 251-305.
4. **Козин, В.М.** Избранные задачи ледотехники. Средства и методы решения / В.М. Козин, В.Л. Земляк, А.А. Куркин, В.В. Беляков. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2023. – 772 с.
5. Нижегородская научная школа вездеходных машин, транспортно-технологических комплексов и специального оборудования / под общ. ред. В.В. Белякова и А.П. Куляшова. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2007. – 169 с.
6. **Антонец, В.А.** Школа С.В. Рукавишниковой. Развитие теории систем местность машина и опыт создания на ее основе гусеничных снегоболотоходных машин: монография / В.А. Антонец, Л.В. Барахтанов, В.В. Беляков, Н.Б. Веселов, А.М. Грошев. – Н. Новгород: НГТУ им Р.Е. Алексеева. 2017. – 297 с.
7. **Мокеров, Д.С.** Методика улучшения акустических характеристик работы роторно-винтовых движителей при движении по льду: дисс. ... кандидата технических наук: 05.05.03. – Н. Новгород, 2021. – 251 с.
8. **Мокеров, Д.С.** Наполнение базового цилиндра роторно-винтового движителя как перспективный путь снижения шумового излучения вездеходных машин / Д.С. Мокеров, У.Ш. Вахидов, С.Е. Манянин, Ю.И. Молев // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021. Сборник тезисов VIII Международной научно-практической конференции. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2021. С. 440-445.
9. **Vahidov, U.** Study of parameter influence of the basic cylinder of rotary screw propulsion units on noise level during locomotion on ice/ U. Vahidov et al.// 7th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems. VENITS 2021. – 2021. С. 714-719.
10. **Куклина, И.Г.** Математическая модель работы шнека специальных машин - длинного межопорного ротора / И.Г. Куклина, Е.Е. Демина, Д.С. Мокеров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. № 2 (133). С. 85-101.
11. **Куклина, И.Г.** Автоматизация исследований колебаний машины с движителями типа «шнек-ротор» / И.Г. Куклина И.Г., Д.С. Мокеров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. № 3 (134). С. 107-116.
12. **Мокеров, Д.С.** Методика улучшения акустических характеристик работы роторно-винтовых движителей при движении по льду // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. № 4 (135). С. 100-109.
13. **Vahidov, U.** Case study: regulation of noise produced by a rotary-screw propulsion unit in an all-terrain vehicle/ U. Vahidov et al. // 6th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems. 6. – 2020. С. 548-551.
14. **Вахидов, У.Ш.** Методика выбора рациональных параметров роторно-винтового движителя, обеспечивающих минимальный уровень шума при движении по льду / У.Ш. Вахидов, И.А. Ерасов, Д.С. Мокеров, Ю.И. Молев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2020. № 1 (128). С. 113-121.
15. **Lipin, A.** Ways of decreasing noise impact on operator by changing rotary-screw propulsion units natural frequency of vibration/ A. Lipin et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2019. С. 012040.
16. **Карасева, С.А.** Анализ гидродинамики взаимодействия структурных элементов полностью погруженных шнеков тандемной конструкции роторно-винтовых снегоболотоходов с водой / С.А. Карасева, А.В. Папунин, В.В. Беляков, В.С. Макаров, Д.Ю. Малахов, А.А. Ключошкин // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 2. Часть 1. С. 132-140.
17. **Karaseva, S.** Structural Analysis of Hydrodynamical Interaction of Full-Submerged Archimedes Screws of Rotary-Screw Propulsion Units of Snow and Swamp-Going Amphibious Vehicles with Water Area via Methods of Computer Simulation/ S. Karaseva, A. Papunin, V. Belyakov, V. Makarov, D. Malahov // Engineering Proceedings. 2023; 33(1):32. <https://doi.org/10.3390/engproc2023033032>
18. **Karaseva, S.** Comparative Structural Analysis of Hydrodynamic Interaction of Full-Submerged Tandem Archimedes Screws of Rotary-Screw Propulsion Units of Snow and Swamp-Going Amphibious Vehicles with the Water Area in Running and Mooring Modes/ S. Karaseva, A. Papunin; V. Belyakov; V. Makarov; D. Malahov, A. Klyushkin// Proceedings of the 9th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems, pp. 386-393. DOI: 10.5220/0011992300003479

19. **Karaseva, S.** Analysis of Efficiency of Full-submerged Archimedes Screws of Rotary-screw Propulsion Units of Snow and Swamp-going Amphibious Vehicles / S. Karaseva, V. Belyakov; V. Makarov; D. Malahov // Proceedings of the 8th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems, pp. 438-444. DOI: 10.5220/0011096700003191
20. **Кошурина, А.А.** Новое поколение вездеходных транспортных средств для работ на арктическом шельфе / А.А. Кошурина, А.Н. Блохин, М.С. Крашенинников, Р.А. Дорофеев // Региональная энергетика и энергосбережение. 2017. № 1. С. 44.
21. **Крашенинников, М.С.** Универсальное коллективное спасательное средство с роторно-винтовым двигателем / М.С. Крашенинников, А.А. Кошурина, А.В. Шмелев // Актуальные вопросы машиноведения. 2013. Т. 2. С. 77-80.
22. **Крашенинников, М.С.** Создание универсального спасательного средства с роторно-винтовым двигателем / М.С. Крашенинников, А.А. Кошурина // Безопасность транспортных средств в эксплуатации. Сборник материалов 79-й международной научно-технической конференции. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2012. С. 147-152.
23. НИЛ «Транспортных машин и транспортно-технологических комплексов» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://its.nntu.ru/sciense/nil-transportnykh-mashin-i-transportno-tehnologicheskikh-kompleksov-nil-tm-ttk> (дата обращения: 20.12.2023).
24. ООО «Завод Вездеходных Машин» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://zvm-nn.ru/> (дата обращения: 20.12.2023)
25. Инструкция по исследованию строительных свойств грунтов полевой лабораторией системы И.М. Литвинова ПЛЛ-9 / СССР. М-во приборостроения, средств автоматизации и систем управления. Завод маркшейдерских инструментов. – Харьков: Прапор, 1968. – 60 с.
26. Racebox [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://racebox.ru/> (дата обращения: 20.12.2023).

*Дата поступления
в редакцию: 30.01.2024*

*Дата принятия
к публикации: 28.02.2024*

УДК 629.1

EDN: BNXVMC

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ АВТОМОБИЛЯ ПРИ УСТАНОВИВШЕМСЯ ДВИЖЕНИИ

С.А. Горожанкин

ORCID: 0000-0001-7093-881X e-mail: s.a.gorozhankin@donnasa.ru

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры
Макеевка, ДНР, Россия**Н.В. Савенков**

ORCID: 0000-0003-3803-9528 e-mail: n.v.savenkov@donnasa.ru

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры
Макеевка, ДНР, Россия**О.О. Золотарев**

ORCID: 0000-0002-8631-390X e-mail: o.o.zolotarev@donnasa.ru

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры
Макеевка, ДНР, Россия

Рассмотрены вопросы регулирования гибридной силовой установки (ГСУ) при установившемся движении автомобиля с заданной длительностью. На основании выполненного исследования энергетической эффективности рабочего процесса ГСУ установлено, что поиск алгоритмов рационального ее регулирования необходимо осуществлять путем решения соответствующей задачи оптимизации. Для решения задачи предложены частные оценочные критерии энергетической эффективности рабочего процесса ГСУ, подход к выбору параметров оптимизации и вводимые ограничения; введены понятия выходной и оптимизированной выходной характеристик ГСУ, а также нормированного удельного расхода топлива ДВС, приходящегося на зарядку тяговой высоковольтной аккумуляторной батареи. Для параметров агрегатов и механизмов ГСУ последовательно-параллельного на примере автомобиля типа *Toyota Prius* с помощью разработанной авторами компьютерной программы получены рациональные функции регулирования агрегатами при движении автомобиля на различных нагрузочно-скоростных режимах, обеспечивающие наилучшие значения выбранных частных критериев эффективности. Результаты исследования могут быть использованы при разработке перспективного метода оптимизированного выбора стратегии регулирования агрегатов ГСУ при движении автомобиля в комплексе неустановившихся режимов движения.

Ключевые слова: автомобильная гибридная силовая установка, текущий массовый расход топлива, критерий, параметры, режим движения, оптимизация, регулирование силовой установки, выходная характеристика, циркуляция энергии, энергетический баланс.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Горожанкин, С.А. Исследование энергетической эффективности рабочего процесса гибридной силовой установки автомобиля при установившемся движении / С.А. Горожанкин, Н.В. Савенков, О.О. Золотарев // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2024. № 2. С. 90-101. EDN: BNXVMC

STUDY OF ENERGY EFFICIENCY OF HYBRID VEHICLE POWERTRAIN OPERATING PROCESS DURING STEADY MOTION

S.A. Gorozhankin

ORCID: 0000-0001-7093-881X e-mail: s.a.gorozhankin@donnasa.ru

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture
Makeevka, DPR, Russia

N.V. Savenkov

ORCID: **0000-0003-3803-9528** e-mail: **n.v.savenkov@donnasa.ru**

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Makeevka, DPR, Russia

O.O. Zolotarev

ORCID: **0000-0002-8631-390X** e-mail: **o.o.zolotarev@donnasa.ru**

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Makeevka, DPR, Russia

The paper considered issues of a vehicle hybrid powertrain regulation during steady motion with a given duration. A study of the energy efficiency of the operating process of a hybrid powertrain was carried out. It has been established that the search for its rational regulation algorithms must be carried out by solving the corresponding optimization problem. Partial evaluation criteria for the energy efficiency of the operating process of a hybrid powertrain, an approach to the selection of optimization parameters and introduced restrictions are proposed. The concepts of output and optimized output characteristics of a hybrid powertrain, as well as normalized specific fuel consumption of an internal combustion engine attributable to charging a traction high-voltage battery, are introduced. A computer program has been developed and rational functions for regulating units during vehicle moving at various load-speed modes have been obtained, which provide the best values of selected partial efficiency criteria, on the example of units and mechanisms of a series-parallel hybrid powertrain of Toyota Prius. The results of the study are aimed at developing a promising method for the optimized choice of control strategy for the units of a hybrid powertrain during the vehicle moving in a complex of unsteady driving modes, for example in driving cycles or in actual operating conditions.

Key words: vehicle hybrid powertrain, current mass fuel consumption, criterion, parameters, driving mode, optimization, powertrain regulation, output characteristic, energy circulation, energy balance.

FOR CITATION: S.A. Gorozhankin, N.V. Savenkov, O.O. Zolotarev Study of the energy efficiency of the working process of a hybrid vehicle power plant during steady motion. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 2. Pp. 90-101. EDN: BNXVMC

Постановка проблемы

При эксплуатации автомобиля значительная доля времени может приходиться на установившиеся режимы, под которыми подразумевается процесс движения автомобиля с постоянной кинематической и силовой составляющей энергосилового потока на движителе (т.е. при постоянной скорости V и крутящем моменте или мощности N_K) [1-3]. Например, для городской составляющей UDC Нового европейского ездового цикла $NEDC$ на эти режимы приходится 60 % общего времени цикла (табл. 1), из которых 29 % составляет движение с постоянными скоростями, а 31 % – с нулевой скоростью (режим «стоп»), что также может быть отнесено к установившемуся режиму.

Таблица 1.
Доля установившихся режимов в различных ездовых циклах

Table 1.
Proportion of steady modes in various driving cycles

Ездовой цикл	UDC	SORT2	WLTC
Доля установившихся режимов, %	60	56,5	12**
Доля режима «стоп», %	31 (51*)	60	
* от времени цикла, приходящегося на установившиеся режимы; ** приходится от общего времени цикла для автомобиля III класса энерговооруженности на режим $V = 0$			

Для автомобилей, оснащенных классической силовой установкой, содержащей один двигатель (например, ДВС) и агрегаты трансмиссии с постоянными или переменными передаточными числами, на всем протяжении конкретного участка установившегося движения отсутствует явная необходимость изменения нагрузочно-скоростного режима работы агрегатов. Как показывают результаты исследований [4], это обусловлено тем, что для такого режима движения автомобиля существует только одно сочетание значений параметров агрегатов его силовой установки (коэффициента использования мощности и частоты вращения ДВС, общего передаточного числа трансмиссии), при котором обеспечивается максимальное значение общего КПД и, как следствие, минимальное значение потребления энергии (топлива).

Для АТС, содержащих несколько двигателей различных типов, в частности для автомобилей, оснащенных гибридными силовыми установками [5], вышеприведенное положение, не является достаточным для обеспечения минимизации путевого расхода топлива. Это связано с возможностью циркуляции энергии между агрегатами.

Теоретический анализ

В качестве частных оценочных критериев энергетической эффективности рабочего процесса ГСУ предлагается рассматривать сочетание расходов топлива/энергии для работы двигателей, обеспечивающих движение автомобиля на конкретном нагрузочно-скоростном режиме. Например, для ГСУ, содержащих ДВС и электрические машины, таковыми критериями являются соответственно массовый расход топлива G и электрическая мощность P , отдаваемая или запасаемая высоковольтной батареей аккумуляторов (ВВБ):

$$G = f(n_e, k_e), \quad (1)$$

где n_e – частота вращения коленчатого вала ДВС; k_e – коэффициент использования мощности ДВС.

Для ВВБ:

$$P = f(n_1, k_1, n_2, k_2, \dots, n_i, k_i), \quad (2)$$

где n_1, n_2, \dots, n_i – частоты вращения роторов электромашин; k_1, k_2, \dots, k_i – коэффициенты использования мощности электромашин.

Положительные значения мощности P соответствуют зарядке ВВБ, а отрицательные – разрядке. Ее знаки при работе электромашин определяются значениями режимных параметров (2).

Перечисленные в качестве примера эти параметры ($n_e, k_e, n_1, k_1, n_2, k_2, \dots, n_i, k_i$), не могут быть связаны между собой случайным образом. Возможные варианты их сочетаний обусловлены:

- нагрузочно-скоростным режимом движения автомобиля (который определяется сочетанием скорости движения V и мощности на ведущих колесах N_K);
- схемой и характеристиками трансмиссии ГСУ, которые определяют силовые и кинематические соотношения между агрегатами, а также число степеней свободы в сочетании параметров регулирования этими агрегатами для заданного нагрузочно-скоростного режима движения АТС.

Автомобиль *Toyota Prius*, который выбран в качестве примера для выполнения настоящего исследования, оснащен ГСУ последовательно-параллельного типа, содержащей один ДВС, дифференциальный распределитель и две электрические машины. При этом общее количество параметров, определяющих режимы работы всех этих двигателей, составляет шесть ($n_e, k_e, n_1, k_1, n_2, k_2$). Однако, ГСУ рассматриваемой конфигурации имеет только два независимых режимных параметра. Для заданного нагрузочно-скоростного режима движения остальные четыре параметра будут являться функциями этих двух. Например, если в качестве независимых выбрать частоту вращения ДВС n_e и коэффициент нагрузки электродвигателя k_1 , то остальные определяются как $k_e, n_1, n_2, k_2 = f(n_e, k_1, N_K, V)$. Соответственно зависимости для частных оценочных критериев представляются в аналогичном виде – как функции выбранных

независимых режимных параметров агрегатов ГСУ и параметров режима движения автомобиля:

$$\left. \begin{aligned} G &= f(n_e, k_1, N_K, V) \\ P &= f(n_e, k_1, N_K, V) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Эти зависимости в графическом виде для некоторых режимов движения автомобиля показаны на рис. 1. Параметр s – относительная (по отношению к номинальной) частота вращения коленчатого вала ДВС. Данные получены в результате численного моделирования в программной среде компьютерной алгебры Mathcad процесса движения автомобиля на основе разработанных авторами математических моделей характеристик агрегатов ГСУ [6]: внешней и частичных скоростных характеристик ДВС, силовых и кинематических соотношений в трансмиссии и ее элементах, а также механических характеристик и характеристик КПД электрических машин в режимах двигателя либо генератора с учетом потерь в их преобразователях (инверторах).

Для зависимостей (3) предлагается ввести понятие «Выходная характеристика ГСУ», которая определяет значения частных критериев эффективности ГСУ в зависимости от возможных сочетаний независимых режимных параметров ее агрегатов и режима движения автомобиля. Данная характеристика приведена на графиках (рис. 1 а-г) для четырех режимов движения: показаны области допустимых сочетаний значений независимых параметров регулирования агрегатов ГСУ (k_1 и s). Остальные их сочетания, расположенные за пределами изображенных контуров, не могут быть реализованы.

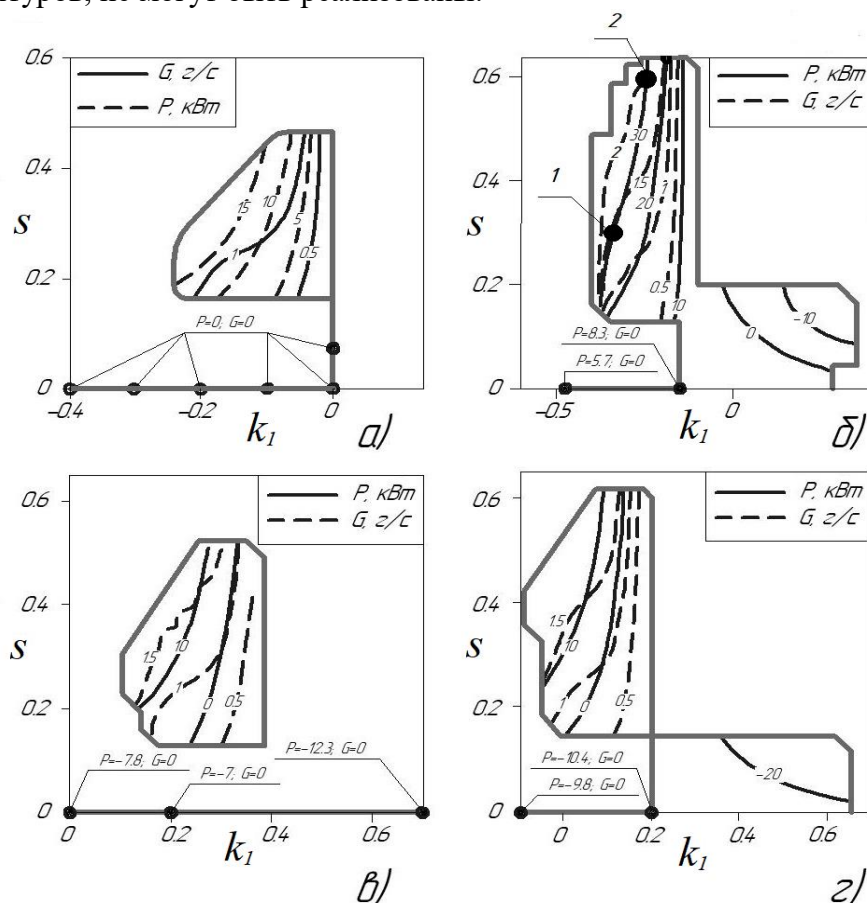


Рис. 1. Выходная характеристика ГСУ автомобиля Toyota Prius для режимов движения:
 а) автомобиль неподвижен ($N_K = 0$ кВт, $V = 0$ м/с); б) рекуперация при $N_K = -9$ кВт, $V = 12,33$ м/с;
 в) тяговый режим движения при $N_K = 6$ кВт, $V = 3,08$ м/с;
 г) тяговый режим при $N_K = 9$ кВт, $V = 9,25$ м/с

Fig. 1. Output characteristics of the Toyota Prius hybrid powertrain for driving modes:
 а) without moving ($N_K = 0$ kW, $V = 0$ m/s); б) recuperation at $N_K = -9$ kW, $V = 12,33$ m/s;
 в) traction mode at $N_K = 6$ kW, $V = 3,08$ m/s; г) traction mode at $N_K = 9$ kW, $V = 9,25$ m/s

Дополнительные режимные точки с указанием на выносках значений G и P будут иметь место в случае применения тормозов на валах ДВС и связанной с ним через дифференциальный распределитель электрической машины.

На основании полученных графиков можно также сделать вывод, что не все возможные сочетания независимых параметров регулирования ГСУ являются рациональными с позиции энергетической эффективности. Например, в режимных точках 1 и 2 на рис. 1б передается одинаковая электрическая мощность для заряда ВВБ – 30 кВт. Но при этом мгновенный расход топлива ДВС в точке 1 составляет 1,5 г/с, а в точке 2 – 2 г/с. Так как для этих точек режим движения автомобиля остается неизменным, то в рассмотренном примере ГСУ обладает большей энергетической эффективностью именно в точке № 1.

