

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

№ 4 (131)

Нижний Новгород 2020

УДК 050(06)
ББК 9я54
Т 78

Т 78 Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2020. №4(131).
– 148 с.

Выходит 4 раза в год

Журнал включен ВАК при Минобрнауки России

в «Перечень рецензируемых научных изданий», в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» по специальностям: 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины; 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации; 05.13.17 – Теоретические основы информатики; 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы; 05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование и вывод из эксплуатации

Главный редактор А.А. Куркин

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель

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

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА

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

УЧРЕДИТЕЛЬ

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

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

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

УДК 050(06)
ББК 9я54

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

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

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

Published since 2010

№ 4 (131)

Nizhny Novgorod 2020

The journal is issued 4 times a year

The journal is included in HAC Ministry of Education and Science
in the «List of peer-reviewed scientific publications where must be published basic scientific results of dissertations on competition of a scientific degree of Candidate of Science, on competition of a scientific degree of Doctor of Science» in specialties: 05.05.03 – Wheeled and tracked vehicles;
05.13.01 – System analysis, management and information processing;
05.13.17 – Theoretical foundations of computer science;
05.14.02 – Electric power stations and electric power systems;
05.14.03 – Nuclear power plants, including design and decommissioning

Editor-in-Chief A.A. Kurkin

EDITORIAL BOARD

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

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

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

EDITORIAL COUNCIL

Chairman

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

Members of Editorial Council

Pelinovski Dmitri

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

László Palkovics

The Széchenyi István University (Győr, Hungary)

Péter Várlaki

The Széchenyi István University (Győr, Hungary)

Vijay Kumar Chakka

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

Yalciner Akhmet

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|-----|
| ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ | 7 |
| Куликов В.Б., Куликов А.Б., Хранилов В.П. Идентификация и верификация законов распределения биомедицинских показателей на основе ортогонального базиса Лежандра ... | 7 |
| Лабутин Н.Г., Костин П.В., Шадрунова Н.Ю. Моделирование процессов выявления инцидентов информационной безопасности и реагирования на них | 16 |
| Леушин А.Д., Неймарк Е.А. Квадратичная задача о назначении. Обзор методов, генерация тестовых задач с априорно известным оптимумом | 26 |
| Тарасова Н.В. Особенности численного моделирования всплытия твердых сфер и воздушных пузырьков | 35 |
| ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ | 49 |
| Виленский О.Ю., Душев С.А., Лапшин Д.А., Новинский Э.Г., Пахомов В.А., Татарский А.М., Легчанов М.А. Математические модели деформирования конструкционного материала при динамических воздействиях для решения прикладных задач в атомном машиностроении | 49 |
| Пичков С.Н., Захаров Д.А., Хлыбов А.А. Физические аспекты использования волноводных линий для акустико-эмиссионного контроля целостности металла корпусных конструкций ядерных энергетических установок | 63 |
| Соколов А.Н., Баринев А.А., Хробостов А.Е., Коновалов И.А., Чесноков А.А. Методика проведения вариантных расчетов по обоснованию параметров систем безопасности водо-водяного ядерного реактора | 71 |
| Шилов А.В., Ершова М.И. Расчетно-экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик оптимизированного теплообменного элемента для водо-водяных реакторных установок АЭС малой мощности | 81 |
| МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО | 90 |
| Басманов И.В., Вольская Н.С., Захаров А.Ю., Чичекин И.В., Чутков К.А. Информационно-измерительный комплекс для проведения доводочных дорожно-грунтовых испытаний малогабаритных транспортных средств | 90 |
| Колин А.А., Силантьев С.Э., Рогов П.С., Сергиевский С.А. Применение имитационной модели для определения динамических и топливно-экономических свойств автомобиля ... | 101 |
| Косицын Б.Б. Оценка влияния электромашины в составе износостойкой тормозной системы на энергоэффективность высокоподвижных колесных машин | 109 |
| Порубов Д.М., Гладышев А.А., Тюгин Д.Ю., Береснев П.О., Филатов В.И., Пинчин А.В. Разработка системы контроля полосы движения на основе технического зрения .. | 119 |
| Стадухин А.А. Исследование границ применимости классического тягового расчета поворота гусеничной машины и метод его уточнения с применением нейронной сети | 127 |
| НАШИ АВТОРЫ | 141 |