Предлагаемый порядок оптимизации работы ГСУ

С целью обеспечения на заданном режиме движения автомобиля работы ГСУ с максимальной энергетической эффективностью (в пределах рассмотренной степени свободы) в исследовании определена первая задача оптимизации. В качестве критерия для нее выбран минимальный текущий массовый расход топлива ДВС для заданного значения электрической мощности (разрядки или зарядки) ВВБ. Выбранный частный критерий позволяет обеспечить наибольшую энергетическую эффективность для всех вариантов движения: только от электродвигателей (электромобиль), рекуперативное торможение, а также при одновременной работе агрегатов различных типов. В качестве оптимизационных параметров определены независимые режимные параметры ГСУ (в частности, s и k_1). Ограничениями являются области допустимых сочетаний значений оптимизационных параметров по выходной характеристике ГСУ. Результаты выполнения оптимизации для рассматриваемых (в качестве примера) в настоящей статье режимов движения автомобиля показаны на рис. 2.

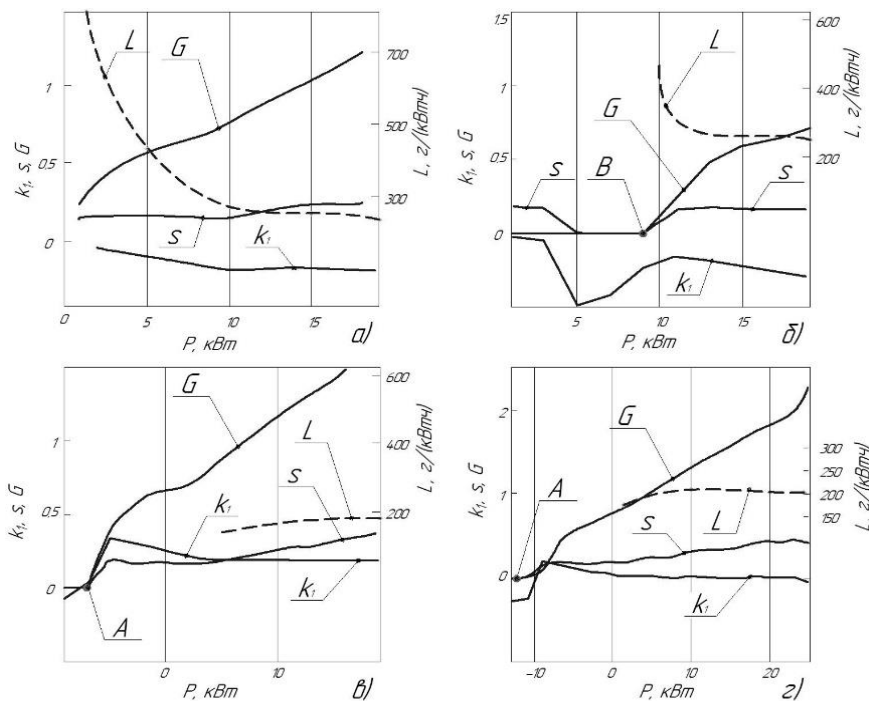


Рис. 2. Оптимизированная выходная характеристика ГСУ автомобиля Toyota Prius:

- а) автомобиль неподвижен ($N_k = 0$ кВт, $V = 0$ м/с); б) рекуперация при $N_k = -9$ кВт, $V = 12,33$ м/с;
в) тяговый режим движения при $N_k = 6$ кВт, $V = 3,08$ м/с;
г) тяговый режим движения при $N_k = 9$ кВт, $V = 9,25$ м/с

Fig. 2. Optimized output characteristics of the Toyota Prius hybrid powertrain for driving modes:

- а) without moving ($N_k = 0$ kW, $V = 0$ m/s); б) recuperation at $N_k = -9$ kW, $V = 12,33$ m/s;
в) traction mode at $N_k = 6$ kW, $V = 3,08$ m/s; г) traction mode at $N_k = 9$ kW, $V = 9,25$ m/s

На графиках, в соответствии с постановкой выполненной задачи оптимизации, показано минимально возможное значение текущего массового расхода топлива ДВС G и соответствующие ему оптимизированные значения независимых режимных параметров ГСУ (s и k_1), которые являются функциями от электрической мощности P , отдаваемой ВВБ. Отрицательные ее значения – разряд, положительные – зарядка. Для полученных рациональных зависимостей предлагается ввести понятие «Оптимизированная выходная характеристика ГСУ». Точки «А» на характеристике (рис. 2в и 2г) соответствуют наиболее эффективному режиму электромобиля – при $G = 0$ и минимально возможной (по модулю) для заданного режима движения автомобиля электрической мощности P . Организация работы ГСУ на режимах, расположенных слева от точки «А» нецелесообразна, поскольку при неизменном режиме движения автомобиля увеличивается электрическая мощность, отдаваемая аккумулятором. При работе ГСУ в диапазоне от точки «А» до $P = 0$, движение автомобиля осуществляется одновременно от ДВС и электромашин с разной долей развиваемых механических мощностей.

Точка «В» (рис. 1б) на характеристике определяет наиболее эффективный режим рекуперации при $G = 0$ и максимально возможном значении электрической мощности P заряда ВВБ. Поэтому в диапазоне от $P = 0$ до точки «В» рекуперацию осуществлять нецелесообразно. При $P > 0$ и $G > 0$, определенная, причем иногда значительная доля механической мощности, которую развивает ДВС, используется для зарядки ВВБ. С целью оценки энергетической эффективности такого преобразования энергии, на графиках рис. 2 приведена функция $L = f(P)$, где L – нормированный удельный расход топлива – расход топлива ДВС, приходящийся на 1 кВт×ч энергии, аккумулированной в ВВБ:

- для неподвижного автомобиля при зарядке ВВБ – точка ($N_k = 0, V = 0$)

$$L = \frac{G}{P}; \tag{4}$$

- для режима рекуперации ($N_k < 0, V > 0$):

$$L = \frac{G}{P - P_B}, \tag{5}$$

где P_B – электрическая мощность зарядки ВВБ в точке «В» (при $G = 0$);

- для тягового режима движения автомобиля ($N_k > 0, V > 0$):

$$L = \frac{G - G_0}{P}, \tag{6}$$

где G_0 – текущий массовый расход топлива ДВС при $P = 0$.

Таким образом, в рамках оптимизированной выходной характеристики ГСУ (рис. 2), рассмотренный показатель в зависимости от режима движения автомобиля и установленной мощности заряда ВВБ может изменяться в достаточно широких пределах. Если известна продолжительность t_{\max} конкретного установившегося режима движения автомобиля (при $N_k = \text{const}, V = \text{const}$), для которого определена оптимизированная выходная характеристика ГСУ, возникает задача рационального регулирования ее агрегатов на протяжении этого режима. Данная задача может решаться в двух направлениях.

Первое направление предусматривает организацию работы агрегатов ГСУ на установившихся режимах на протяжении всего принятого участка движения автомобиля:

$$A^0 = G^0 \times t_{\max}, \tag{7}$$

$$Q^0 = P^0 \times t_{\max}. \tag{8}$$

где t_{\max} – продолжительность конкретного режима движения автомобиля; A^0 – суммарный расход топлива на этом режиме за время t_{\max} ; Q^0 – электрическая энергия, отданная (полученная) ВВБ за время t_{\max} ;

Примеры реализации таких режимов показаны на каждом из рис. 3-6 в правой части. На рис. 3 задан установившийся режим движения автомобиля длительностью $t_{\max} = 3$ с при $N_k = -9$ кВт (рекуперация) и $V = 12,33$ м/с. Для него в соответствии с оптимизированной выходной характеристикой ГСУ, могут быть реализованы различные значения мощности заряда ВВБ – например, $P^0_1 = 13$ кВт, $P^0_2 = 33,3$ кВт и $P^0_3 = 48,3$ кВт.

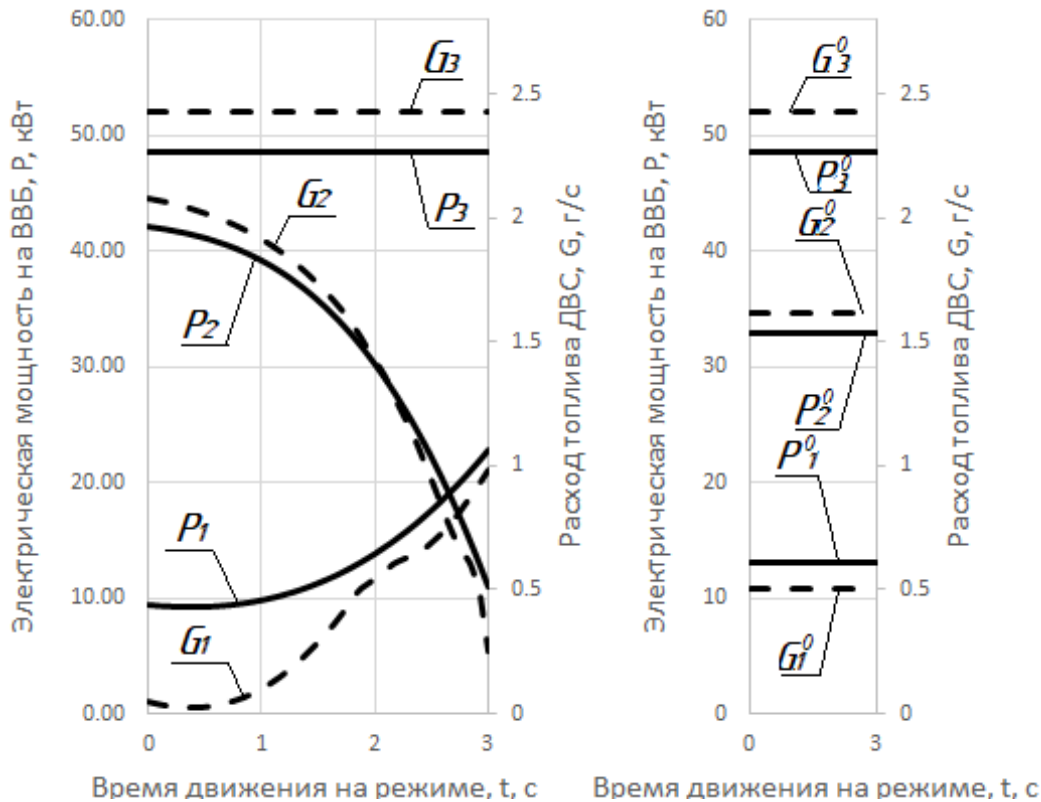


Рис. 3. Регулирование ГСУ на установившемся режиме движения автомобиля:

$$N_k = -9 \text{ кВт}, V = 12,33 \text{ м/с}, t_{\max} = 3 \text{ с}$$

Fig. 3. Regulation of a vehicle hybrid powertrain during steady motion:

$$N_k = -9 \text{ kW}, V = 12,33 \text{ m/s}, t_{\max} = 3 \text{ s}$$

Поскольку зарядка со всеми этими значениями осуществляется с использованием дополнительной мощности, получаемой от ДВС, то для него текущие массовые расходы топлива (также в соответствии с оптимизированной выходной характеристикой ГСУ) соответственно будут равны: $G^0_1 = 0,5 \text{ г/с}$, $G^0_2 = 1,62 \text{ г/с}$ и $G^0_3 = 2,43 \text{ г/с}$; таким образом, в соответствии с (7), за время t_{\max} суммарные расходы топлива составят $A^0_1 = 1,5 \text{ г}$, $A^0_2 = 4,85 \text{ г}$ и $A^0_3 = 7,29 \text{ г}$, а переданная в ВВБ электрическая энергия, определенная по зависимости (8): $Q^0_1 = 39 \text{ кДж}$, $Q^0_2 = 100 \text{ кДж}$ и $Q^0_3 = 145 \text{ кДж}$. Величины P^0 и G^0 , приведенные справа на рис. 4-6, определены аналогичным путем для других, рассмотренных в настоящей работе, режимов движения автомобиля. Значения соответствующих показателей A^0 , Q^0 , t_{\max} сведены в табл. 2.

Для второго направления рассматривается организация работы агрегатов ГСУ на неустановившихся режимах на протяжении времени t_{\max} , в течение которого автомобиль движется на установившемся режиме при $N_k = \text{const}$ и $V = \text{const}$. В рассматриваемом случае:

$$Q = \int_0^{t_{\max}} P(t) dt, \quad (9)$$

$$A = \int_0^{t_{\max}} G(t) dt, \quad (10)$$

Примеры такого способа регулирования агрегатов ГСУ показаны в левой части рис. 3-6. При этом $Q_1 = Q^0_1$, $Q_2 = Q^0_2$, $Q_3 = Q^0_3$, т.е., количества электрической энергии, полученные ВВБ при установившихся режимах работы агрегатов ГСУ (справа) равны таковым в результате осуществления движения на неустановившихся режимах (слева). Но при этом суммарные расходы топлива A_1, A_2, A_3 и соответствующие A^0_1, A^0_2, A^0_3 могут отличаться, что и становится предметом настоящего исследования.

Для математического описания функции мощности ВВБ, которую обеспечивает работа агрегатов ГСУ в течение времени t_{max} на неустановившихся режимах, в исследовании выбрана полиномиальная зависимость:

$$P = f(t) = \frac{P}{P_{max}} \left(a \cdot \left(\frac{t}{t_{max}} \right)^3 + b \left(\frac{t}{t_{max}} \right)^2 + c \cdot \frac{t}{t_{max}} + d \right), \quad (11)$$

где P_{max} – максимальная возможная электрическая мощность, которая может быть достигнута при заряде ВВБ; a, b, c, d – полиномиальные коэффициенты.

Не исключается, что в дальнейшем для уточнения результатов аналитическое выражение для функции (11) может быть изменено.

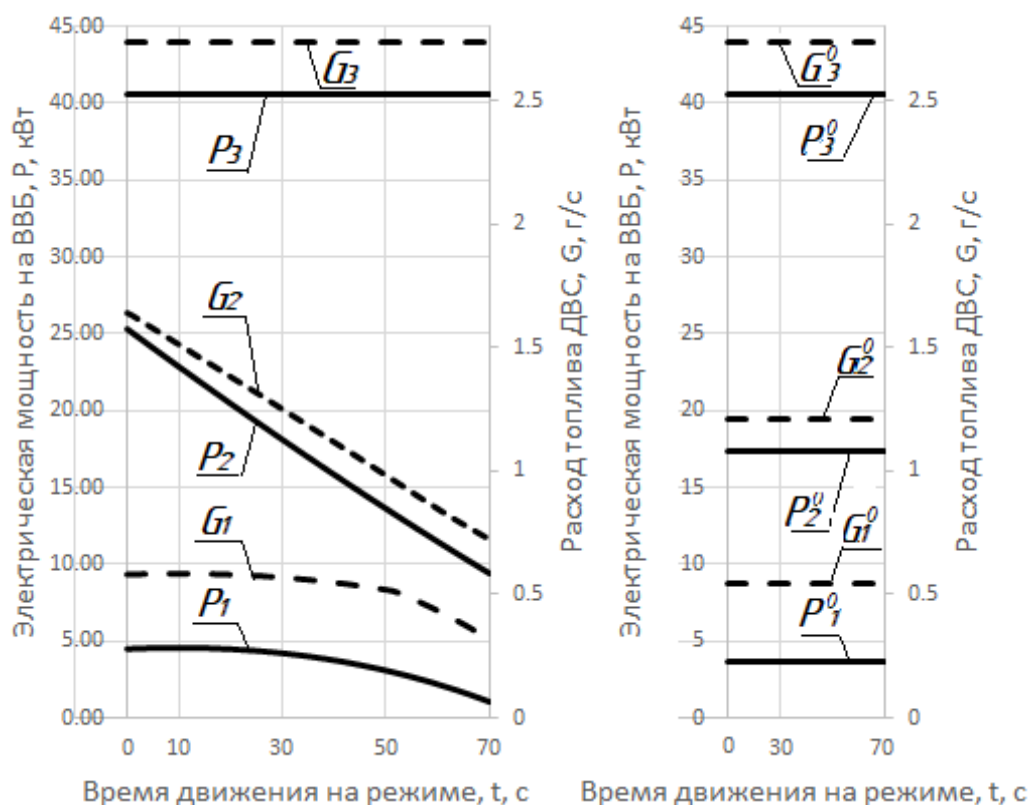


Рис. 4. Регулирование ГСУ при полной остановке автомобиля:

$$N_k = 0 \text{ кВт}, V = 0 \text{ м/с}, t_{max} = 70 \text{ с}$$

Fig. 4. Regulation of the hybrid powertrain when the vehicle is completely stopped:

$$N_k = 0 \text{ кВт}, V = 0 \text{ м/с}, t_{max} = 70 \text{ с}$$

Процесс выбора рациональной формы функции $P = f(t)$ для конкретного установившегося режима движения автомобиля с учетом его длительности является второй задачей оптимизации, для которой в качестве критерия выбрано минимальное значение интегрального показателя расхода топлива A , определенного по выражению (10) при заданном значении интегрального показателя Q (9). В качестве оптимизируемых параметров в данном случае выступают коэффициенты a, b, c, d . Для решения этой задачи оптимизации на языке VBA разработана компьютерная программа.

Рассматривая полученные результаты, приведенные на рис. 3 при работе агрегатов ГСУ на неустановившихся режимах (см. левую часть рисунка) следует отметить, что значения расходов топлива ($A_1 = 1,095 \text{ г}, A_2 = 4,7 \text{ г}, A_3 = 7,29 \text{ г}$) отличаются от вышеприведенных величин ($A_1^0 = 1,5 \text{ г}, A_2^0 = 4,85 \text{ г}$ и $A_3^0 = 7,29 \text{ г}$) для установившегося режима (правая часть рисунка). Отличие между расходами A_1 и A_1^0 составляет 27 %, а между A_2 и A_2^0 3,2 %. Равенство суммарных расходов $A_3 = A_3^0$ объясняется работой ГСУ с максимально возможной электрической мощностью заряда ВВБ.

Таким образом, графики, приведенные на рис. 3, позволяют сделать следующий вывод: для режима движения автомобиля $N_k = -9$ кВт и $V = 12,33$ м/с с известной длительностью t_{\max} , при уменьшении требуемого значения Q , целесообразно организовать работу агрегатов ГСУ на неустановившихся режимах. Аналогичные результаты для других характерных режимов движения автомобиля, рассмотренных в работе, приведены в табл. 2. Для всех режимов, представленных в табл. 2, относительное уменьшение расходов топлива E^* вычислено по зависимости:

$$E^* = \frac{A^0 - A}{A^0} \cdot 100\% \quad (12)$$

Рассмотрим рис. 5. Максимальная энергетическая эффективность расхода электрической энергии Q_1 (-2.76 кДж) на режиме движения автомобиля $N_k = 6$ кВт, $V = 3,08$ м/с в течение $t_{\max} = 3$ с обеспечивается при работе электромеханической части ГСУ в генераторном режиме на протяжении 1,2 сек с последующим переходом в двигательный режим (левый график).