CONTENTS

| | |
|---|------------|
| INFORMATICS AND MANAGEMENT IN TECHNICAL AND SOCIAL SYSTEMS | 7 |
| Kulikov V.B., Kulikov A.B., Khranilov V.P. The identification and verification of the laws of distribution of biomedical indicators based on the Legendre orthogonal basis | 7 |
| Labutin N.G., Kostin P.V., Shadrunkova N.U. Simulating information security incident detection and response processes | 16 |
| Leushkin A.D., Neumark E.A. The quadrati cassigment problem. Methods overview, generation test problem with known optimal solution | 26 |
| Tarasova N.V. Specific features of numerical simulation of free rise of solid spheres and air bubbles | 35 |
| | |
| ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES | 49 |
| Vilenskiy O.Yu., Dushev S.A., Lapshin D.A., Novinskiy E.G., Pakhomov V.A., Tatarskiy A.M., Legchanov M.A. Mathematical models of structural material deformation under dynamic loads for applied problem solution in nuclear engineering | 49 |
| Pichkov S.N., Zakharov D.A., Khlybov A.A. Physical aspects of the use of waveguide lines for acoustic-emission control of the integrity of the metal of hull structures of nuclear power facilities | 63 |
| Sokolov A.N., Barinov A.A., Khrobostov A.E., Konovalov I.A., Chesnokov A.A. Methodology of variant calculations for rationale of safety systems parameters of PWR | 71 |
| Shilov A.V., Ershova M.I. Numerical and experimental investigation of thermal-hydraulic characteristics of the optimized heat exchanger element for a pressurized-water reactor plants nuclear power plant small power | 81 |
| | |
| MECHANICAL AND TRANSPORT: THEORY, TECHNOLOGY, PRODUCTION | 90 |
| | |
| Basmanov I.V., Volskaya N.S., Zakharov A. J., Chichekin I.V., Chutkov K.A. Information and measurement complex for carrying out road and ground testing of small-sized vehicles | 90 |
| Kolin A.A., Silantyev S.E., Rogov P.S., Sergievsky S.A. Application of a simulation model to determine the dynamic and fuel-economic properties of the car | 101 |
| Kositsyn B. B. Evaluation of the impact of an electric vehicle as part of a wear-resistant brake system on the energy efficiency of high-mobility wheeled vehicles | 109 |
| Porubov D.M., Gladyshev A.A., Tyugin D.Yu., Beresnev P.O., Filatov V.I., Pinchin A.V. Development of lane departure warning system based on technical vision | 119 |
| Stadukhin A. A. Applicability research of classical expressions for a tracked machine turning calculations and the method of its refining with neural network | 127 |
| | |
| AUTHORS | 141 |

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

УДК 519.213

DOI: 10.46960/1810-210X_2020_4_7

В.Б. Куликов, А.Б. Куликов, В.П. Хранилов

ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БИМЕДИЦИНСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ОРТОГОНАЛЬНОГО БАЗИСА ЛЕЖАНДРА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Предложена модификация базового метода идентификации полимодальных плотностей распределения случайных величин включением в алгоритм идентификации функционального базиса ортогональных полиномов Лежандра. Выполнена идентификация законов распределения группы иммунологических показателей в базисе Лежандра и верификация предложенного подхода. Модифицированный метод реализует дополнительную степень свободы при изучении характеристик иммунной системы по выборкам малого объема. Это позволяет в условиях дорогих или трудоемких анализов более обоснованно и надежно вести диагностику и интерпретировать результаты терапии. Применение функционального базиса Лежандра при исследовании функциональных состояний иммунной системы человека подтверждает наличие многомодальных (выявленных на тригонометрическом базисе) распределений у целого ряда показателей. Предложенный подход обладает лучшими возможностями при восстановлении равномерных или трапецеидальных распределений, а также класса уплощенных распределений типа шапо.