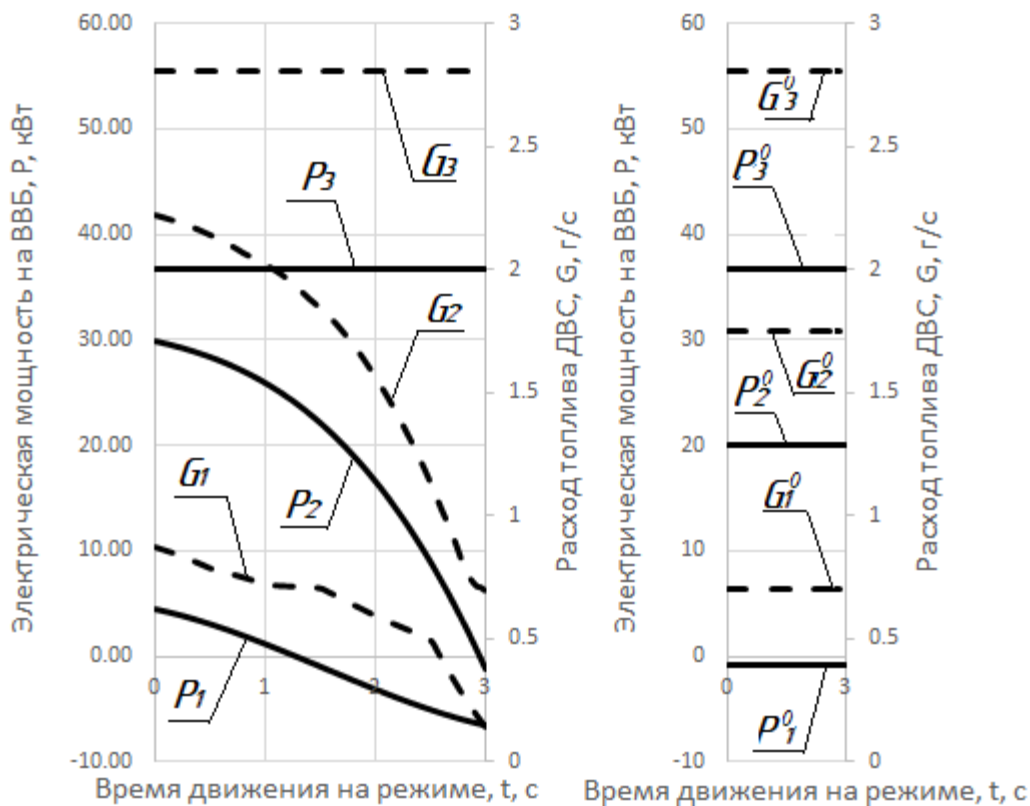


Рис. 5. Регулирование ГСУ на установившемся режиме движения автомобиля:

$$N_k = 6 \text{ кВт}, V = 3,08 \text{ м/с}, t_{\max} = 3 \text{ с}$$

Fig. 5. Regulation of a vehicle hybrid powertrain during steady motion:

$$N_k = 6 \text{ kW}, V = 3,08 \text{ m/s}, t_{\max} = 3 \text{ s}$$

Имеющее место изменение знака передачи потока мощности дает экономию топлива 10,4 % в сравнении с работой с постоянной мощностью $P_1^0 = -0,92$ кВт электромеханической части ГСУ в режиме двигателя в течение 3 сек (правый график). Очевидно, что потери энергии, которые имеют место при циркуляции мощности (левый график), компенсируются возросшими средними значениями эффективного КПД ДВС и электрических машин ввиду организации их работы с большей нагрузкой в течение времени t_{\max} . В общем случае, выигрыш в топливной экономичности путем перехода на неустановившийся режим увеличивается с уменьшением Q (т.е. при работе агрегатов ГСУ с небольшой нагрузкой).

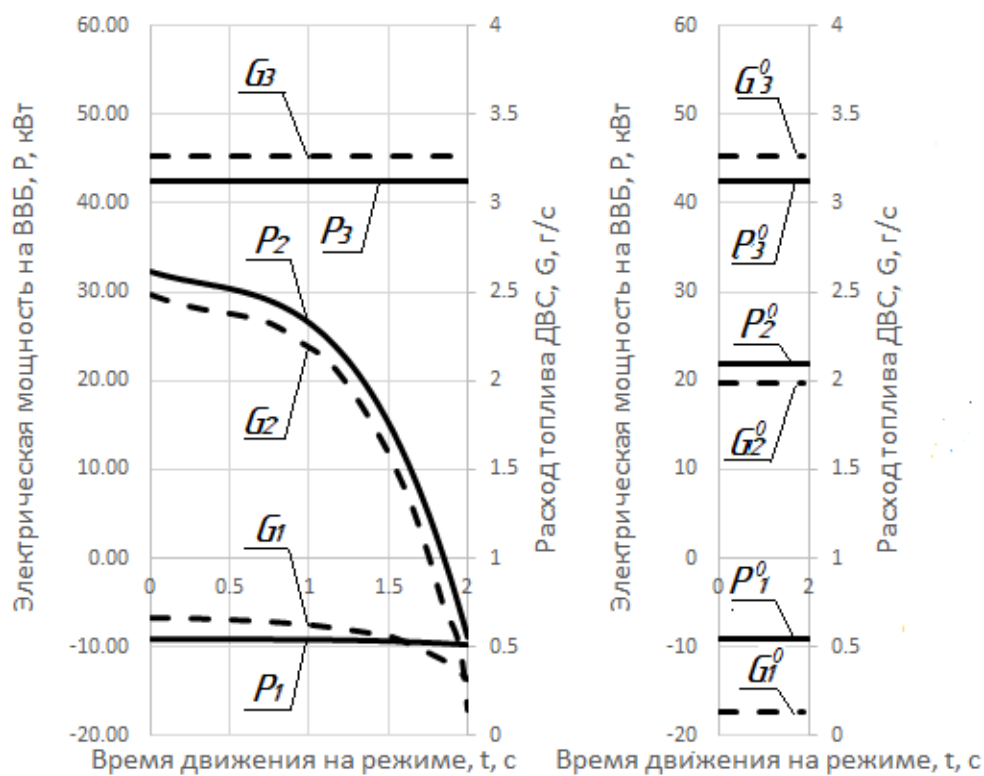


Рис. 6. Регулирование ГСУ на установившемся режиме движения автомобиля:

$$N_k = 9 \text{ кВт}, V = 9,25 \text{ м/с}, t_{max} = 2 \text{ с}$$

Fig. 6. Regulation of a vehicle hybrid powertrain during steady motion:

$$N_k = 9 \text{ kW}, V = 9,25 \text{ m/s}, t_{max} = 2 \text{ s}$$

При предельных для конкретного режима движения автомобиля положительных или отрицательных значениях Q , оптимизация возвращает единственный из возможных результат – агрегаты ГСУ должны работать на установившихся режимах (рис. 3-6, величины Q_3).

Таблица 2.
Результаты оптимизационного расчета

Table 2.
Optimization calculation results

Неустановившийся режим ГСУ (левые части рис. 3-6) $P = \text{var}, G = \text{var}, s = \text{var}, k_1 = \text{var}$						Установившийся режим ГСУ (правые части рис. 3-6) $P^0 = \text{const}, G^0 = \text{const},$ $s = \text{const}, k_1 = \text{const}$				$E^*, \%$
$Q, \text{ Дж}$	a	b	c	d	$A, \text{ г}$	$Q^0, \text{ кДж}$	$P^0, \text{ кВт}$	$G^0, \text{ г/с}$	$A^0, \text{ г}$	
Рис. 3: $N_k = -9 \text{ кВт}, V = 12,33 \text{ м/с}, t_{max} = 3 \text{ с}$										
39	-0.02	-0.025	0.0112	0.160	1,095	39	13	0,5	1,5	27
100	-0.255	-0.107	-0.053	0.561	4,7	100	33,3	1,62	4,85	3,2
145	0	0	0	0.6468	7.29	145	48,3	2.43	7.29	0
Рис. 4: $N_k = 0 \text{ кВт}, V = 0 \text{ м/с}, t_{max} = 70 \text{ с}$										
260	-0.013	-0.046	0.0136	0.0603	37.24	260	3,71	0,546	38.23	2.6
1216	0.003481	0.0158	-0.232	0.337	83,95	1216	17,37	1,21	84,88	1,1
2841	0	0	0	0.5412	194	2841	40,59	2,77	194	0
Рис. 5: $N_k = 6 \text{ кВт}, V = 3,08 \text{ м/с}, t_{max} = 3 \text{ с}$										
-2.76	0.111	-0.17	-0.086	0.0586	1.92	-2.76	-0.92	0,71	2.12	10,4
60	-0.186	-0.136	-0.092	0.398	5.14	60	20	1,75	5.25	2,45
109	0	0	0	0.488	8,5	109	36,3	2,83	8,5	0

Окончание табл. 2.
Результаты оптимизационного расчета

Table 2 continued.
Optimization calculation results

Рис. 6: $N_k = 9$ кВт, $V = 9,25$ м/с, $t_{max} = 2$ с										
-18,1	-0.0217	0.016	-0.0054	-0.12	0.25	-18,1	-9,05	0,135	0.27	8
44,6	-0.781	0.379	-0.149	0.431	3.88	44,6	22,3	1,98	3.96	2
85,1	0	0	0	0.5676	6.6	85,1	42,55	3,3	6.6	0

Выводы

В результате исследования установлено, что при движении автомобиля на установившемся режиме с известной продолжительностью по времени может быть предусмотрена и реализована такая рациональная организация работы агрегатов гибридной силовой установки на неустановившихся режимах, которая обеспечивает повышение эффективности процессов преобразования энергии и, как следствие, снижение путевого расхода топлива. На примере параметров и характеристик автомобиля *Toyota Prius* определено, что на отдельных режимах его движения расход топлива может быть снижен на величину до 27 %. В наибольшей мере полезный эффект от реализации рассмотренного подхода к регулированию силовой установкой имеет место при зарядке ВВБ (при $Q > 0$) и увеличивается со снижением электрической мощности до уровня 15-16 % от максимальной. Таким образом, ожидается, что в реальных городских условиях эксплуатации для автомобилей категории М₁, оснащенных ГСУ последовательно-параллельного типа, повышение топливной экономичности может составить до 4-5 %.

Результаты исследования направлены на разработку рациональных алгоритмов управления агрегатами ГСУ при движении автомобиля в комплексе неустановившихся режимов движения, например в современных ездовых циклах. В условиях реальной эксплуатации такое регулирование может обеспечиваться соответствующими программами, введенными в блок управления силовой установки и обновляемыми на основе адаптивного алгоритма.

Библиографический список

- ГОСТ Р 41.101-99. Правила ЕЭК ООН № 101. Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения легковых автомобилей, оборудованных двигателем внутреннего сгорания в отношении измерения объема выбросов диоксида углерода и расхода топлива, а также транспортных средств категории М1 и N1, оборудованных электроприводом, в отношении измерения расхода электроэнергии и запаса хода [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294820/4294820291.pdf> (дата обращения: 30.10.2023).
- UITP Project «SORT» standardized On-Road Test cycles. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.sahakk.sakarya.edu.tr/hybridbus/files/SORT2.pdf> (дата обращения: 30.10.2023).
- ГОСТ Р 59890-2021. Автомобильные транспортные средства. Выбросы загрязняющих веществ с отработавшими газами. Технические требования и методы испытаний на базе всемирной согласованной процедуры испытания транспортных средств малой грузоподъемности и испытаний в реальных условиях эксплуатации. – М.: Российский институт стандартизации, 2022. – 280 с.
- Савенков, Н.В. Метод выбора передаточных чисел силовой установки автомобиля категории N1 на основе ездового цикла: дис. ... канд. тех. наук : 05.05.03 : защищена 06.06.17 / Савенков Никита Владимирович. – М.: МАДИ, 2017. – 206 с.
- ТР ТС 018/2011. О безопасности колесных транспортных средств. С изменениями на 21 апреля 2023 года. Редакция, действующая с 20 мая 2023 года : издание официальное : Утвержден решением Комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 года № 877. – М.: Стандартиформ, 2011. – 465 с.

6. **Савенков, Н.В.** Рациональный выбор режимных параметров автомобильной гибридной силовой установки / Н.В. Савенков, О.О. Золотарев // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2023. №. 1 (35). С. 41-50.
7. **Gianfranco, P.** Electric and hybrid vehicles power sources, models, sustainability, infrastructure and the market / P. Gianfranco. Rome. Elsevier. 2010. – 645 P.
8. **Mehrdad, E.** Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design / Mehrdad, E. Yimin G., Sebastien E. – Ali E. CRC Press, West Florida. 2008. – 419 P.

*Дата поступления
в редакцию: 31.12.2023*

*Дата принятия
к публикации: 08.02.2024*

УДК 621.8

EDN: GECFTP

ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПЛАНЕТАРНОГО МЕХАНИЗМА ПРИВОДА ГУСЕНИЧНОГО ЭКСКАВАТОРА

И.А. ИсмаговORCID: 0000-0003-2176-6219 e-mail: ismatov.ismoiljon@mail.ruТаджикский технический университет им. акад. М.С. Осими
*Душанбе, Таджикистан***Б.Н. Акрамов**ORCID: 0000-0002-0049-0463 e-mail: akramov57@bk.ruТаджикский технический университет им. акад. М.С. Осими
*Душанбе, Таджикистан***К.З. Тиллоев**ORCID: 0000-0001-7237-2370 e-mail: kudratullo.tilloev@bk.ruТаджикский технический университет им. акад. М.С. Осими
*Душанбе, Таджикистан***М.А. Тошев**ORCID: 0000-0002-4400-8050 e-mail: mirzo.toshev1965@gmail.comТаджикский технический университет им. акад. М.С. Осими
Душанбе, Таджикистан

Проведено динамическое исследование планетарного механизма привода гусеничного экскаватора на основе уравнения Лагранжа второго рода. Гусеничные экскаваторы, имея хорошее сцепление с грунтами и возможность работать на самых сложных из них, позволяют вести земляно-строительные работы круглый год даже в самых сложных погодных условиях. Выбрана конкретная схема планетарного зубчатого механизма с желательным передаточным числом для конкретной модели экскаватора. Проведен кинематический синтез механизма с определением числа зубьев колес и сателлитных блоков. Для расчета выбран ходовой механизм гусеничного экскаватора модели *XE215CLL* и двигателем *BD-6BG1TRP*. В соответствии с параметрами выбранной машины определена силовая нагрузка на исследуемый планетарный механизм. Проведено конструирование механизма с использованием методов деталей машин, выполнен расчет массово-геометрической характеристики звеньев планетарного механизма. Представлена динамическая модель планетарного механизма, установлен закон движения всех его звеньев. Разработанная методика может быть применена также для колесных экскаваторов.

Ключевые слова: динамическая модель, планетарный механизм, уравнение Лагранжа второго рода, кинематический синтез, массы звеньев, моменты инерции звеньев, силовая нагрузка, приведенные сила и массы, гусеничный экскаватор, привод ходового механизма.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Исмагов, И.А. Динамическое моделирование работы планетарного механизма привода гусеничного экскаватора / И.А. Исмагов, Б.Н. Акрамов, К.З. Тиллоев, М.А. Тошев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2024. № 2. С. 102-110. EDN: GECFTP

DYNAMIC SIMULATION OF CRAWLER EXCAVATOR PLANETARY DRIVE MECHANISM

I.A. IsmatovORCID: 0000-0003-2176-6219 e-mail: ismatov.ismoiljon@mail.ruTajik Technical University n.a. academician M.S. Osimi
Dushanbe, Tajikistan

B.N. Akramov

ORCID: 0000-0002-0049-0463 e-mail: akramov57@bk.ru

Tajik Technical University n.a. academician M.S. Osimi

Dushanbe, Tajikistan

K.Z. Tilloev

ORCID: 0000-0001-7237-2370 e-mail: kudratullo.tilloev@bk.ru

Tajik Technical University n.a. academician M.S. Osimi

Dushanbe, Tajikistan

M.A. Toshev

ORCID: 0000-0002-4400-8050 e-mail: mirzo.toshev1965@gmail.com

Tajik Technical University n.a. academician M.S. Osimi

Dushanbe, Tajikistan

The paper presents a dynamic study of the planetary drive mechanism of a crawler excavator based on the formulation of the Lagrange's equation of the second kind. Crawler excavators have good traction and can handle the heaviest soils. They can carry out excavation work all year round, even in the most difficult weather conditions. A planetary gear mechanism with a desired gear ratio was selected for a specific excavator model. A kinematic synthesis of the mechanism was carried out with the determination of the number of gear teeth and satellite blocks. The running gear of the XE215CLL crawler excavator with the BD-6BG1TRP engine was selected for the calculation. The power load on the planetary mechanism under study is determined according to the parameters of the selected excavator. The mechanism was designed using the methods of machine parts. The calculation of the mass geometric characteristics of the links of the planetary mechanism was performed. A dynamic model of the planetary mechanism was compiled based on the Lagrange's equation of the second kind. The law of motion of all links of the planetary mechanism was determined. The developed technique can also be applied to wheeled excavators.

Key words: dynamic model, planetary mechanism, Lagrange's equation of the second kind, kinematic synthesis, masses of links, moments of inertia of links, power load, reduced force and mass, crawler excavator, running gear drive.

FOR CITATION: I.A. Ismatov, B.N. Akramov, K.Z. Tilloev, M.A. Toshev. Dynamic simulation of crawler excavator planetary drive mechanism. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 2. Pp. 102-110. EDN: GECFTP

Введение

Привод ходовых механизмов колесных экскаваторов является сложной структурой, располагающейся на ходовом оборудовании. Механизм поворота колесного экскаватора состоит из редуктора поворота, установленного в расточку поворотной платформы. Редуктор поворота включает гидромотор, корпус и тормоз. В корпусе, сделанном как колесо внутреннего зацепления, есть два параллельно выполненных планетарных механизма [1].

Привод гусеничных экскаваторов осуществляется зубчатым венцом от гидромотора через планетарный редуктор. Планетарный механизм реализуется в связи с большими силовыми нагрузками на ходовой части гусеничного экскаватора, особенно в весенний, осенний и зимней периоды. Его наличие в приводе ходовой части позволяет регулировать движение экскаватора без нарушения режима работы двигателя. Привод состоит из гидромотора, который напрямую соединен с центральным колесом и тормозом. Подвижная часть корпуса соединена с неподвижным основанием через два подшипника – роликовый двухрядный и упорный шариковый. Защита от загрязнения внутренней полости привода обеспечивается двухсоставным уплотнением. Фиксированная часть корпуса скреплена с гусеничной рамой резьбовым соединением. Зубчатый венец, приводящий в движение гусеничную ленту экскаватора, заводится гидромотором через посредство вышеуказанных планетарных механизмов от [2-3].

Рассмотрим динамическое моделирование работы планетарного механизма привода гусеничного экскаватора. Планетарными называются многозвенные зубчатые механизмы с подвижными осями колес (сателлитные колеса) и рычажным звеном, вращающим оси этих колес

– водилом H . Главный признак этих механизмов – единичная степень свободы. В основном они предназначены для передачи и преобразования вращательного движения. Колеса 1 и 3, находящиеся на главной оси механизма (вход – выход), называются центральными. Неподвижное центральное колесо 3 именуется опорным (рис. 1). Такие механизмы могут обеспечить значительное снижение скорости и одновременно значительное увеличение крутящего момента. Вал водила планетарного механизма вращается с высокой скоростью. Планетарный механизм обеспечивает высокий крутящий момент и имеет компактную конструкцию, малые габариты и массу. Он используется для тихоходного оборудования и оборудования с высоким крутящим моментом, при этом двигатель внутреннего сгорания или другая высокоскоростная рабочая машина сцеплены с зубчатыми колесами на входном валу планетарного механизма для достижения замедления скорости выходного вала. Передаточное отношение простого одноступенчатого планетарного редуктора составляет от 3 до 10. Для оптимального решения задачи динамического моделирования механизма привода гусеничного экскаватора передаточное число планетарного механизма выбрано $U_{1H}=6$ [4].

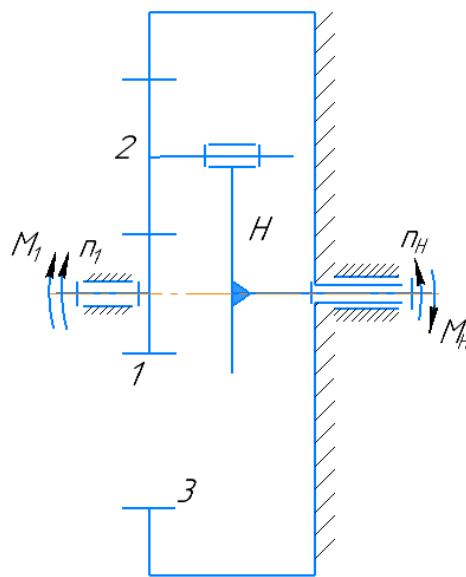


Рис. 1. Планетарный механизм

Fig. 1. Planetary mechanism

Перейдем к расчету конкретной конструкции. Вначале спроектируем планетарный редуктор на основе известных методов «Теории машин и механизмов» [5].

Метод исследования

Определяем передаточный число обращенного механизма по формуле тождества:

$$U_{13}^H = 1 - U_{1H} = 1 - 6 = -5$$

Определяем передаточный число механизма по число зубьев:

$$U_{13}^H = U_{12}^H \cdot U_{23}^H = \left(-\frac{z_2}{z_1} \right) \cdot \left(\frac{z_3}{z_2} \right) = -\frac{z_2 \cdot z_3}{z_1 \cdot z_2} = -\frac{z_3}{z_1} = -5$$

Все эпициклические механизмы из цилиндрических колес – соосные, поэтому должно выполняться условие соосности: ось входного звена и ось выходного звена механизма должны лежать на одной геометрической линии.

$$z_1 + z_2 = z_3 - z_2 \quad (1)$$

$$z_2 = \left(\frac{z_3}{z_1} - 1 \right) \cdot \frac{1}{2} = (5 - 1) \cdot \frac{1}{2} = 2$$

Из уравнения видно, что колесо 1 самое маленькое, и для его зубьев принимаем произвольно: $z_1 = 20$:

$$z_3 = z_1 \cdot \left(-\frac{z_3}{z_1} \right) = 20 \cdot 5 = 100$$

$$z_2 = z_1 \cdot 2 = 20 \cdot 2 = 40$$

В итоге $z_1=20$, $z_2=40$, $z_3=100$.