Ключевые слова: идентификация законов распределения, случайные величины, базис полиномов Лежандра, верификация, биомедицинские показатели.

Введение

В статье рассматриваются современные методы анализа экспериментальных данных медицинского мониторинга и экспертных систем для управления процессами лечения и диагностики. Основанные на алгоритмах решения обратных некорректных задач, данные методы включают в себя идентификацию законов распределения случайных биомедицинских показателей, верификационные аспекты тестовых задач. Они актуальны не только при терапии, но и при создании математических моделей структур, органов и систем человеческого организма, проявляющих стохастические свойства.

Идентификация искомым характеристик плотности вероятности выполнена методом решения интегрального уравнения Фредгольма I рода по ограниченной выборке. Сравняются результаты, полученные при использовании как базиса Лежандра, так и основной базисной системы тригонометрических функций. В качестве медицинских показателей рассмотрены группы иммунологических данных для нескольких десятков пациентов по тридцати важнейшим показателям крови, лимфы, гормонов (Т, В-лимфоциты, лейкоциты, гранулоциты, антитела (иммуноглобулины), CD мембранные комплексы) после интенсивной антибактериальной терапии.

Постановка задачи

Основой подхода к вероятностному анализу биомедицинских данных (статистических по фактическому многообразию и стохастических по природе) служат методы корректной идентификации законов распределения случайных величин (СВ) [1]. Они базируются на решениях обратных некорректных задач, разработанных школой академика А.Н. Тихонова

[2]. Решение такого рода задач основано на методах регуляризации. В биомедицине значительное число распределений иммунных показателей имеет специфические особенности в виде высоких уровней дисперсии, сложных законов распределения (полимодальных, негауссовых) как результата проявления нелинейных эффектов в процессах, происходящих на клеточном и более высоком органно-системном уровне.

Ранее были опубликованы результаты системного подхода к корректному восстановлению плотностей распределения случайных величин и реализаций случайных процессов с апробацией методов на обширном фактическом материале в области клинической иммунологии и гастроэнтерологии [1,3].

Базовый метод идентификации плотностей распределения случайных величин опирается на принцип структурной минимизации риска и в конечном итоге заключается в решении эквивалентных систем линейных уравнений для нахождения коэффициентов разложения искомой плотности по выбранной системе базисных функций. В предположении гладкости формы плотности распределения восстановление законов распределения всех иммунных показателей проведено на множестве тригонометрических функций с ограничением количества членов разложения N в зависимости от объема L наблюдаемых данных минимизацией гарантированного риска. Тем не менее, оставался открытым вопрос о применении других функциональных базисов, отличных от традиционного тригонометрического. Такое исследование позволило бы, во-первых, верифицировать полученные ранее результаты [1], в которых восстановлены распределения со многими модами, во вторых – исследовать возможности новых базисов для различных законов распределения, включая близкие к равномерному. С этой целью рассмотрен базис на основе ортогональных полиномов Лежандра, приведены решения нескольких тестовых примеров, результаты идентификации и сравнения для обширной системы иммунологических показателей.

Тестирование функционального базиса на основе полиномов Лежандра

Напомним математические особенности полиномов Лежандра, используемые при модификации базового метода идентификации плотностей распределения. Полиномы Лежандра, ортогональные на отрезке $[-1,1]$ с единичным весом $\rho(x) \equiv 1$, называются также сферическими полиномами. Формула Родрига дает общий член полинома Лежандра [4] (1):

$$P_n(x) = \frac{1}{n!2^n} \left[(x^2 - 1)^n \right]^{(n)}. \quad (1)$$

Базовый метод идентификации работает на интервале $[0,1]$, потому необходим сдвиг базиса Лежандра с отрезка $[-1,1]$ на рабочий интервал $[0,1]$. Используя линейную подстановку $x = \frac{2t}{T} - 1$, которая сдвигает область существования $[-1,1]$ на промежуток $[0,T]$, получим модифицированные (смещенные) ортонормированные полиномы Лежандра (2):

$$P_n(t,T) = \sqrt{\frac{(2n+1)}{T}} \cdot \frac{n!}{T^n} \cdot \sum_{k=0}^n \frac{C_n^k}{k!(n-k)!} (t-T)^k t^{n-k}. \quad (2)$$

При идентификации функция плотности предполагается непрерывной и сосредоточенной на отрезке $[0,1]$, поэтому $T = 1$. Смещенные полиномы отличаются от классических тем, что первые содержат в каждом P_n слагаемые всех степеней, начиная с n -ой, а вторые – подразделяются на четные и нечетные.