Определяем число сателлитных колес в механизме по условию соседства и сборки:

$$(K_C)_{\max} \leq \frac{180^0}{\arcsin\left(\frac{z_2 + 2}{z_2 + z_1}\right)} = \frac{180^0}{\arcsin\left(\frac{40 + 2}{40 + 20}\right)} = 4$$

$$\frac{z_1 \cdot U_{1H}}{K_C} \cdot (1 + K_C \cdot N) = M$$

$$\frac{20 \cdot 6}{4} \cdot (1 + 4 \cdot 0) = 30$$

Механизм при $K_C=4$ собирается.

Определяем угол между сателлитными колесами:

$$\varphi = \frac{360^0}{K_C} = \frac{360^0}{4} = 90^0$$

Определяем коэффициент полезного действия механизма:

$$\eta_{1H} = 1 - |1 - U_{H1}| \cdot \psi_H = 1 - |1 - 0,84| \cdot 0,05 = 0,95$$

$$\psi_H = 1 - \eta_{13}^H = 1 - 0,95 = 0,05$$

$$\eta_{13}^H = \eta_{12}^H \cdot \eta_{23}^H = 0,97 \cdot 0,98 = 0,95$$

$$U_{H1} = \frac{1}{U_{1H}} = \frac{1}{6} = 0,84$$

Принимаем для данного механизма модели экскаватора ЭКС.ХЕ215 CLL модель двигателя. ВД-6ВГ1ТРР с параметрами $N_{дв}=106,5$ кВт, $n_{дв}=1950$ об/мин.

Проводим кинематический расчет привода.

Частота вращения на валах механизма: $n_1=n_{дв}=1950$ об/мин.

$$n_2 = \frac{n_1}{U_{12}^H} = \frac{1950}{2} = 975 \text{ об/мин}$$

$$n_H = \frac{n_1}{U_{1H}} = \frac{1950}{6} = 325 \text{ об/мин}$$

Угловая скорость на валах механизма определяется по формуле (2):

$$\omega = \frac{\pi n}{30} \tag{2}$$

$$\omega_1 = 204,1 \text{ р/с}, \quad \omega_2 = 102,05 \text{ р/с}, \quad \omega_H = 34,016 \text{ р/с}$$

Крутящий момент на валах механизма:

$$T_1 = \frac{N_1}{\omega_1} = \frac{106,5 \cdot 10^3}{204,1} = 521,8 \text{ Нм}$$

$$T_2 = T_1 \cdot \eta_{12}^H \cdot U_{12}^H = 521,8 \cdot 0,97 \cdot 2 = 1012,3 \text{ Нм}$$

$$T_H = T_1 \cdot U_{1H} \cdot \eta_{1H} = 521,8 \cdot 6 \cdot 0,95 = 2974,26 \text{ Нм}$$

Мощности на валах механизма:

$$N_1 = N_{дв} = 106,5 \text{ кВт}$$

$$N_2 = N_1 \cdot \eta_{12}^H \cdot \eta_{под} = 106,5 \cdot 0,97 \cdot 0,99 = 102,27 \text{ кВт}$$

$$N_H = T_H \cdot \omega_H = 2974,26 \cdot 10^{-3} \cdot 34,016 = 101,17 \text{ Нм}$$

Проводим конструирование данного механизма методами курса «Детали машин и основе конструирование» [6-7]. Получаем следующие результаты:

- делительные диаметры: $d_1 = 160 \text{ мм}$ $d_2 = 320 \text{ мм}$ $d_3 = 800 \text{ мм}$ и ширина зуба колес $b = 60 \text{ мм}$;
- диаметры головок зубьев: $d_{a_1} = 176 \text{ мм}$ $d_{a_2} = 336 \text{ мм}$ $d_{a_3} = 784 \text{ мм}$;
- диаметры ножек зубьев: $d_{f_1} = 140,8 \text{ мм}$ $d_{f_2} = 300,8 \text{ мм}$ $d_{f_3} = 819,2 \text{ мм}$.

Диаметр валов под зубчатые колеса находим из проектировочного расчета на чистое кручение по пониженному допускаемому напряжению (это позволяет на этапе проектировочного расчета не учитывать влияние изгибных напряжений). Для валов из сталей 40, 15 и Ст6 принимают величину $[\tau_K] = 15 \div 20 \text{ Мпа}$. Полученный диаметр вала – формула (3) (после стандартизации) позволяет подобрать подшипники качения:

$$d_e = \sqrt[3]{\frac{16M}{\pi[\tau_K]}} \quad (3)$$

где $d_{e_1} = 50 \text{ мм}$, $d_{e_2} = 60 \text{ мм}$, $d_{e_H} = 90 \text{ мм}$.

Подбираем подшипники для валов, параметры которых представлены в табл. 1.

Таблица 1.
Параметры подшипников

Table 1.
Bearing parameters

Условное обозначение	Диаметр внутренней кольцо подшипника (d), мм	Диаметр наружного кольцо подшипника (D), мм	Ширина подшипника (B), мм
310	50	110	27
312	60	130	31
318	90	190	43

Необходимо определить массу и моменты инерции элементов планетарного механизма. Если объем зуба равен объему впадин, то суммарный объем рассчитываем по формуле (4):

$$V_{f_i} = \left[\left(\frac{d_{a_i}}{2} \right)^2 - \left(\frac{d_{f_i}}{2} \right)^2 \right] \cdot \pi \cdot b, \quad (4)$$

где $V_{f_1} = 262614,52 \text{ мм}^3$, $V_{f_2} = 527881,72 \text{ мм}^3$.

Определяем объем внутреннего цилиндра с учетом отверстия для подшипников вала по формуле (5):

$$V_{O_i} = \left[\left(\frac{d_{f_i}}{2} \right)^2 - \left(\frac{d_{e_i}}{2} \right)^2 \right] \cdot \pi b, \quad (5)$$

где $V_{O_1} = 363830,544 \text{ мм}^3$, $V_{O_2} = 3465648,144 \text{ мм}^3$.

Определяем объем зубчатых колес по формуле (6):

$$V_1 = V_{f_1} + V_{o_1}, \quad (6)$$

где $V_1 = 626445,064 \text{ мм}^3$, $V_2 = 3993529,864 \text{ мм}^3$.

Определяем массу зубчатых колес механизма по формуле (7):

$$m_1 = V_1 \cdot \rho, \quad (7)$$

где $m_1 = 4,94 \text{ кг}$, $m_2 = 31,5 \text{ кг}$.

Определяем момент инерции зубчатых колес механизма по диаметру вершин зубьев J_1 , по диаметру впадин зубьев J_2 , по отверстию установки подшипников вала J_3 . Окончательная формула для расчета момента инерции колеса имеет вид:

$$J_K = \frac{J_1 - 3J_2 + J_3}{2}, \quad (8)$$

где $J_{K_1} = 0,00818 \text{ кг} \cdot \text{м}^4$, $J_{K_2} = 0,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^4$.

Определение массы и момента инерции водила

Определяем общую длину насаживаемого одной ветви водила на механизме:

$$L = H + 50 - 150 = 240 + 50 - 105 = 185 \text{ мм}.$$

Площадь одной ветви водила с учетом отверстия подшипника:

$$S_H = lb = 185 \cdot 80 = 14800 \text{ мм}^2.$$

Площадь отверстия для вставки подшипника:

$$S_O = \pi R^2 = 3,14 \cdot 30^2 = 2826 \text{ мм}^2.$$

Общая площадь одной ветви водила:

$$S_{H'} = S_H - S_O = 14800 - 2826 = 11974 \text{ мм}^2.$$

Определяем общий объем одной ветви водила:

$$V' = S_{H'} \cdot a = 11974 \cdot 10 = 119740 \text{ мм}^3.$$

Определяем массу одной ветви водила:

$$m' = V' \rho = 119740 \cdot 10^{-9} \cdot 7,9 \cdot 10^3 = 0,945 \text{ кг}.$$

Определяем объем и массу центральной части водила для посадки подшипника:

$$V'' = \pi (R^2 - r^2) \cdot a' = 3,14 (105^2 - 90^2) \cdot 50 = 314000 \text{ мм}^3,$$

$$m'' = V'' \rho = 314000 \cdot 10^{-9} \cdot 7,9 \cdot 10^3 = 2,48 \text{ кг}.$$

Определим общую массу водила:

$$m_H = 4m' + m'' = 4 \cdot 0,945 + 2,48 = 6,2 \text{ кг}.$$

Определяем центр тяжести одной ветви водила (рис. 2):

$$X_C = \frac{x_1 s_1 - x_2 s_2}{s_1 - s_2} = \frac{92,5 \cdot 14800 - 50 \cdot 2826}{14800 - 2826} = 102,53 \text{ мм},$$

здесь, S_1 – площадь прямоугольной части одной ветви водила; S_2 – площадь центрального кольца водила; x_1 и x_2 – координаты центров тяжести вышеуказанных элементов водило.

По теореме Штейнера находим момент инерции водила H относительно оси вращения [8]:

$$J = J_H + m x_1^2,$$

где J_H – момент инерции водила относительно его центр тяжести, x_1 – расстояние от оси вращения водила до его центра тяжести. Из расчета найдем момент инерции водила относительно оси вращения:

$$J_{H(OK)} = J_0 + J_{кол} = 0,143 + 0,00124 = 0,144 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

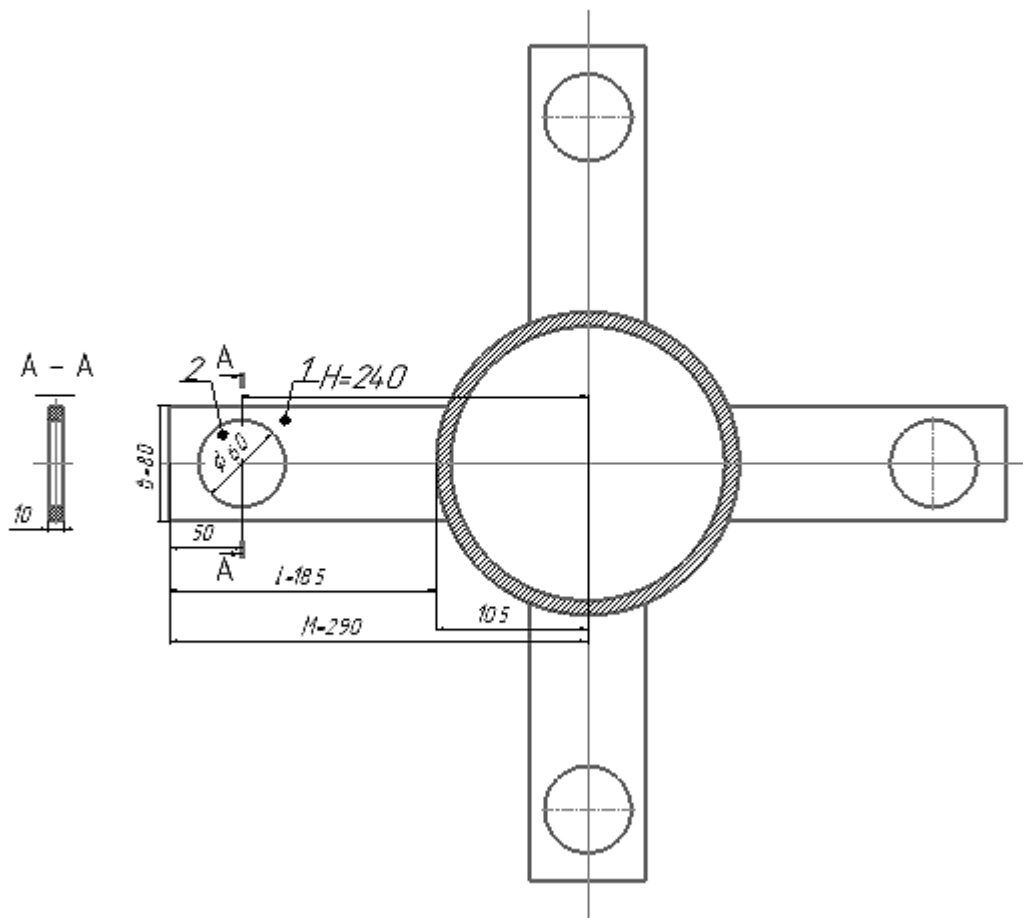


Рис. 2. Схема водила планетарного механизма

Fig. 2. Planetary mechanism carrier diagram

Находим кинетическую энергию всех подвижных частей механизма по формуле:

$$T = \frac{J_1 \omega_1^2}{2} + 4 \left(\frac{m_2 v_{C2}^2}{2} + \frac{J_2 \omega_2^2}{2} \right) + \frac{J_H \omega_H^2}{2}.$$

Получаем $T = 5269,6$ Дж.

Вычислим приведенный к оси ведущего вала момент инерции подвижных частей механизма:

$$J_{np} = J_1 + 4m_2 \frac{z_1^2 H^2}{(z_1 + z_2)^2} + 4J_2 \left(\frac{z_1 \cdot z_3 - z_2}{z_2 \cdot z_1 + z_3} \right)^2 + J_H \frac{z_1^2}{(z_1 + z_3)^2}$$

Расчет дает $J_{np} = 0,821$ кг м².

Результаты исследования

Угловое ускорение ведущего вала $\varepsilon_1 = \varphi_1''$ найдем из динамического уравнения Лагранжа второго рода:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_1} = \theta \varphi_1, \quad (9)$$

где $\frac{\partial T}{\partial \varphi_1} = 0$, $\frac{\partial T}{\partial \varphi_1'} = J_{np} \varphi_1'$.

Переходим к определению обобщенной силы. Действующая нагрузка: вес подвижных частей, приложенный в точке, совпадающей на прямой и совпадающей с осями ведущего и ведомого валов; движущий момент M_1 , приложенный к ведущему валу и момент сил полезного сопротивления M_H , приложенный к выходному валу. Обобщенную силу $\theta \varphi_1$ при заданном значении обобщенной координаты φ_1 получим сообщением углу φ_1 малого приращения $\delta \varphi_1$. Найдем сумму элементарных работ действующих сил на этом возможном перемещении. В нее войдет положительная работа движущего момента M_1 и отрицательная работа момента сил полезного сопротивления M_H [9-11]:

$$\delta A \varphi_1 = M_1 \delta \varphi_1 - M_H \delta \varphi_H. \quad (10)$$

Зависимость между угловыми перемещениями ведущего и ведомого валов совпадает с отношением их угловых скоростей:

$$\delta \varphi_H = \frac{z_1}{z_1 + z_3} \delta \varphi_1,$$

тогда:

$$\delta A \varphi_1 = \left(M_1 - M_H \frac{z_1}{z_1 + z_3} \right) \delta \varphi_1.$$

Обобщенная сила составит:

$$\theta \varphi_1 = \frac{\delta A \varphi_1}{\delta \varphi_1} = M_1 - M_H \frac{z_1}{z_1 + z_3} = 521,8 \cdot 10^3 - 2974,26 \cdot 10^3 \cdot \frac{20}{20 + 100} = 26,09 \text{ Дж.}$$

Подставляя все найденные значения, получим:

$$J_{np} \varphi_1'' = \frac{\delta A \varphi_1}{\delta \varphi_1} = M_1 - M_H \frac{z_1}{z_1 + z_3} = 521,8 \cdot 10^3 - 2974,26 \cdot 10^3 \cdot \frac{20}{20 + 100} = 26,09 \text{ Дж.}$$

Угловое ускорение входного вала найдем по формуле:

$$\varepsilon_1 = \varphi_1'' = \frac{M_1 - M_H \frac{z_1}{z_1 + z_3}}{J_1 + 4m_2 \frac{z_1^2 H^2}{(z_1 + z_3)^2} + 4J_2 \left(\frac{z_1}{z_2} - \frac{z_3 - z_2}{z_1 + z_3} \right)^2 + J_H \frac{z_1^2}{(z_1 + z_3)^2}}.$$

Подставив необходимые величины, получим:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 = \varphi_1'' &= 126,7 \text{ p/c}^2, \\ \varepsilon_2 = \varphi_2'' &= -\frac{z_1}{z_2} \cdot \frac{z_3 - z_2}{z_1 + z_2} \varepsilon_1 = -\frac{20}{40} \cdot \frac{100 - 40}{20 + 40} \cdot 126,7 = -63,35 \text{ p/c}^2, \\ \varepsilon_H = \varphi_H'' &= \frac{z_1}{z_1 + z_3} \varepsilon_1 = \frac{20}{20 + 100} \cdot 126,7 = 21,12 \text{ p/c}^2. \end{aligned}$$

Из $M_1 \geq M_H \frac{z_1}{z_1 + z_3}$ следует, что звенья механизма имеют ускоренное движение (знаки угловых ускорений совпадают со знаками угловых скоростей).

Выводы

Рассмотрена методика получения динамической модели планетарного механизма на основе методов дисциплин «Теория машин и механизмов», «Детали машин», «Сопротивление материалов» и «Теоретическая механика». Она включает: выбор схемы механизма на основе его кинематических возможностей, кинематический синтез планетарного механизма, силовой анализ с определением КПД механизма, выбор необходимых материалов, конструкторский

расчет на основе контактного прочностного изгибаемости, определение масс и моментов инерции звеньев, составлении динамической модели путем расчета приведенных обобщенных сил на основе обобщенных координат.

Решение составленного уравнения Лагранжа второго рода позволяет получить зависимость движения выходных и промежуточных звеньев планетарного механизма в явном виде. Расчет по данной методике позволяет точнее согласовать режимы работы экскаватора с условиями его работы (силовыми нагрузками) в любое время года и в любых погодных условиях.

Библиографический список

1. **Баловнев, В.И.** Машины для земляных работ: контракция, расчет, потребительские свойства. Кн. 1. Экскаваторы и землеройно-транспортные машины: учебное пособие для вузов / В.И. Баловнев, С.Н. Глаголев, Р.Г. Данилов и др. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2011. – 401 с.
2. **Домбровский, Н.Г.** Землеройно-транспортные машины. Учебник для студентов специальности «Строительные и дорожные машины и оборудование» / Н.Г. Домбровский, М.И. Гальперин. – М.: Машиностроение, 1965. – 276 с.
3. **Доценко, А. И.** Машины для земляных работ: учебник для вузов / А.И. Доценко, Г.Н. Карасев, Г.В. Кустарев, К.К. Шестопалов. – М.: Издательский Дом «БАСТЕТ», 2012. – 688 с.
4. **Тимофеев, Г.А.** Теория машин и механизмов / Г.А. Тимофеев. – М.: Юрайт, 2013. – 351 с.
5. **Матвеев, Ю.А.** Теория машин и механизмов / Ю.А. Матвеев, Л.В. Матвеева. – М.: Альфа-М, 2009. – 320 с.
6. **Иванов, М. Н.** Детали машин: Учебник для машиностроительных специальностей вузов / М.Н. Иванов, В.А. Финогенов. – 12-е изд. испр. – М.: Высшая школа, 2008. – 408 с.
7. **Андриенко, Л.А.** Детали машин: Учебник для вузов / Л.А. Андриенко, Б.А. Байков, И.К. Ганулич и др. Под ред. О.А. Ряховского. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 465 с.
8. **Яблонский, А.А.** Курс теоретической механики. Часть 2. Динамика / А.А. Яблонский, В.М. Никифоров. – М.: Высшая школа, 1966. – 428 с.
9. **Khurmi, R.S.** Machinal Design / R.S. Khurmi, J.K. Gupta. – New Delhi-110055, S.I.Units-Ram Nagar, 2005. – 1054 p.
10. Shigley's Mechanical Engineering Desing. – The McGraw-Hill Companies, 2008. – 1054 p.
11. **Акрамов, Б.Н.** О кинематических возможностях замкнутых зубчатых дифференциальных механизмов с цилиндрическими колесами / Б.Н. Акрамов, И.А. Исмаатов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. № 3. С. 82-89.