Как и ранее, методы идентификации были реализованы в виде программного обеспечения для приближенного решения интегрального уравнения Фредгольма I рода. Подынтегральная функция плотности вероятности являлась искомой величиной задачи. Правая часть уравнения соответствовала эмпирической функции распределения для каждого показателя: уровня лейкоцитов, В-лимфоцитов, иммуноглобулинов, фагоцитарных чисел и других показателей крови и лимфы.

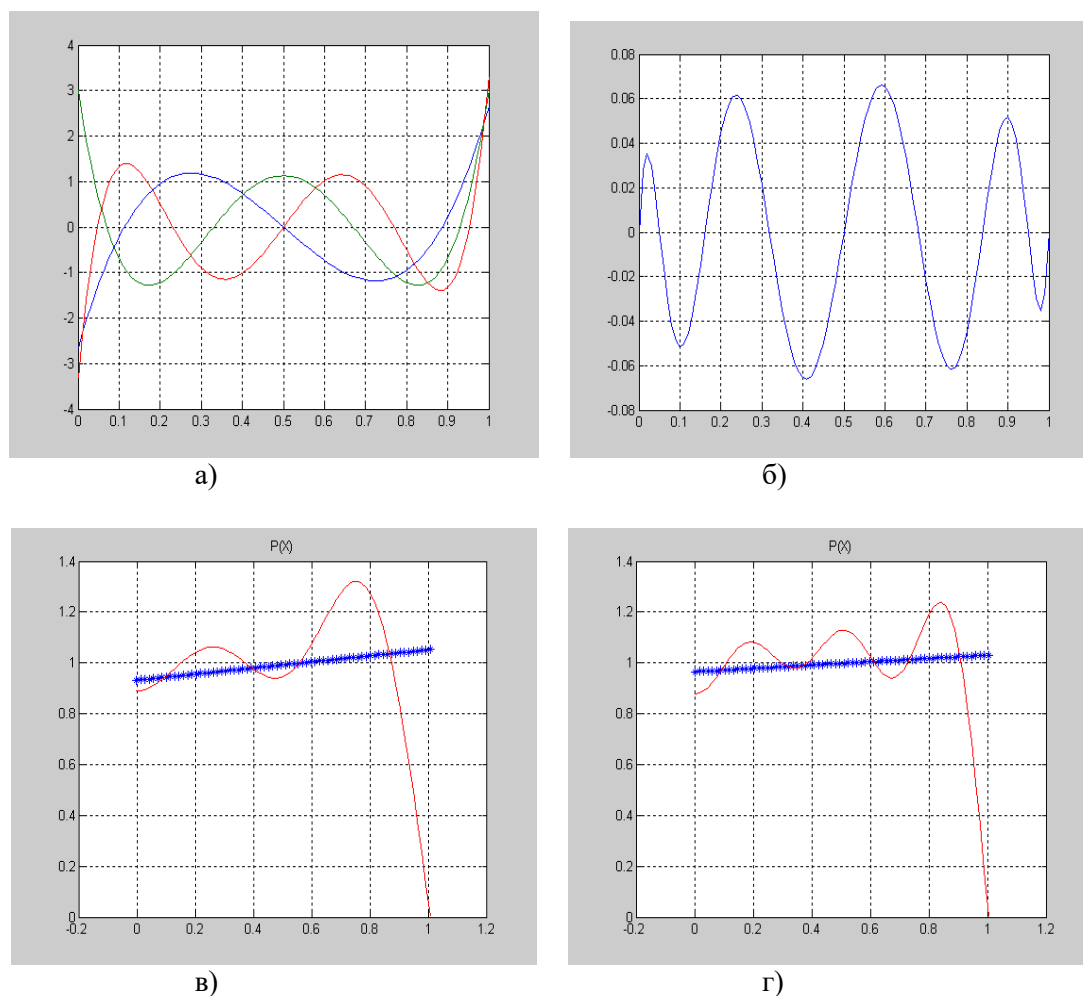


Рис. 1. Модифицированные (смещенные) полиномы Лежандра степеней $n = 3, 4, 5$
а) функция интеграла от полинома Лежандра 8 степени на отрезке $[0,1]$
б) графики идентифицированных плотностей равномерного распределения на отрезке $[0,1]$
(объем выборок соответственно 1200 и 4800); жирная линия – базисные функции – полиномы Лежандра, тонкая – тригонометрический базис в), г)

На рис. 1(а) представлены модифицированные (смещенные) ортонормированные полиномы Лежандра степеней $n = 3, 4, 5$ на отрезке $[0,1]$. Как видно на изображении, система Лежандра должна обладать лучшими возможностями при восстановлении равномерных или трапецеидальных распределений, а также класса уплощенных распределений типа шапо [5]. Действительно, идентификация закона распределения тестовой равномерно распределенной выборки по системе тригонометрических функций существенно уступает по сравнению с вариантом ортонормированных полиномов Лежандра – рис. 1 (в, г). Для тригонометрического базиса (рис. 1 (в)) потребовалось четыре гармонических составляющих при колебательном характере графика $p(x)$, для базиса Лежандра – только два ортогональных полинома. При этом вычисленные по идентифицированным плотностям значения энтропийного коэффициента k равно 1,782 и 1,732 соответственно. Теоретическое значение для равномерного распределения $k = 1,73$.

Время идентификации с помощью тригонометрического базиса (рис. 1(г)) составляет 9 с, алгоритм с полиномами Лежандра требует 13 с. В соответствии с алгоритмом идентификации плотностей распределений на отрезке $[0,1]$ требуется вычисление не только полиномов Лежандра, но и неопределенного интеграла для каждой степени полинома. Для повышения точности и ускорения работы вычислительного модуля авторами реализован аналитический алгоритм интегрирования. На рис. 1(б) показан график вычисленного интеграла от

полинома Лежандра 8 степени. Алгоритмы идентификации плотностей распределения по системе полиномов Лежандра реализованы в пакете MATLAB.

Второй тест и сравнение базисных систем представлены на рис. 2. Двухмодальная локально равномерная плотность распределения специальным образом формируется посредством комбинации функции *rand* пакета MATLAB (псевдослучайная последовательность двух прямоугольных импульсов). Объем выборки составляет 1 200 единиц. Случайная величина в некотором приближении моделирует множество Кантора первого порядка.