*Дата поступления
в редакцию: 11.01.2024*

*Дата принятия
к публикации: 01.03.2024*

УДК 629.015

EDN: PSBFIA

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ АЛГОРИТМА
ИМПУЛЬСНОГО ПОДАВЛЕНИЯ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ЯВЛЕНИЙ
В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ
ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИВОДА В ТЯГОВОМ РЕЖИМЕ
МЕТОДАМИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

А.В. Климов

ORCID: 0000-0002-5351-3622 e-mail: klimmanen@mail.ru

ООО «Инновационный центр КАМАЗ»

Москва, Россия

А.В. Антонян

ORCID: 0000-0002-5566-6569 e-mail: AntonyanAV@kamaz.ru

ООО «Инновационный центр КАМАЗ»

Москва, Россия

Предложен и верифицирован метод наблюдения буксования ведущего колеса с функцией подавления автоколебаний, заключающийся в выводе из системы свободной энергии колебательного движения в случае развития процесса с отрицательным затуханием. В результате исследования получен эффективный алгоритм подавления автоколебательных явлений в электромеханической системе привода колеса. Его применение снижает пиковые значения (амплитуды) колебаний угловых скоростей колес; пиковые значения автоколебательного процесса по угловым скоростям снижаются на 12,3 %, а для крутящих моментов – на 38 %. Практическая ценность исследования заключается в возможности использования разработанного алгоритма подавления автоколебаний для систем управления транспортными средствами различного класса, оснащенными индивидуальным тяговым электроприводом ведущих колес.

Ключевые слова: автоколебания, отрицательное затухание колебаний, отрицательное вязкое трение, скольжение, шина, функция Ляпунова, демпфирование колебаний, импульсное подавление колебаний.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Климов, А.В. Исследование работоспособности алгоритма импульсного подавления автоколебательных явлений в электромеханической системе тягового электрического привода в тяговом режиме методами имитационного моделирования / А.В. Климов, А.В. Антонян // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2024. № 2. С. 111-122. EDN: PSBFIA

**SIMULATION STUDY OF PERFORMANCE
OF ALGORITHM FOR PULSE SUPPRESSION OF SELF-OSCILLATING
PHENOMENA IN ELECTROMECHANICAL SYSTEM
OF TRACTION ELECTRIC DRIVE IN TRACTION MODE**

A.V. Klimov

ORCID: 0000-0002-5351-3622 e-mail: klimmanen@mail.ru

KAMAZ Innovation Center LLC

Moscow, Russia

A.V. Antonyan

ORCID: 0000-0002-5566-6569 e-mail: AntonyanAV@kamaz.ru

KAMAZ Innovation Center LLC

Moscow, Russia

Abstract. The paper presents a method for observing the slipping of the drive wheel with the function of suppressing self-oscillations, where the oscillatory motion is removed from the free energy system in the case of the development of a process with negative damping. The proposed algorithm for suppressing self-oscillatory phenomena in the electromechanical wheel drive system has shown its efficiency. Peak values (amplitudes) of wheel angular velocity oscillations are reduced by 12.3 %, for torques oscillations – by 38 %. The developed algorithm for suppressing self-oscillations can be used as part of control systems for vehicles of various classes equipped with an individual traction electric drive of the drive wheels.

Key words: self-oscillations, negative oscillation damping, negative viscous friction, slip, tire, Lyapunov function, oscillation damping, impulse suppression of oscillations.

FOR CITATION: A.V. Klimov, A.V. Antonyan. Simulation study of performance of algorithm for pulse suppression of self-oscillating phenomena in electromechanical system of traction electric drive in traction mode. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 2. Pp. 111-122. EDN: PSBFIA

О возможности зарождения автоколебательных явлений в электромеханической системе

В [1] показано, что в автоколебаниях переменная сила, поддерживающая движение, создается или управляется самим движением, и при его прекращении исчезает. В вынужденных колебаниях поддерживающая движение переменная сила существует независимо от движения и остается даже в том случае, когда колебательное движение прекращается. Существует еще одна точка зрения [2], согласно которой они рассматриваются как свободные колебания с отрицательным затуханием, и она не противоречит предыдущей. Дело в том, что обычная сила вязкости, вызывающая затухание, есть сила, пропорциональная скорости колебания и направленная против нее. Отрицательная же сила затухания также пропорциональна скорости, но направлена в сторону скорости. Поэтому вместо уменьшения амплитуд при свободных колебаниях в данном случае вследствие отрицательного затухания мы имеем их увеличения. Поскольку сила затухания, будь она положительна или отрицательна, исчезает при остановке движения, второе определение находится в согласии с первым.

В работах [3-8] показано что для механической системы *дорога – эластичное колесо – электромеханический привод* имеет место зарождение автоколебательных процессов как для тягового, так и тормозного режима качения колеса. Автоколебания зарождаются, когда рабочая точка системы находится на падающем участке кривой трения скольжения, которому свойственно снижение силы трения при росте скорости скольжения. Этому участку свойственно такое понятие, как *отрицательное вязкое трение* [9]. В работах [3-8] также показано, что при возбуждении автоколебательных процессов увеличиваются динамические нагрузки на механический привод, вплоть до выхода его из строя.

Метод импульсного подавления автоколебательного процесса в тяговом электроприводе, работающем в тяговом режиме

Процесс зарождения автоколебаний нелинейного осциллятора рассматривается в [10] как процесс потери устойчивости. Рассмотрим вращательное движение ведущего колеса и ротора тягового электродвигателя. В качестве управляющего фактора, препятствующего зарождению автоколебательного процесса крутящего момента тягового электродвигателя, будем рассматривать крутящий момент «вязкого трения» вида:

$$M_d = -K_w \omega_k, \quad (1)$$

направленный против угловой скорости вращения колеса ω_k (здесь K_w – коэффициент вязкого трения). Тогда получим следующие уравнения:

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_k = \omega_k \\ \dot{\omega}_k = \frac{1}{J_k} [c_m(\varphi_m - \varphi_k) - Fr_k - K_w \omega_k] \\ \dot{\varphi}_m = \omega_m \\ \dot{\omega}_m = \frac{1}{J_m} [-c_m(\varphi_m - \varphi_k) + M_t + K_w \omega_k] \end{cases} \quad (2)$$

Для анализа устойчивости решения системы уравнений (1) воспользуемся вторым методом Ляпунова. Составим кандидата на функцию Ляпунова U в виде квадратичной формы фазовых переменных:

$$U = \frac{1}{2} (\varphi_k^2 + \omega_k^2 + \varphi_m^2 + \omega_m^2) > 0 \quad (3)$$

Полная производная от функции (2) по времени:

$$\frac{dU}{dt} = (\varphi_k \omega_k + \varphi_m \omega_m) + \left(\frac{\omega_k}{J_k} - \frac{\omega_m}{J_m} \right) [c_m(\varphi_m - \varphi_k) - K_w \omega_k] - \frac{\omega_k}{J_k} Fr_k + \frac{\omega_m}{J_m} M_t. \quad (4)$$

Чтобы система (2) была устойчивой, необходимо выполнение условия $\frac{dU}{dt} \leq 0$. Рассмотрим, в каких случаях оно возможно. Для этого проанализируем каждое слагаемое выражения (4).

Слагаемое $A_s = \varphi_k \omega_k + \varphi_m \omega_m > 0$, но при этом оно ограничено по абсолютному значению, т.к. $0 \leq \varphi_k \leq 2\pi$; $0 \leq \varphi_m \leq 2\pi$; $0 \leq \omega_k \leq \omega_{kmax}$; $0 \leq \omega_m \leq \omega_{mmax}$. Для того, чтобы выражение (4) было неположительным, необходимо снижать ω_k и ω_m , т.е. уменьшать крутящий момент M_t при буксовании ведущих колес, что является стандартной функцией алгоритма работы любой противобуксовочной системы.

Второе слагаемое $B_s = \left(\frac{\omega_k}{J_k} - \frac{\omega_m}{J_m} \right) [c_m(\varphi_m - \varphi_k) - K_w \omega_k]$ является знакопеременным. В качестве фактора, управляющего значением B_s , может выступить демпфирующий момент $M_d = -K_w \omega_k$. В случае, если $\frac{\omega_k}{J_k} - \frac{\omega_m}{J_m} > 0$, необходимо, чтобы упругий момент был меньше демпфирующего $C_m(\varphi_m - \varphi_k) < K_w \omega_k$.

Для выполнения условия (2) необходимо увеличивать коэффициент демпфирования K_w . Чтобы определиться, в каких случаях необходимо это делать, обратимся к условию (1), которое означает, что скорость вращения колеса больше скорости вращения электромагнитного поля в тяговом электродвигателе. При этом электродвигатель переходит в генераторный режим, момент M_t будет снижаться вплоть до перехода в область отрицательных значений (рекуперация); ω_k будет резко увеличиваться, что может привести к увеличению значения диагностического признака буксования i -го ведущего колеса в тяговом режиме качения dw_i . Управление демпфированием K_w с целью исключения пробуксовки колес и недопущения возникновения автоколебаний необходимо проводить таким образом, чтобы обеспечить оптимальное значение проскальзывание dw_i ведущих колес в диапазоне $0,1 \leq dw_i \leq 0,3, i = 2; 4$ [11]. Исходя из вышеизложенного, выражение для управляющего момента демпфирования M_d может быть представлено в следующем виде:

$$M_d = -K_w \omega_k f_{relay} \quad (1)$$

где f_{relay} – релейная функция, введение которой необходимо для снижения вероятности возникновения автоколебательного процесса в контуре управления.

Рассмотрим теперь случай:

$$\frac{\omega_k}{J_k} - \frac{\omega_m}{J_m} \leq 0 \quad (4)$$

По аналогии с предыдущим случаем, условие (4) равносильно выполнению условия $f_{relay} = 0$. Тогда для обеспечения условия $B_s < 0$ необходимо обеспечить $K_w = 0$. При этом B_s будет иметь максимальное по абсолютной величине значение.

Теперь в выражении (4) проанализируем слагаемое $C_s = -\frac{\omega_k}{J_k} Fr_k < 0$. Т.к. это слагаемое меньше нуля, ничего предпринимать не следует.

Слагаемое $D_s = \frac{\omega_m}{J_m} M_t > 0$, и при повышенном буксовании необходимо снижать M_t , что является стандартной функцией противобуксовочной системы.

Можно сделать вывод о том, что, поскольку в тяговом режиме работы ТЭД автоколебательные процессы зарождаются при повышенных значениях проскальзывания ведущих колес, то для их подавления необходимо создать алгоритм протобуксовочной системы, который будет включать в себя дополнительную функцию импульсного подавления автоколебаний за счет введения в назначение уставки крутящего момента для ТЭД дополнительного слагаемого (3), представляющего собой момент «вязкого трения» вида, направленный против угловой скорости вращения колеса ω_k .

Для определения значения коэффициента демпфирования K_w воспользуемся результатами исследований, приведенных в [12], где показано, что зародившиеся автоколебания в системах вида (2) исчезают при:

$$K_w \geq 2\sqrt{J_k C_m} \quad (5)$$

Угловую жесткость C_{mi} для i -го колеса можно оценить в процессе управления как:

$$C_{mi} = \frac{\Delta M_{ti}}{\Delta \omega_{ki}}, i = 1; 2. \quad (6)$$

где приращения оценок электромагнитного крутящего моментов $\Delta M_{t2} = M_{t2}(t_j) - M_{t2}(t_{j-1})$, $M_{t4} = M_{t4}(t_j) - M_{t4}(t_{j-1})$ и угловой скорости колес $\Delta \omega_{k2} = \omega_{k2}(t_j) - \omega_{k2}(t_{j-1})$, $\omega_{k4} = \omega_{k4}(t_j) - \omega_{k4}(t_{j-1})$; t_j, t_{j-1} – текущий и предыдущий моменты времени.

Алгоритм подавления автоколебаний в тяговом режиме качения колеса

На основании сигналов от датчиков угловой скорости колес блок управления, оснащенный алгоритмом подавления автоколебаний, определяет для функционирования следующие характеристики:

- скорость движения электробуса (на основании угловой скорости неведущих колес);
- характер движения электробуса – прямолинейное или криволинейное (на основании сравнения угловых скоростей неведущих колес);
- проскальзывание ведущих колес (на основании разности угловых скоростей ведущих и неведущих колес).

Работа алгоритма подавления автоколебаний подчинена управлению электромеханической системой электродвигатель-механический привод-колесо, состояние которой описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} J_k \dot{\omega}_{k2} = u_2 k_2 M_{ТЭД2} - M_2 + M_{d2} \\ J_k \dot{\omega}_{k4} = u_4 k_4 M_{ТЭД4} - M_4 + M_{d4} \end{cases}$$

где индекс «2» относится к левому ведущему колесу, индекс «4» - к правому; $M_{ТЭД2}, M_{ТЭД4}$ – уставки крутящих моментов тяговых электродвигателей для левого и правого ведущих колес соответственно (в соответствии с запросом педали акселератора h_{dr}); u_2, u_4 – управляющие сигналы для ведущих колес; k_2, k_4 – коэффициенты коррекции, позволяющие учесть перерас-

пределение тормозного момента при криволинейном движении; M_2, M_4 – моменты сопротивления качению на ведущих колесах; $M_{д2}, M_{д4}$ – демпфирующие моменты, подавляющие автоколебания.

Управляющие сигналы u_2, u_4 и коэффициенты коррекции k_2 и k_4 будем вычислять по зависимостям, приведенным в [13]. Алгоритм подавления автоколебательных явлений в тяговом режиме качения колеса при возникновении буксования представлен на рис. 1 [14].

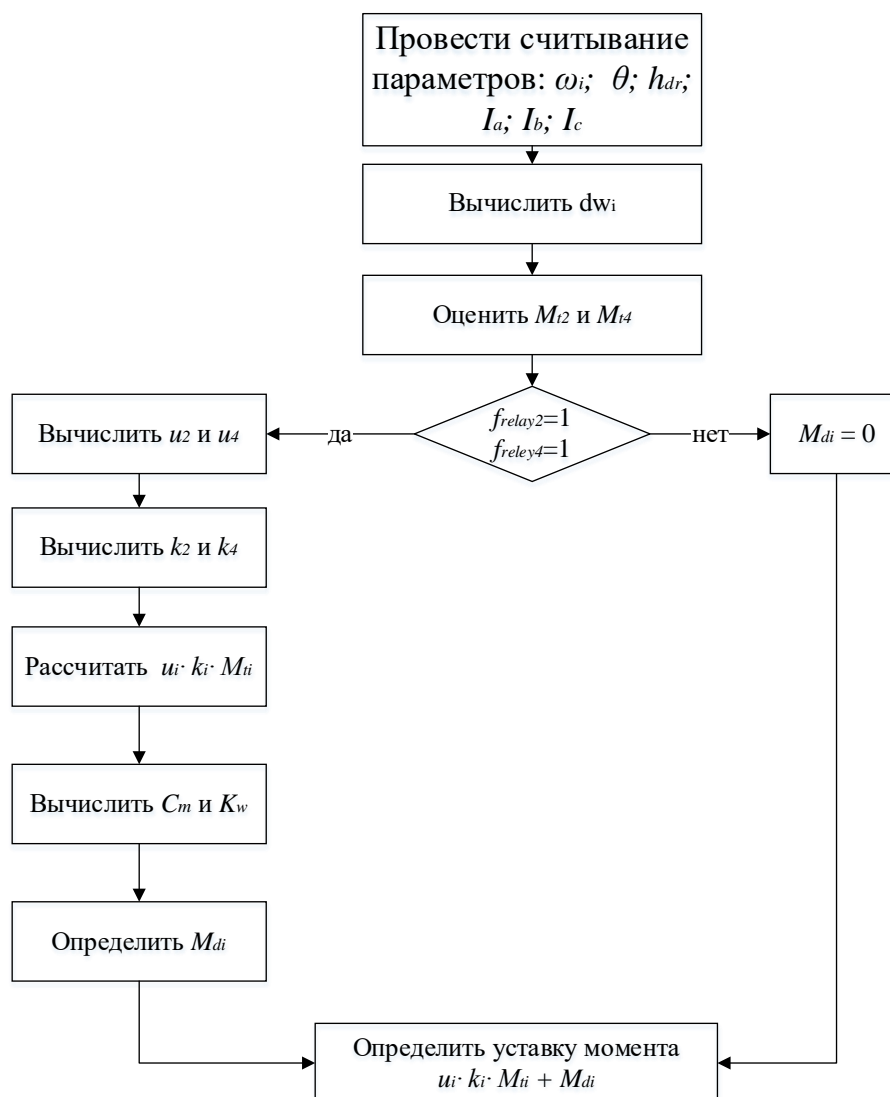


Рис. 1. Блок-схема алгоритма подавления автоколебательных явлений в тяговом режиме качения колеса

Fig. 1. Block diagram of the algorithm for suppressing self-oscillatory phenomena in the traction mode of wheel rolling

1. Вычислить диагностические признаки буксования dw_2 и dw_4 и функции f_{relay2} и f_{relay4} для левого и правого ведущих колес.
2. Провести оценку значений крутящих моментов M_{t2}, M_{t4} для левого и правого тяговых электродвигателей.
3. Если функции $f_{relay2} = 1$ или $f_{relay4} = 1$:
 - 3.1. Вычислить управляющие сигналы u_2 или u_4 и коэффициенты коррекции k_2 или k_4 .

- 3.2. Рассчитать требуемый крутящий момент для левого $u_2 k_2 M_{тэд_2}$ или правого $u_4 k_4 M_{тэд_4}$ ведущих колес.
 - 3.3. Вычислить угловые жесткости C_{m2} и C_{m4} по формуле (6).
 - 3.4. Вычислить минимальные значения K_{w2} и K_{w4} по формуле (5).
 - 3.5. Вычислить M_{d2} или M_{d4} по формуле (8).
 - 3.6. Если $f_{relay2} = 0$, то $K_{w2} = 0$ или если $f_{relay4} = 0$, то $K_{w4} = 0$.
 4. Сформировать уставки крутящих моментов $u_2 k_2 M_{тэд_2} + M_{d2}$ для левого и $u_4 k_4 M_{тэд_4} + M_{d4}$ для правого тяговых электрических двигателей.
- На рис. 2 представлена блок-схема для реализации алгоритма подавления автоколебаний в MatLab.

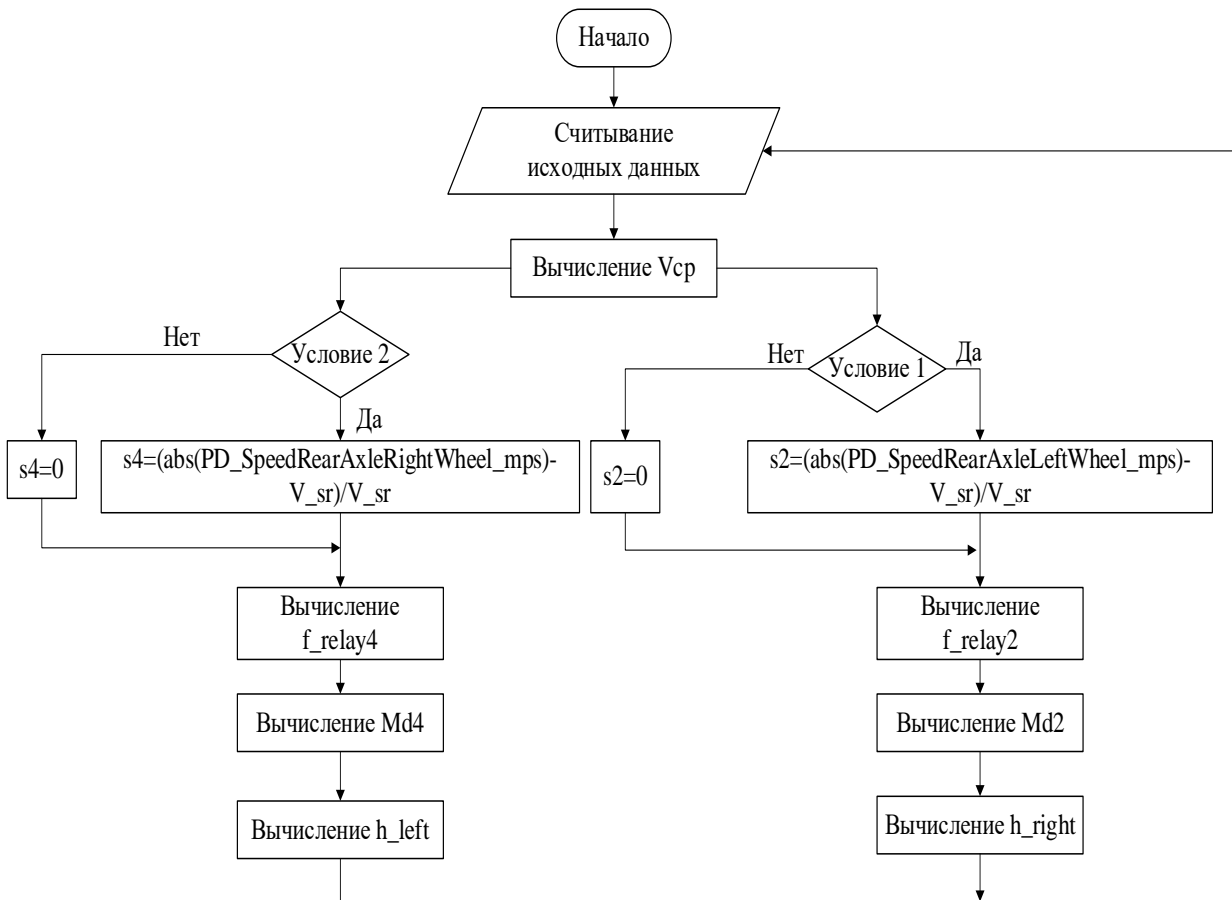


Рис. 2. Блок-схема для реализации алгоритма подавления автоколебаний в MatLab:

Условие 1: $abs(PD_SpeedRearAxleLeftWheel_mps) > V_sr \ \&\& \ V_sr \sim 0$

Условие 2: $abs(PD_SpeedRearAxleRightWheel_mps) > abs(V_sr) \ \&\& \ V_sr \sim 0$

Fig. 2. Block diagram for implementing the self-oscillation suppression algorithm in MatLab:

Condition 1: $abs(PD_SpeedRearAxleLeftWheel_mps) > V_sr \ \&\& \ V_sr \sim 0$

Condition 2: $abs(PD_SpeedRearAxleRightWheel_mps) > abs(V_sr) \ \&\& \ V_sr \sim 0$

Результатом работы алгоритма является уставки крутящего момента тягового или рекуперативного для левого h_left и правого h_right тяговых электрических двигателей, скорректированные с учетом демпфирующего автоколебания момента.