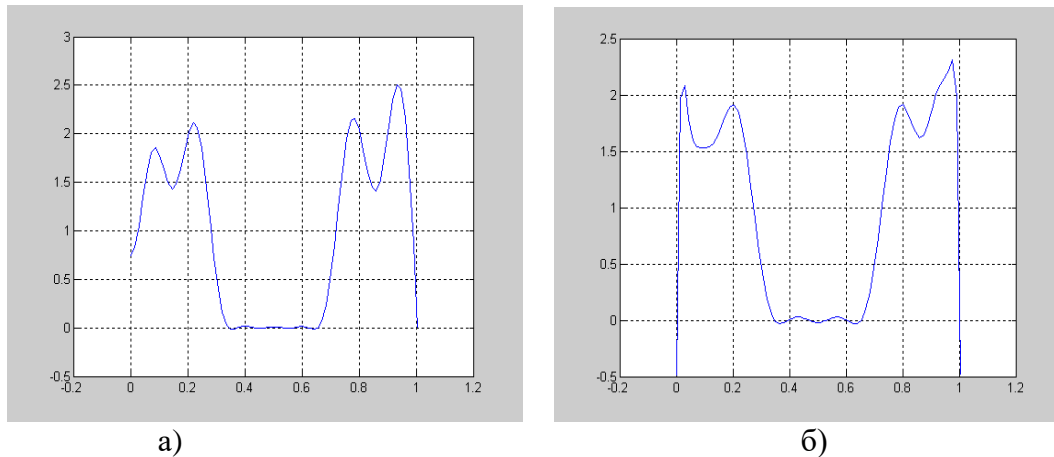


Рис. 2. Идентифицированные плотности двухмодального равномерного распределения на отрезке $[0,1]$. Объем выборки $L = 1\,200$ отсчетов;
 а) тригонометрический базис; б) полиномы Лежандра

Видно, что в базисе полиномов Лежандра (график *b*) можно получить более крутые фронты распределения и меньшие выбросы вершинных участков, чем в тригонометрическом базисе (график *a*). Вычислительные эксперименты показывают, что эта особенность резче проявляется в случае нескольких «импульсов» в законе распределения. Отметим, что оптимальное число членов разложения плотности распределения в обоих случаях примерно равно (15 и 17), но скорость идентификации по гармоникам выше примерно на порядок и составляет 1 с. Точность идентификации гладких распределений у обоих базисов примерно одинакова. На рис. 3 показаны восстановленные графики плотностей нормального (с малой дисперсией $\sigma = 0,05$) и распределения с тремя выраженными модами. Распределение (б) сформировано суммированием двух распределений: нормального (с малой дисперсией) и равномерного на отрезке $[0,1]$.

Проведенные исследования на тестовых задачах верифицировали модифицированный метод на основе базиса Лежандра и показали новые возможности, включая восстановление негладких плотностей распределения и идентификацию распределений со многими модами. Отметим, что применение полиномов Якоби, содержащих несимметричные функциональные компоненты позволит наиболее «лаконичным» образом идентифицировать распределения Вейбулла, Пирсона, экспоненциального. В качестве базисных функций целесообразно также использовать полиномы Гегенбауэра, которые обобщают полиномы Лежандра и Чебышева и обладают возможностями адаптации к предполагаемому виду распределения [4].

Исследование биомедицинских показателей на основе базиса полиномов Лежандра

Применение возможностей разработанного в [1] подхода к обширному материалу иммунологических показателей позволило восстановить и классифицировать весь объем данных, и свести его к структурированной и строгой системе. В настоящей работе сделана верификация результатов, полученных на основе системы тригонометрических функций.