Реализация алгоритма подавления автоколебаний в MatLab приведена на рис. 3.

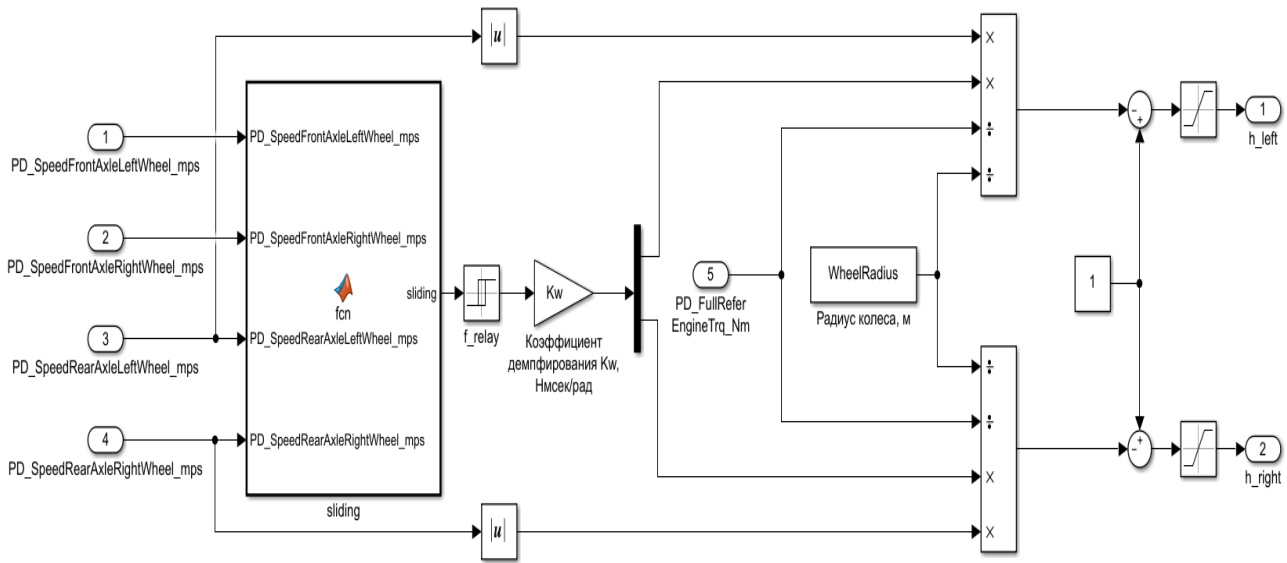


Рис. 3. Реализация алгоритма подавления автоколебаний в MatLab:

PD_SpeedFrontAxleLeftWheel_mps – сигнал о значении линейной скорости переднего левого колеса, м/с;
PD_SpeedFrontAxleRightWheel_mps – сигнал о значении линейной скорости переднего правого колеса, м/с;
PD_SpeedRearAxleLeftWheel_mps – сигнал о значении линейной скорости заднего левого колеса, м/с;
PD_SpeedRearAxleRightWheel_mps – сигнал о значении линейной скорости заднего правого колеса, м/с

Fig. 3. Algorithm for suppressing self-oscillations in MatLab:

PD_SpeedFrontAxleLeftWheel_mps – signal of the linear speed of the front left wheel, m/s;
PD_SpeedFrontAxleRightWheel_mps – signal of the linear speed of the front right wheel, m/s;
PD_SpeedRearAxleLeftWheel_mps – signal of the linear speed of the rear left wheel, m/s;
PD_SpeedRearAxleRightWheel_mps – signal of the linear speed of the rear right wheel, m/s

Программная реализация в MatLab функции *sliding* по определению коэффициента скольжения колеса для определения возможности зарождения автоколебательного процесса показана на рис. 4.

```
function sliding = fcn(PD_SpeedFrontAxleLeftWheel_mps,
    PD_SpeedFrontAxleRightWheel_mps, PD_SpeedRearAxleLeftWheel_mps,
    PD_SpeedRearAxleRightWheel_mps)

    V_sr=abs(PD_SpeedFrontAxleLeftWheel_mps+PD_SpeedFrontAxleRightWheel_mps)/2;
    s2=0;
    s4=0;
    if abs(PD_SpeedRearAxleLeftWheel_mps)>V_sr && V_sr~=0
        s2=(abs(PD_SpeedRearAxleLeftWheel_mps)-V_sr)/V_sr;
    end
    if abs(PD_SpeedRearAxleRightWheel_mps)>abs(V_sr) && V_sr~=0
        s4=(abs(PD_SpeedRearAxleRightWheel_mps)-V_sr)/V_sr;
    end
    sliding = [s2; s4];
```

Рис. 4. Программная реализация функции расчета коэффициента скольжения колеса

Fig. 4. Wheel slip coefficient calculation function in Matlab

На рис. 5 показана программная реализация определения коэффициента демпфирования K_w .

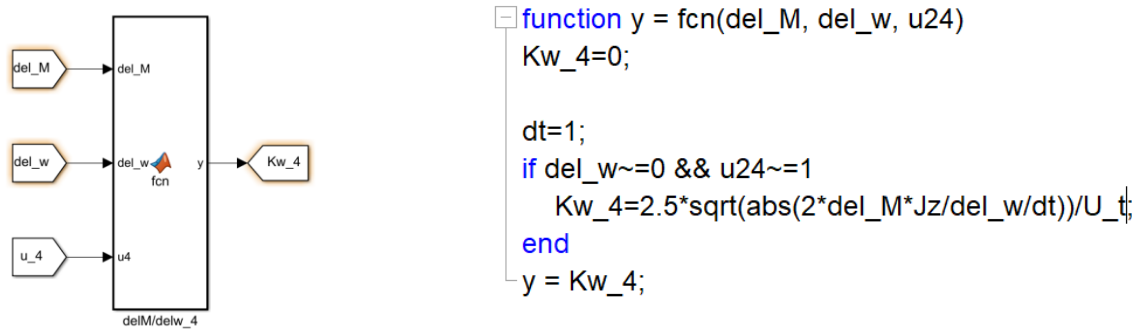


Рис. 5. Программная реализация определения коэффициента демпфирования K_w :
 del_M – приращение крутящего момента, Нм; del_w – приращение угловой скорости, рад/с;
 u_4 – управляющий сигнал уставки крутящего момента привода соответствующего колеса

Fig. 5. Determination of damping factor K_w in Matlab:
 del_M – torque increment, Nm; del_w – angular velocity increment, rad/s;
 u_4 – control signal for setting the torque of the drive of the corresponding wheel

Программная реализация алгоритма определения демпфирующего автоколебания крутящего момента показана на рис. 6.

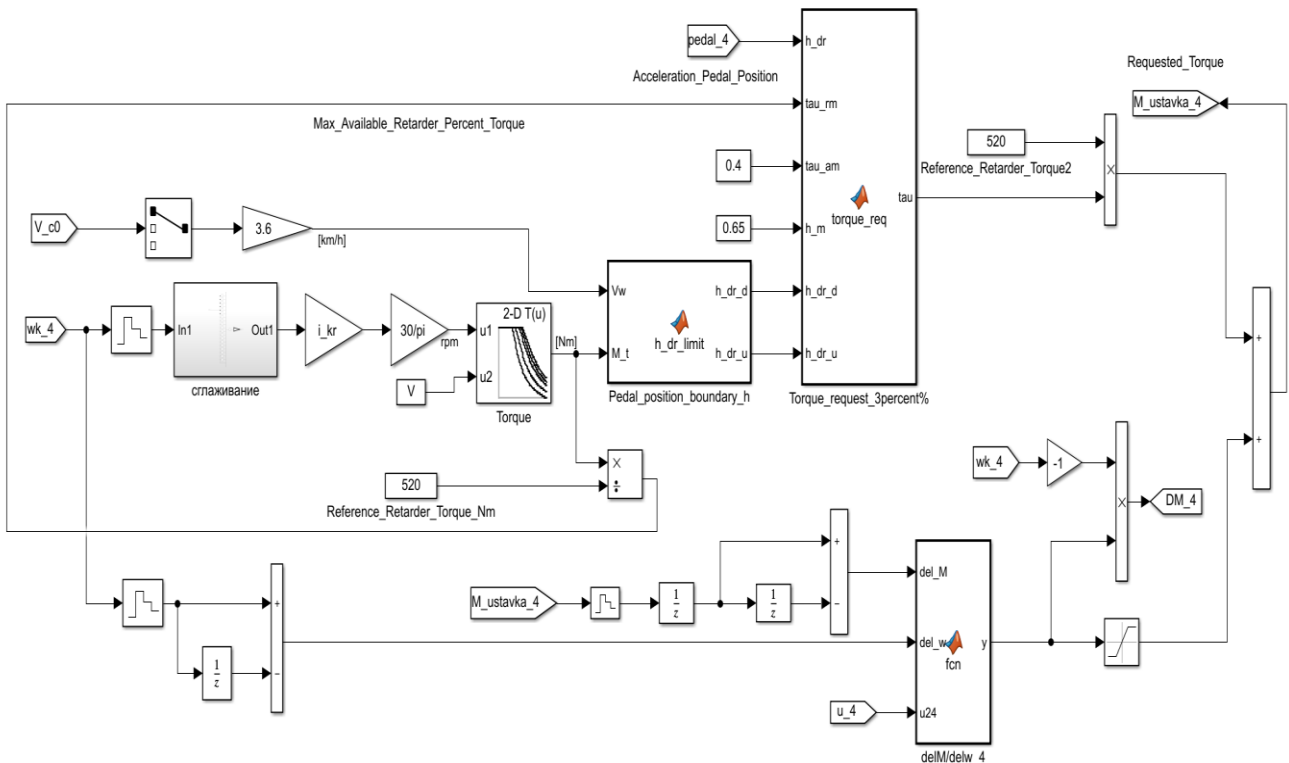


Рис. 6. Программная реализация алгоритма определения демпфирующего автоколебания крутящего момента

Fig. 6. Algorithm for determining damping self-oscillation of torque in Matlab

Исследование работоспособности и эффективности и алгоритма подавления автоколебательных процессов в тяговом режиме

Для исследования эффективности и работоспособности разработанного алгоритма управления индивидуальным тяговым электроприводом с функцией подавления автоколебательных процессов были проведены теоретические исследования движения электробуса полной массой 18 000 кг [14] с помощью имитационного математического моделирования. Режим движения – разгон на сухом асфальте в повороте. Положение педали акселератора поддерживалось на постоянном уровне нажатия 75 %.

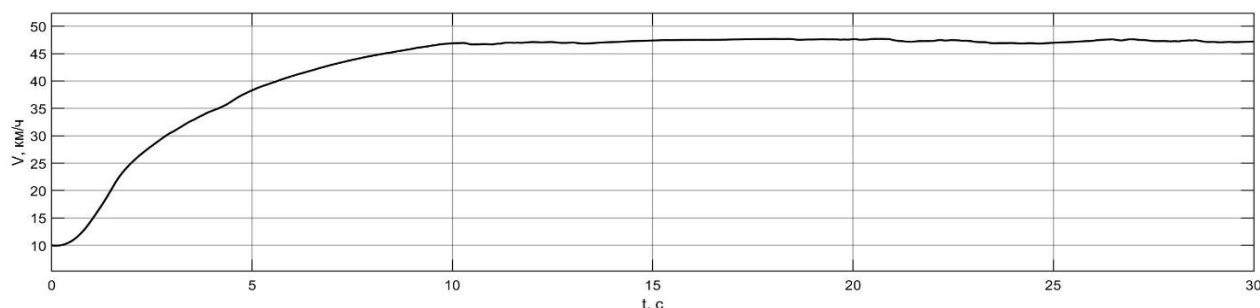
В качестве критериев эффективности алгоритмов работы обычной противобуксовочной системы и противобуксовочной системы с функцией подавления автоколебаний примем следующие показатели. Среднее относительное ε_0 изменение пиковых значений автоколебательного процесса для угловой скорости колес $\varepsilon_{02}^{\omega}$ и для крутящего момента тягового электродвигателя ε_{02}^M при сравнительных испытаниях электробуса, не оснащенного системой подавления автоколебаний, и электробуса с функцией подавления автоколебаний:

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{k_0} \sum_{j=1}^{k_{02}} \frac{p_{j0} - p_{j2}}{p_{j0}} 100\%,$$

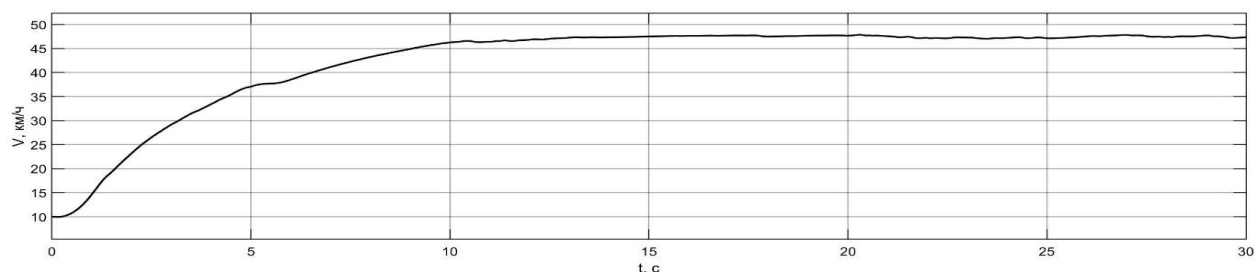
где p_{j0}, p_{j2} – j -ые пиковые значения реализации для электробуса, не оснащенного системой подавления, и электробуса с функцией подавления автоколебаний; k_0 – число парных пиков на реализациях.

Если $\varepsilon_0 > 0$, то работа ПБС с функцией подавления автоколебаний приводит к снижению пиковых значений автоколебаний, если $\varepsilon_0 < 0$ – к увеличению пиковых значений.

На рис. 7 показаны реализации скорости движения электробуса.



а)

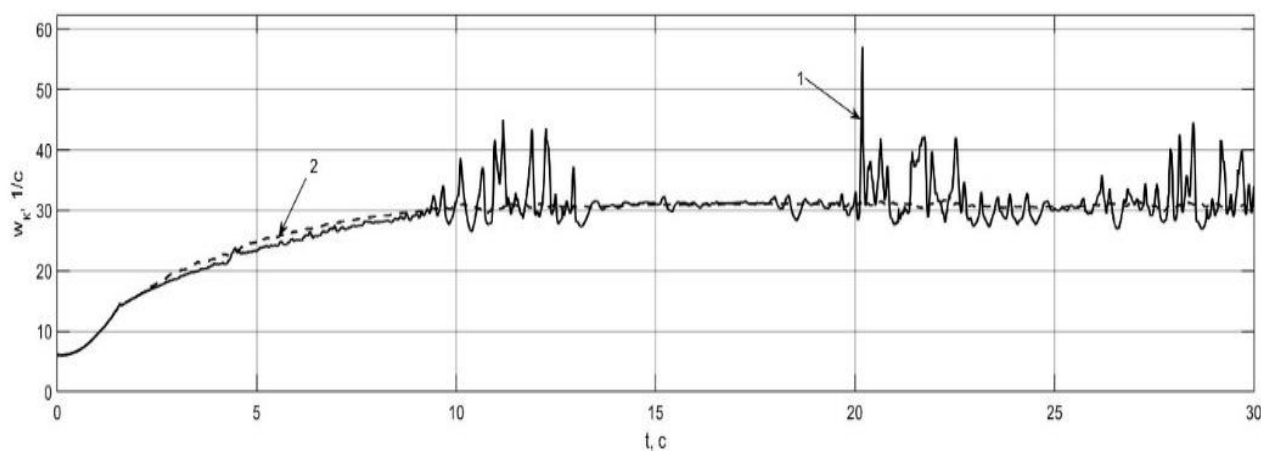


б)

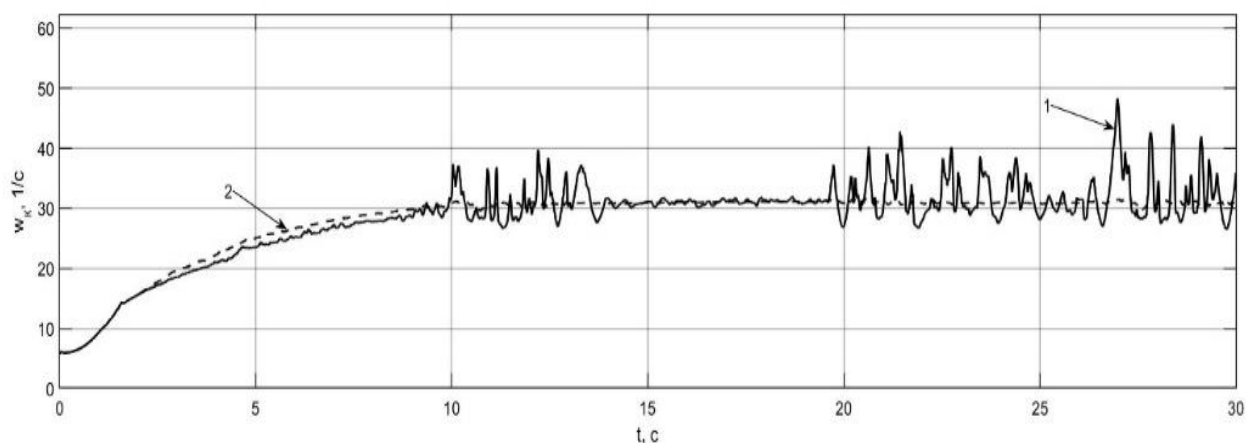
Рис. 7. Реализации скорости движения электробуса при разгоне на сухом асфальте:
а – без функции подавления автоколебаний; б – с ПБС и с функции подавления автоколебаний

Fig. 7. Electric bus speeds during accelerating on dry asphalt:
а – without self-oscillation suppression function; б – with traction control and oscillation suppression function

На рис. 8 показаны реализации угловых скоростей ведущих колес для всех вариантов, а на рис. 9 – оценки моментов тяговых электродвигателей для всех трех вариантов.



а)

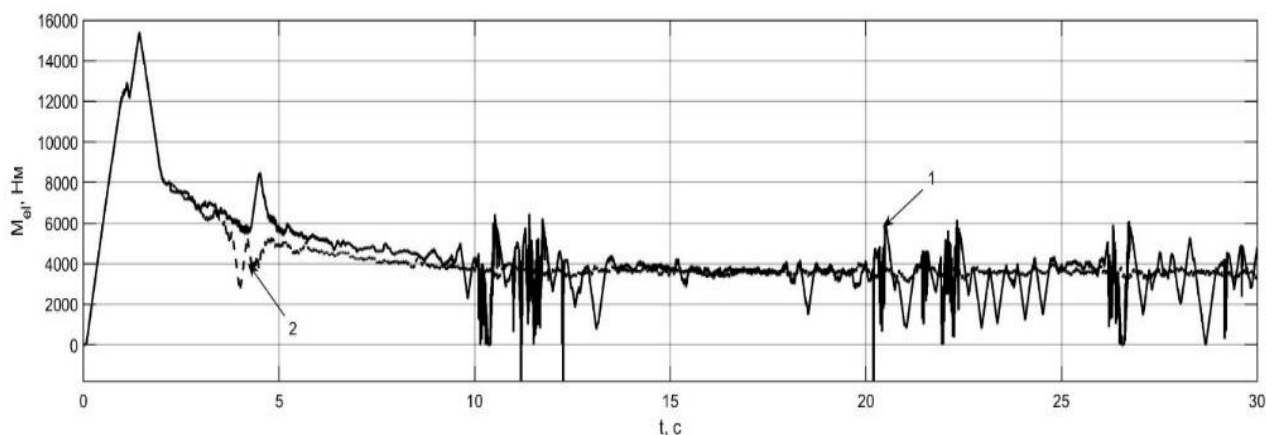


б)

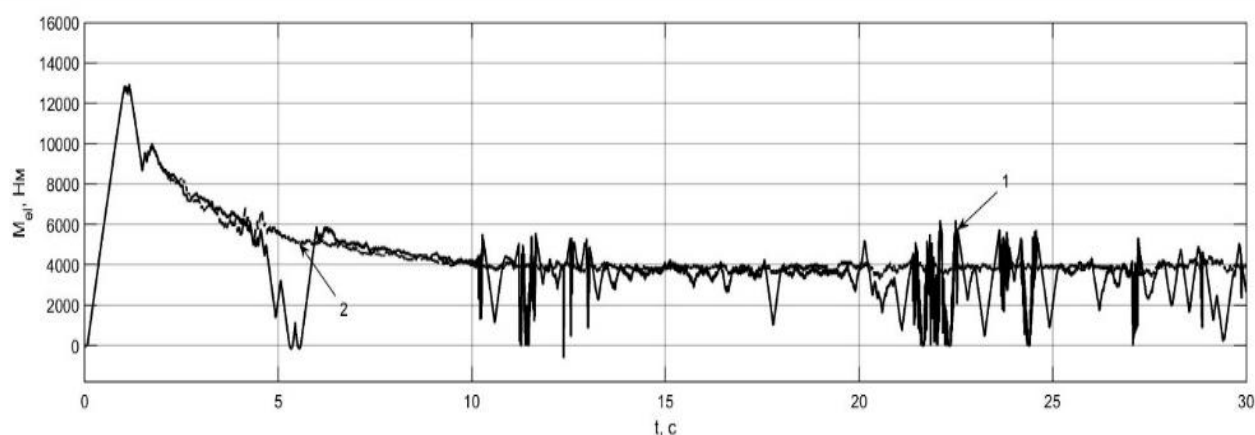
Рис. 8. Реализации угловых скоростей ведущих колес электробуса при разгоне на сухом асфальте:

*а – без функции подавления автоколебаний; б – с функции подавления автоколебаний;
1 – левое заднее колесо; 2 – правое заднее колесо*

Fig. 8. Electric bus driving wheels angular speeds during accelerating on dry asphalt:
*а – without self-oscillation suppression function; б – with self-oscillation suppression function;
1 – left rear wheel; 2 – right rear wheel*



а)



б)

Рис. 9. Реализации оценок моментов тяговых электродвигателей электробуса при разгоне на сухом асфальте:

*а – без функции подавления автоколебаний; б – с функции подавления автоколебаний;
1 – левое заднее колесо; 2 – правое заднее колесо*

Fig. 9. Electric bus electric motors moments estimation during acceleration on dry asphalt:

*а – without self-oscillation suppression function; б – with self-oscillation suppression function;
1 – left rear wheel; 2 – right rear wheel*

Выводы

Анализ результатов моделирования разгона в повороте на сухом асфальте (рис. 7-9) позволяет сделать следующие выводы:

- алгоритм подавления автоколебательных явлений показал свою работоспособность;
- максимальная скорость движения и время разгона в случае применения управления с функцией подавления автоколебаний не снизились, что означает, что применение этих систем не снижает тягово-динамических свойств электробуса;
- использование подавления автоколебаний пиковые значения автоколебательного процесса по угловым скоростям снижаются на 12,3 %, а для крутящих моментов – на 38 %.

Библиографический список

1. **Крюков, Б.И.** Вынужденные колебания существенно нелинейных систем / Б.И. Крюков – М.: Машиностроение, 1984. – 216 с.
2. **Некоркин, В.И.** Лекции по основам теории колебаний: учебное пособие / В.И. Некоркин. – Нижний Новгород: ННГУ, 2011. – 233 с.
3. **Климов, А.В.** Колебательные процессы в нелинейной системе индивидуального тягового электрического привода // Грузовик. 2023. № 7. С. 19-24. – DOI 10.36652/1684-1298-2023-7-19-24. – EDN RXPWMI.
4. **Климов, А.В.** Исследование режимов возникновения автоколебаний в тяговом электроприводе электробуса в условиях эксплуатации // Электротехнические комплексы и системы: Материалы I Всероссийской конференции по электрическим машинам в рамках Международной научно-практической конференции. В 2-х томах, Уфа, 15-16 декабря 2022 года. Том 2. – Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2022. – С. 414-422. – EDN PXJUCH.
5. **Климов, А.В.** Исследование особенностей протекания колебательных процессов в нелинейной системе индивидуального тягового привода электробуса / А. В. Климов, А. В. Антонян // Известия МГТУ МАМИ. 2023. Т. 17. № 1. С. 87-96. – DOI 10.17816/2074-0530-115233. – EDN DVWXHE.
6. **Климов, А.В.** Противобуксовочная система с функцией подавления автоколебаний колес в тяговом режиме работы // Труды НАМИ. 2023. № 3(294). С. 44-56. – DOI 10.51187/0135-3152-2023-3-44-56. – EDN XJXUWX.
7. **Климов, А.В.** Наблюдатель буксования ведущих колес с функцией подавления автоколебаний в тяговом режиме // Транспортные системы. 2023. № 2(28). С. 17-29.
8. **Климов, А.В.** Подавление автоколебаний ведущих колес в тормозном режиме // Грузовик. 2023. № 9. С. 6-14. – DOI 10.36652/1684-1298-2023-9-6-14. – EDN PUCDXP.
9. **Клепиков, В.Б.** Динамика электромеханических систем с нелинейным трением: монография / В.Б. Клепиков. – Х. : Изд-во «Підручник НТУ «ХПР»», 2014. – 408 с.
10. Вибрации в технике: Справочник в 6-ти т. – М.: Машиностроение, 1979. – Т.2. Колебания нелинейных механических систем / Под ред. И.И. Блехмана, 1979. 351 с.
11. **Жилейкин, М.М.** Алгоритм работы антиблокировочной системы тормозов с функцией противодействия заносу для двухосных автомобилей с одной ведущей осью / М.М. Жилейкин, М.М. Журкин // Известия МГТУ МАМИ. 2020. №1 (43). С. 51-56.
12. **Шамберов, В.Н.** Фрикционные автоколебания в механических системах / Известия вузов. Приборостроение, 2010. Т. 53. № 2. С. 24-28.
13. **Жилейкин, М.М.** Моделирование систем транспортных средств: учебник. / М.М. Жилейкин, Г.О. Котиев. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. – 239 с.
14. Патент № 2797069 С1 Российская Федерация, МПК В60К 17/12, В60L 15/20, В60L 3/10. Способ управления индивидуальным тяговым электроприводом ведущих колес многоколесного транспортного средства: № 2023103483: заявл. 16.02.2023; опубл. 31.05.2023 / А.В. Климов, Б.К. Оспанбеков, М.М. Жилейкин [и др.]; заявитель Публичное акционерное общество «КАМАЗ». – EDN QAUBVR.
15. Характеристики электробуса КАМАЗ 6282. [Электронный ресурс]. – Набережные Челны. – Режим доступа: <https://kamaz.ru/upload/bus/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B1%D1%83%D1%81%20KAMAZ-6282.pdf> (дата обращения 15.10.2023).

*Дата поступления
в редакцию: 24.01.2024*

*Дата принятия
к публикации: 28.02.2024*

УДК 629.33

EDN: DNAZEF

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СПОСОБА УСТАНОВКИ СИДЕНИЙ САЛОНА АВТОБУСА НА ПАССИВНУЮ БЕЗОПАСНОСТЬ

В.Ю. Шурыгин

ORCID: 0009-0002-9671-8115 e-mail: shurygin.063@yandex.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***Л.Н. Орлов**

ORCID: 0000-0003-4852-1174 e-mail: lev.n.orlov@mail.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***В.Н. Наумов**

ORCID: 0000-0001-5172-0364 e-mail: vn.naumov1941@yandex.ru

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
*Москва, Россия***В.Ф. Кулепов**

ORCID: 0000-0002-8319-3973 e-mail: kulepov@dpingtu.ru

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

ORCID: 0009-0003-0245-0638 e-mail: sergmanian@yandex.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***М.И. Шурыгина**

ORCID: 0009-0000-9355-3082 e-mail: chichkina.m@mail.ru

Автономная некоммерческая организация «Институт сертификации автомобилотехники»
Нижний Новгород, Россия

Представлены результаты расчетного исследования безопасности автобуса, проведенного с учетом требований Правил № 66 ЕЭК ООН. Исследовано влияние способа установки сидений на пассивную безопасность кузова автобуса. В качестве объекта изучения принят цельнометаллический кузов автобуса малого класса. Производство данного типа транспортных средств зачастую происходит путем доработки грузовых автомобилей. При данном виде производства доработкам необходимо решить вопрос пассивной безопасности, пройти сертификацию. Согласно Правилам № 66 ЕЭК ООН, допустимо применение имитационного моделирования. Расчетные исследования выполнены с применением компьютерного моделирования на основе МКЭ (метода конечных элементов). Создана модель кузова автобуса с различными вариантами крепления сидений (только на пол, пол – боковина). Правила ООН № 66 требуют, чтобы конструкция транспортного средства выдерживала нагрузку, возникающую при боковом опрокидывании транспортного средства, а также после опрокидывания в его салоне должно сохраняться необходимое для пассажиров и водителя пространство. Анализ показывает, что минимальный запас расстояния между регламентированным остаточным жизненным пространством и кузовом автобуса сохраняется, однако при способе установки сидений на пол – боковину обеспечивается запас.

Ключевые слова: кузов автобус, пассивная безопасность, компьютерное моделирование, автобус малого класса.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Шурыгин, В.Ю. Оценка влияния способа установки сидений салона автобуса на пассивную безопасность / В.Ю. Шурыгин, Л.Н. Орлов, В.Н. Наумов, В.Ф. Кулепов, С.Е. Манянин, М.И. Шурыгина // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2024. № 2. С. 123-130. EDN: DNAZEF

ESTIMATION OF THE INFLUENCE OF INSTALLATION METHOD OF BUS INTERIOR SEATS FOR PASSIVE SAFETY

V.Yu. Shurygin

ORCID: **0009-0002-9671-8115** e-mail: **shurygin.063@yandex.ru**

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

L.N. Orlov

ORCID: **0000-0003-4852-1174** e-mail: **lev.n.orlov@mail.ru**

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

V.N. Naumov

ORCID: **0000-0001-5172-0364** e-mail: **vn.naumov1941@yandex.ru**

Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

V.F. Kulepov

ORCID: **0000-0002-8319-3973** e-mail: **kulepov@dpingtu.ru**

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

S.E. Manyanin

ORCID: **0009-0003-0245-0638** e-mail: **sergmanian@yandex.ru**

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

M.I. Shurygina

ORCID: **0009-0000-9355-3082** e-mail: **chichkina.m@mail.ru**

Autonomous non-profit organization Institute of Automotive Certification (ANO INSAT)
Nizhny Novgorod, Russia

The paper presents the results of a computational research of bus safety. Calculations were carried out taking into account the requirements of UNECE Regulation No. 66. The influence of the method of seats installation on the passive safety of the bus body has been studied. In this computational study, the all-metal body of a small class bus is taken as the object of study. The production of this type of vehicle often occurs through the fitting-out of trucks. With this type of production, fitting-out workers need to resolve the issue of passive safety and undergo certification. According to the provisions of UNECE Regulation No. 66, it is permissible to use simulation modeling methods. Computational studies were carried out using computer modeling based on FEM (finite element method). At the same time, a model of the bus body was created with various options for attaching seats (only on the floor, on the floor and sidewall). UNECE Regulation No. 66 requires that the vehicle structure must be able to withstand the loads encountered during a side rollover of the vehicle, and that after rollover the vehicle interior must maintain adequate space for passengers and the driver. Analysis of the calculation results shows that the minimum margin of distance between the regulated residual living space and the bus body is maintained, however, when installing the seats on the floor and sidewall, a margin is provided.

Key words: bus body, passive safety, computer modeling, small class bus.

FOR CITATION: Shurygin, V.Yu., Orlov L.N., Naumov V.N., Kulepov V.F., Manyanin S.E., Shurygina M.I. Estimation of the influence of installation method of bus interior seats for passive safety. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 2. Pp. 123-130. EDN: DNAZEF

Введение

В настоящее время повышен спрос на автобусы малого класса. Зачастую отдельные производители дорабатывают кузова грузовых автомобилей под перевозку людей, при этом им приходится решать вопрос обеспечения пассивной безопасности данных транспортных средств. При смене категории транспортного средства с грузовой (например, N2) на категорию для перевозки людей (например, M2), необходимо выполнить ряд требований технического регламента [1], касающихся, в частности, прочности и несущей способности по разрушающим нагрузкам их кузовных конструкций [2]. Для подтверждения соответствия транспортных средств, с внесенными в их конструкцию изменениями, требованиям данных Правил допустимо использовать расчетные методы в соответствии с Приложением 9 [2]. В этом случае оценка безопасности автобуса проводится на основании расчетного анализа с использованием современных комплексов для нелинейного расчета. Это существенно снижает затраты на разработку конструкции и сертификацию, следовательно, снижается цена конечного продукта. Целесообразность и обоснованность применения расчетных методов оценки безопасности кузовных конструкций транспортных средств доказаны результатами их использования расчетными отделами автомобильных заводов и ведущих фирм.

Описание испытаний

Испытание [2, 3] на соответствие требованиям Правил проводят на полнокомплектном транспортном средстве. Образец для испытаний выбирается, исходя из наихудшего варианта конструкции, при этом данный образец должен представлять заявленный для оценки на соответствие указанным выше требованиям. Методикой испытания предусмотрено устанавливать автобус на специальную опрокидывающую платформу, расположенную на высоте 0,8 м от опорной площадки, на которую он падает после поворота платформы.

После такого опрокидывания автобуса с уступа в его салоне для пассажиров должен оставаться необходимый жизненный объем [2]. Для этого при подготовке к испытаниям в салон автобуса устанавливают специальный шаблон контура регламентированного остаточного пространства (рис. 1). Данный контур устанавливают на транспортное средство перед испытаниями для более наглядной оценки результатов. Способ его закрепления и изготовления, а также применяемые материалы не должны увеличивать прочность основной конструкции.

С целью возможности оценки различных вариантов конструкции, а также возможности дальнейших разработок транспортных средств, разработчик конструкции может указать большее остаточное жизненное пространство.

Описание объекта исследований

В работе рассмотрен вопрос оценки влияния на пассивную безопасность способа установки сидений, в частности, оценки влияния крепления сидений к боковинам кузова автомобиля. При таком способе крепления остов сидения также воспринимает нагрузку, возникающую при опрокидывании автобуса. Сиденье транспортного средства – достаточно прочный и жесткий элемент, способный выдерживать высокие аварийные нагрузки, что подтверждается при сертификации комплектного транспортного средства.

За объект исследования выбрано транспортное средство с цельнометаллическим кузовом, переоборудованное в автобус категории M2 с числом пассажирских мест 19. Сиденья установлены на подиум со способом крепления на полу и к боковинам. Способ установки сидений показан на рис. 2.

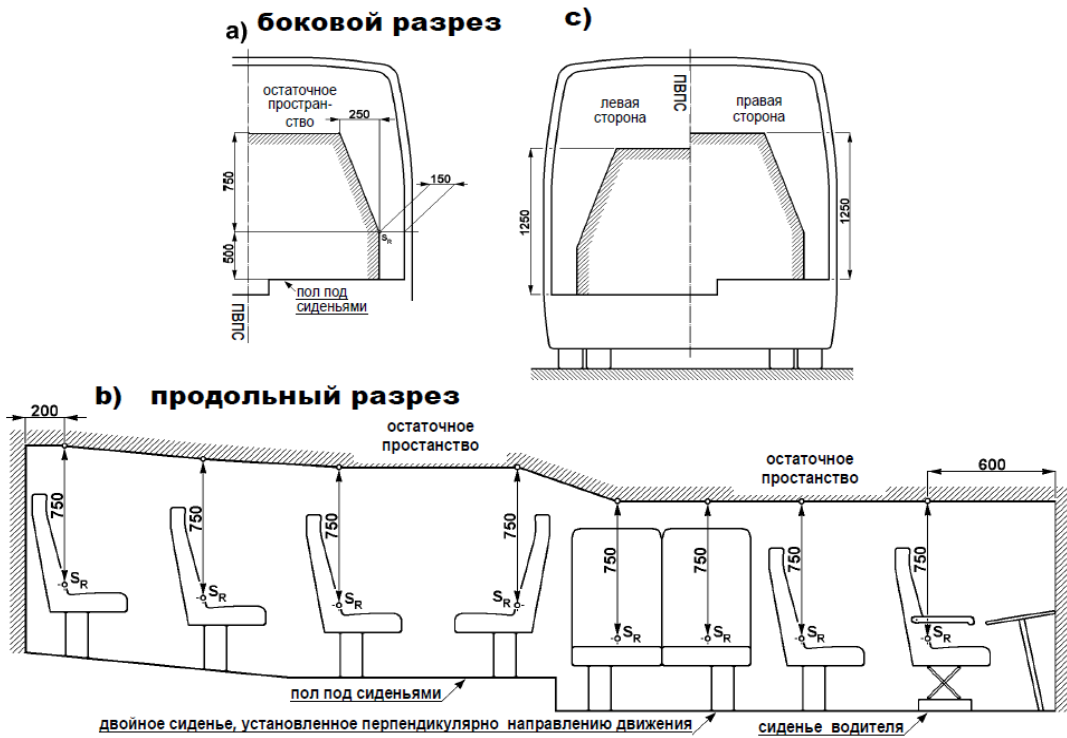


Рис. 1. Контур необходимого остаточного пространства

Fig. 1. Contour of required residual space

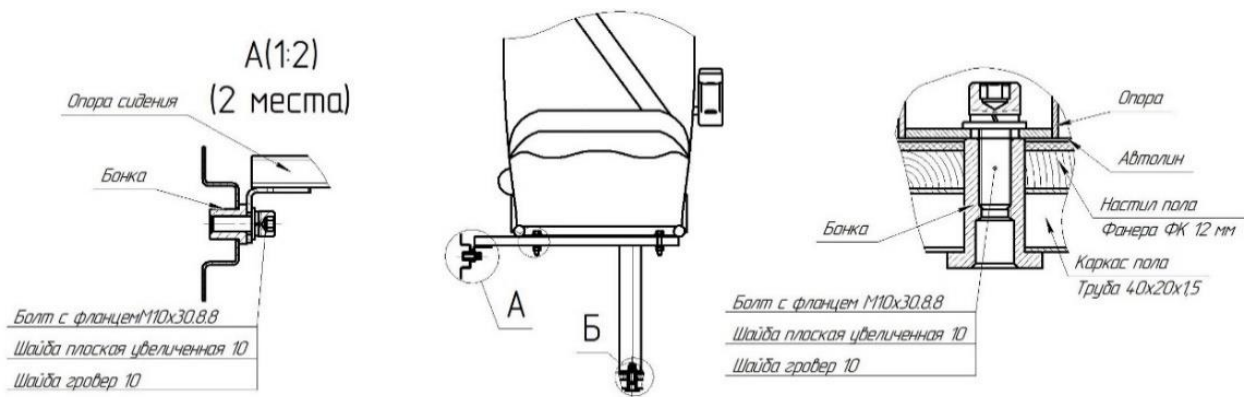


Рис. 2. Способ установки сиденья

Fig. 2. Seat installation method

На первом этапе исследовано поведение конструкции при опрокидывании без учета установки сидений. Далее учтены остовы сидений, подиум и проведено сравнение полученных результатов.

Компьютерное моделирование

Компьютерное моделирование действия аварийной нагрузки на кузов при опрокидывании автобуса выполнено с применением программного пакета LS-Dyna, обеспечивающего возможность нелинейного расчета конструкций, при их больших пластических деформациях, в условиях ударного воздействия.

Исследования проведены на подробной модели [4] кузова автобуса (рис. 3). Расчетная модель рассмотрена в двух вариантах: с установленными сиденьями и без них.

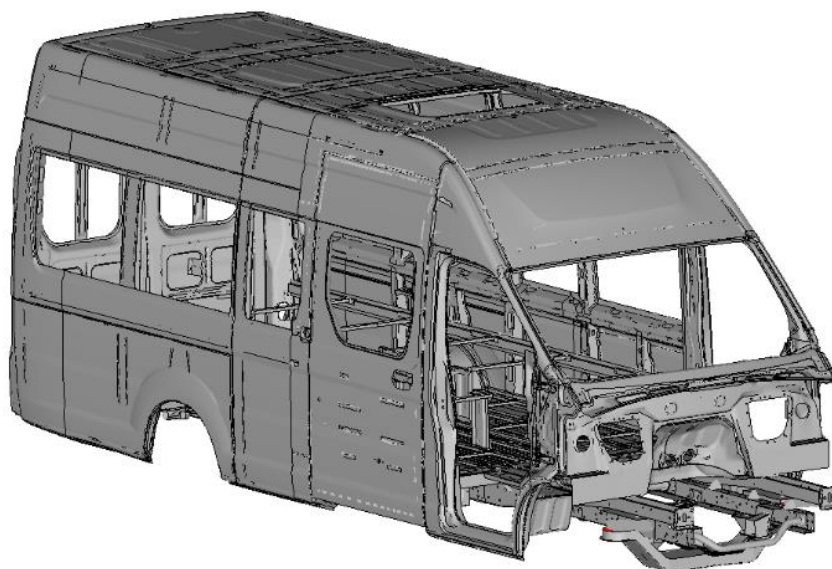


Рис. 3. Конечно-элементная модель кузова

Fig. 3. Finite element model of the body

При разработке модели приняты следующие допущения: модель кузова имеет жесткие недеформируемые сварные соединения элементов; в ней отсутствуют стекла, передние двери, люк и другие элементы, не оказывающие существенного влияния на его несущую способность. Правила ООН № 66 требуют, чтобы конструкция транспортного средства выдерживала нагрузку, возникающую при боковом опрокидывании транспортного средства.

Испытание комплектного транспортного средства начинается с потери его устойчивости при нулевой угловой скорости. Удар кузова в опорную поверхность происходит с энергией, определяемой по формуле $U_{уд} = 0,75 \cdot M \cdot g \cdot h$, указанной в Правилах ООН № 66. При этом M – приведенная масса автобуса, включающая его снаряжённую массу и половину масс пассажиров; h – высота изменения положения центра тяжести при падении автобуса; $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения.

При виртуальном моделировании испытание на опрокидывание начинается с момента касания автобуса нижней горизонтальной поверхности, на которую происходит опрокидывание. В момент касания нижней горизонтальной поверхности угловая скорость поворота автомобиля вокруг оси его опрокидывания находится из условия равенства кинетической энергии автомобиля уменьшению его потенциальной энергии в момент касания кузова нижней горизонтальной площадки соударения относительно ее максимального значения, соответствующего наивысшему положению центра тяжести при опрокидывании автобуса:

$$J \omega^2 / 2 = Mg(h_1 - h_2),$$

$$\omega = \sqrt{\frac{2gM(h_1 - h_2)}{J}},$$

где J – момент инерции автомобиля вокруг оси опрокидывания; ω – угловая скорость автомобиля вокруг оси опрокидывания; h_2 – высота центра тяжести транспортного средства в момент касания кузова нижней горизонтальной поверхности соударения по отношению к нижней горизонтальной плоскости кювета. Расчетное значение $U_{уд}$ составило 26,8 кНм (кДж).

При выполнении расчетов необходимой является разработка достоверной расчетной модели, отражающей ключевые особенности конструкции несущей системы транспортного средства. Особое внимание должно уделяться способам закрепления и нагружения модели, позволяющим с высокой степенью точности воспроизводить условия опрокидывания авто-

буса. Модель должна учитывать все геометрические и физические свойства силовой конструкции кузова, максимально по своим характеристикам приближаться к реальной конструкции. Все массы и силы инерции агрегатов транспортного средства представлены в модели абстрактными элементами (*ELEMENT_INERTIA) с заданными инерционными характеристиками.

При разработке конечно-элементных моделей [5] делается сглаживание виртуальных поверхностей так, чтобы ее элементы могли иметь реальный размер не менее 5 мм, при этом принимаются также рекомендации:

- размеры элементов сетки должны адекватно передавать геометрию конструкции;
- треугольных элементов следует избегать ввиду того, что они увеличивают жесткость конструкции;
- разрабатывать сетку элементов необходимо для каждого отдельного элемента, сварку моделировать специальными жесткими элементами;
- следует не допускать значительного проникновения элементов друг в друга (максимальное проникновение может быть в пределах половины толщины панели); необходимо игнорировать невозможные соединения, так как вся модель может быть излишне закреплена, что приведет к росту локальных напряжений.

Моделирование испытания пассажирского транспортного средства на опрокидывание начинается с момента его касания нижней горизонтальной поверхности. При этом используемый коэффициент трения между кузовом и опорной поверхностью принят равным $\mu = 0,36$ (сталь по бетону). При опрокидывании модели с сиденьями (рис. 3) видно, что при ее деформировании большой зазор (обозначение «S», вид показан для сечения 2, рис. 4) между боковинами и регламентированным остаточным жизненным пространством. Из анализа результатов расчета видно, что остов сиденья так же воспринимает аварийную нагрузку, верхняя часть остова и его опоры деформируются. Поскольку сиденья ставятся на рамку подиума, жесткость пола транспортного средства также увеличивается, основание пола транспортного средства подвержено меньшему деформированию с сиденьями, нежели без них (рис. 4). Для более точной оценки минимального расстояния между кузовом транспортного средства и контуром регламентированного остаточного жизненного пространства после опрокидывания модели, построены сечения (рис. 5), а сохраняющиеся зазоры представлены в табл. 1.

Таблица 1.
Зазоры, мм (минимальное расстояние от регламентированного остаточного жизненного пространства до боковины кузова)

Table 1.
Clearances, mm (minimum distance from the regulated residual living space to the side of the body)

Номер сечения	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
без сидений	55	68	75	77	63	77
с сиденьями	80	85	100	95	98	100

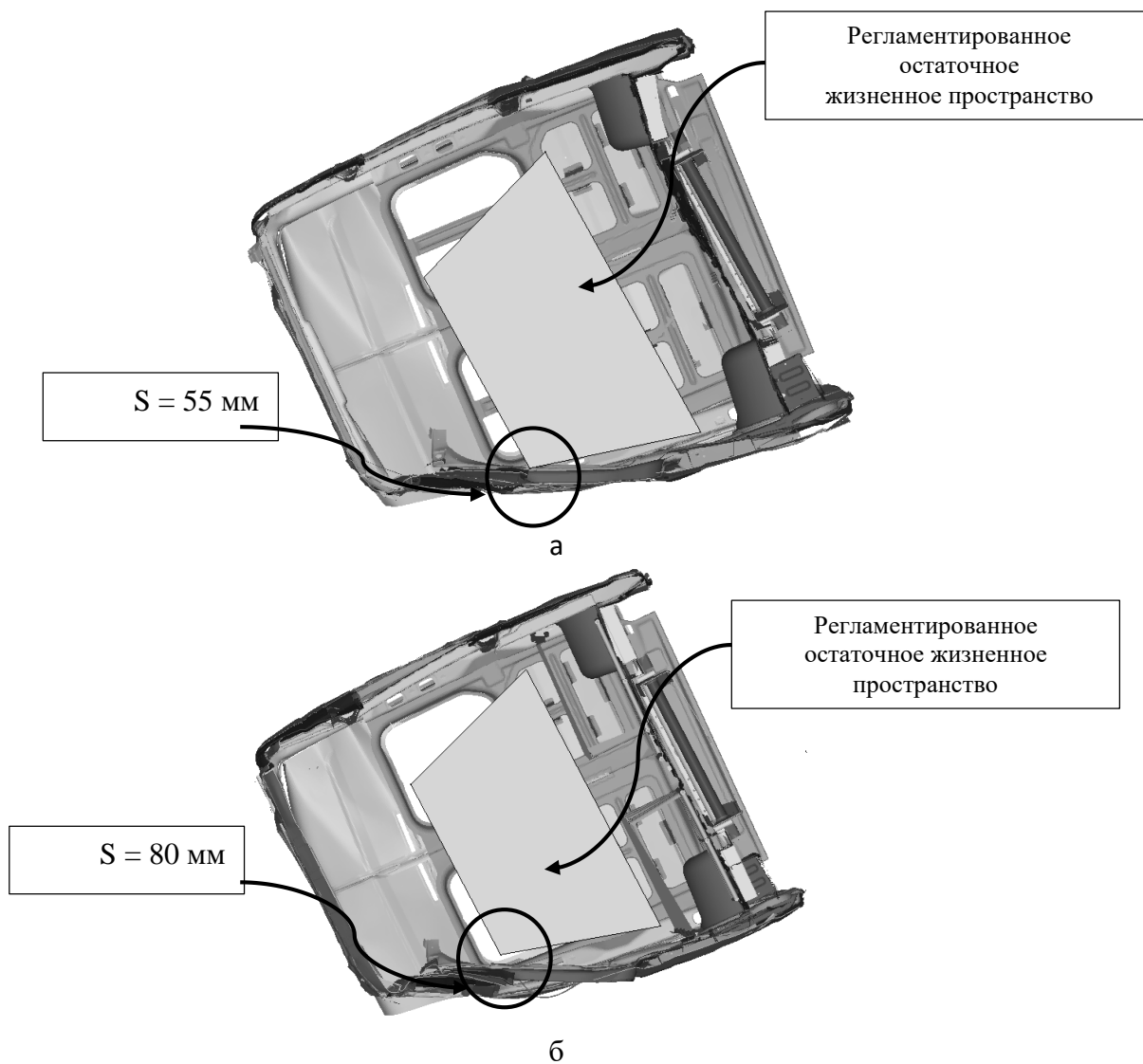


Рис. 4. Результаты расчета: а – вариант без сидений, б – вариант с сиденьями

Fig. 4. Calculation results: a – version without seats, b – version with seats

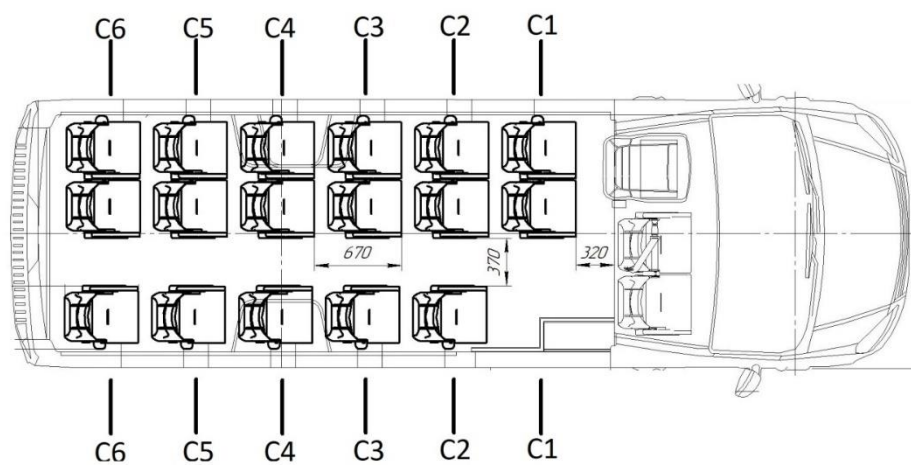


Рис. 5. Распределение сечений

Fig. 5. Section distribution

Результаты и выводы

Анализ показал, что минимальное расстояние между остаточным пространством и каркасом кузова автобуса, оборудованного ремнями безопасности, наблюдается в передней части (сечение С1) и составляет 55 мм. Согласно результатам расчета, минимально необходимое остаточное жизненное пространство сохраняется. Однако с целью обеспечения 30 % запаса, возможен вариант установки сидений с крепления на пол и боковину. В рамках расчетов с учетом минимально допустимых характеристик используемых материалов установлено, что при опрокидывании автобуса остаточное пространство удовлетворяет требованиям Правил № 66 ООН (пересмотр № 1 поправка № 2, дата вступления в силу 19.08.2010).

Повышение пассивной безопасности возможно за счет элементов интерьера транспортных средств, в том числе, сидений. Эта работа актуальна для автопроизводителей, которые занимаются переоборудованием грузовых цельнометаллических фургонов в пассажирские транспортные средства. При таком переоборудовании достаточно сложно усилить непосредственно сам кузов транспортного средства, но можно применить способ установки сидений *пол – боковина*. Результаты также могут быть использованы техническими службами при выборе репрезентативного образца для проведения испытаний. Задачей дальнейших исследований может стать изучение влияния других конструктивных элементов на улучшение пассивной безопасности транспортных средств.

Библиографический список

1. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 018/2011 «О безопасности колесных транспортных средств» (утвержден решением комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 года № 877). Москва, 2011.
2. Правила ЕЭК ООН № 66 «Единые предписания, касающиеся официального утверждения крупно габаритных пассажирских транспортных средств в отношении прочности верхней части их конструкции» // Европейская Экономическая Комиссия, Женева, 1986.
3. **Годжаев, З.А.** Перспективные методы проектирования несущих систем автотранспортных средств, в том числе, по критериям безопасности / З.А. Годжаев и др. // Журнал ААИ. 2012. №4. С. 34-38.
4. **Кушвид, Р.П.** Испытания автомобиля: учебник. – М.: МГИУ, 2011. – 351 с.
5. **Орлов, Л.Н.** Основы разработки конечно-элементных моделей кузовных конструкций автотранспортных средств. Расчеты на безопасность и прочность: учеб. пособие / Л.Н. Орлов и др. – Нижний Новгород: НГТУ, 2014. – 144 с.

*Дата поступления
в редакцию: 30.01.2024*

*Дата принятия
к публикации: 28.02.2024*

НАШИ АВТОРЫ

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Добротин Сергей Александрович – заведующий кафедрой Дзержинского филиала Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, д-р техн. наук, профессор

Евтушенко Нина Владимировна – главный научный сотрудник Института системного программирования им. В.П. Иванникова РАН, д-р техн. наук

Козелков Андрей Сергеевич – руководитель научно-исследовательской лаборатории математического моделирования в промышленных и фундаментальных исследованиях Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р физ.-мат. наук

Косырева Ольга Николаевна – доцент Дзержинского филиала Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации

Лапутенко Андрей Владимирович – доцент Национального исследовательского Томского государственного университета, канд. техн. наук

Никулин Евгений Александрович – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

Попов Анатолий Аркадьевич – доцент Дзержинского Политехнического института – филиала Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

Саразов Алексей Владимирович – старший научный сотрудник Российского федерального ядерного центра – Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики, канд. физ.-мат. наук

Твардовский Александр Сергеевич – доцент Национального исследовательского Томского государственного университета, канд. физ.-мат. наук

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

Богомолов Дмитрий Евгеньевич – инженер-конструктор 3-й категории АО «ОКБМ Африкантов»

Григорьев Сергей Станиславович – инженер-конструктор 3-й категории АО «ОКБМ Африкантов»

Кресов Дмитрий Геннадьевич – начальник бюро моделирования, расчетов динамики транспортных РУ АО «ОКБМ Африкантов», д-р техн. наук

Оленская Ольга Васильевна – инженер-конструктор 1-й категории АО «ОКБМ Африкантов»

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

Савельев Алексей Юрьевич – студент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

Соколов Андрей Николаевич – начальник бюро АО «ОКБМ Африкантов»

Сосин Валерий Михайлович – студент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

Акрамов Бахром Ниязович – доцент Таджикского технического университета им. акад. М.С. Осими, канд. техн. наук

Аникин Алексей Александрович – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

Антонян Акоп Ваганович – ведущий инженер-программист Инновационного центра «КАМАЗ», канд. техн. наук

Беляков Владимир Викторович – начальник Управления научно-исследовательских и инновационных работ Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, профессор, д-р техн. наук

Вахидов Умар Шахидович – заведующий кафедрой «Строительные и дорожные машины» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

Горожанкин Сергей Андреевич – профессор Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, д-р техн. наук

Золотарев Олег Олегович – ассистент Донбасской национальной академии строительства и архитектуры

Исмаатов Исмоилджон Ахмадович – старший преподаватель Таджикского технического университета им. акад. М.С. Осими, канд. техн. наук

Карасева Светлана Алексеевна – аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

Климов Александр Владимирович – руководитель службы электрифицированных автомобилей ООО «Инновационный центр «КАМАЗ», канд. техн. наук

Кулепов Виктор Федорович – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

Манянин Сергей Евгеньевич – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

Молев Юрий Игоревич – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

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

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

Орлов Лев Николаевич – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

Савенков Никита Владимирович – доцент, заведующий кафедрой Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, канд. техн. наук

Тиллоев Кудратулло Зувайдуллоевич – ассистент Таджикского технического университета им. акад. М.С. Осими, канд. техн. наук

Тошев Мирзо Амруллоевич – ассистент Таджикского технического университета им. акад. М.С. Осими

Шурыгин Вадим Юрьевич – ассистент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

Шурыгина Мария Ильинична – начальник отдела научно-технической информации Автономной некоммерческой организации «Институт сертификации автототехники»

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

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

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ, НАПРАВЛЯЕМЫХ В РЕДАКЦИЮ

- В редакцию направляются два печатных экземпляра статьи и комплекты сопроводительной документации: бумажный и электронный.
- Рекомендуемый объем статьи не превышает 15 страниц текста. Все страницы должны быть пронумерованы. Минимальное количество страниц – 7; **минимальный объем статьи – 0,5 п.л.**
- **Статью необходимо сопроводить** актом и протоколом экспортного контроля, экспертным заключением о возможности открытого опубликования, выпиской из заседания кафедры, рекомендующей статью к опубликованию.
- **Печатные экземпляры** статей должны быть подписаны всеми авторами.
- **Первая страница** статьи должна содержать следующую информацию: УДК (код по универсальному десятичному классификатору); инициалы и фамилии авторов (в порядке, отражающем их авторский вклад); аннотацию, ключевые слова.
- **Аннотация** (120-150 слов) отражает перечисление результатов и ключевых выводов, обозначение новизны и сферы применения.
- **Ключевые слова** (не менее 10) отражают тематическую направленность, объект и результаты исследования.
- Изложение материала должно быть логически выстроенным. **Тематика** представленного исследования должна **строго соответствовать рубрике журнала и паспорту специальности ВАК**. Рекомендуется следующая структура статьи: вводная часть с обоснованием необходимости и изложением цели работы, теоретический анализ, методика, экспериментальная часть, результаты и выводы (не более 0,5 страницы), **библиографический список, содержащий только цитируемые или рассматриваемые в тексте работы**. Ссылки нумеруются в порядке цитирования. **Самоцитирование** рекомендуется **ограничить тремя пунктами**. Рекомендуется использовать в библиографическом списке ссылки на научные работы по теме исследования, индексируемые в международных базах научного цитирования. Библиографический список не должен включать неопубликованные работы.
- К статье необходимо **приложить файл с информацией об авторах** на русском языке: ФИО (полностью), должность, место работы (полное название организации, город, страна), идентификатор ORCID, e-mail, ученая степень и звание.
- Текст набирается через один интервал 12 кеглем. Сноски и примечания 10 кеглем. Поля: левое, правое, верхнее и нижнее – 20 мм. Переносы не допускаются. Используется формат *Word for Windows* и стандартные шрифты *Times New Roman* и *Symbol*.
- Формульные выражения выполняются 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, подрисуночная подпись 11 жирный кегль, ссылки на рисунки: (рис. 1).

РУКОПИСИ И СОПРОВОДИТЕЛЬНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ ПРИНИМАЮТСЯ:

2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации

2.3.8 – Информатика и информационные процессы

Валерий Павлович Хранилов: **hranilov@nntu.ru**

**2.4.9 – Ядерные энергетические установки, топливный цикл,
радиационная безопасность**

Максим Александрович Легчанов: **legchanov@nntu.ru**

2.5.11 – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы

Юрий Игоревич Молев: **rsl@nntu.ru**

16+

**ТРУДЫ НГТУ
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА**

№ 2 (145)

Ответственный редактор: **В.И. Казакова**

Редакция:

603155, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24

rsl@nntu.ru

Свободная цена

Подписано в печать: 03.06.2024 Дата выхода в свет: 12.06.2024. Формат 60x84 ¹/₈.

Бумага офсетная. Печать трафаретная.

Усл. печ. л. 8,50. Тираж 300 экз. Заказ .

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева.

Типография НГТУ.

Адрес университета и типографии:

603155, 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 г.