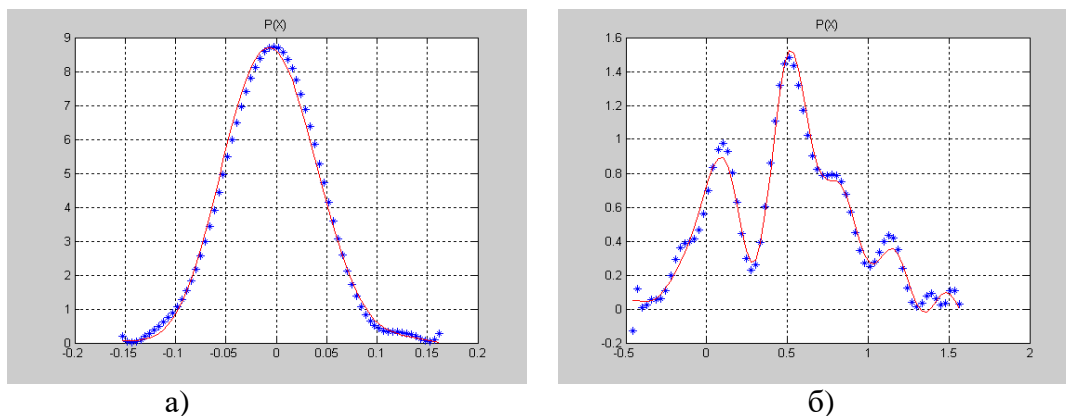
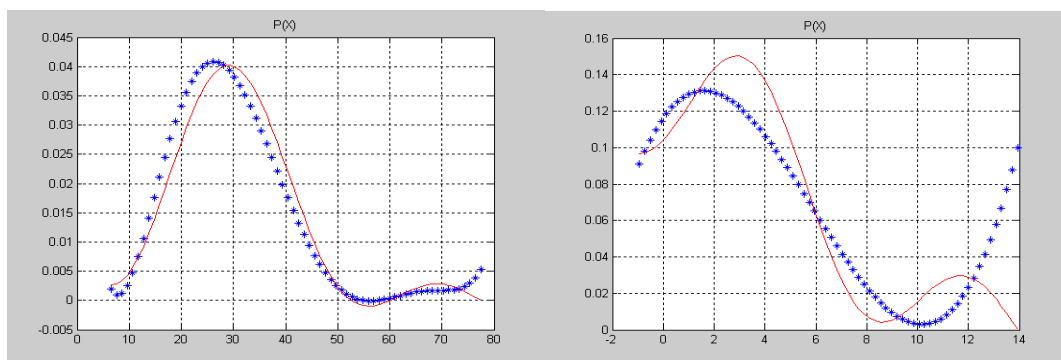
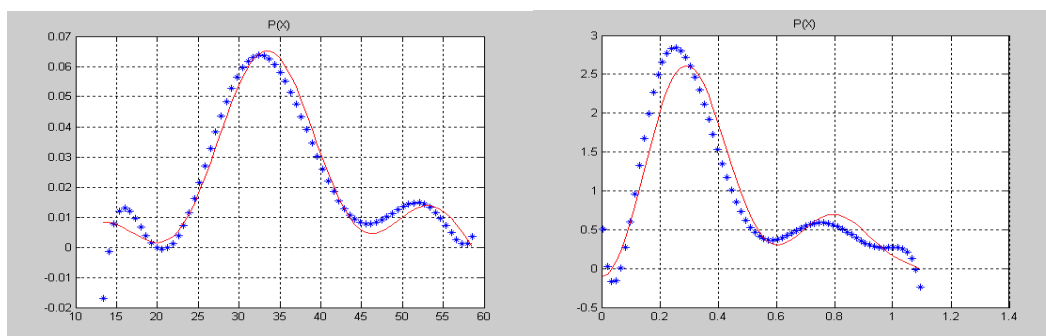


Рис. 3. Идентифицированные распределения с гладкими плотностями, $L = 1200$;
 а) нормальное распределение; б) полимодальное распределение.
 б) звездочка – базис нормированных полиномов Лежандра, сплошная тонкая линия – тригонометрический базис



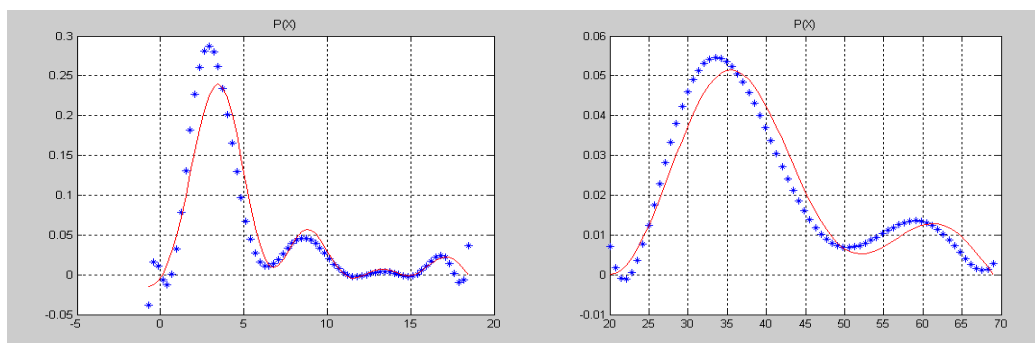
а) Лимфоциты, % (19-37) $L = 71$

б) Нейтрофилы п/я, % (1-5) $L = 70$



в) Т-лимфоциты, % (40-90) $L = 40$

г) В-лимфоциты, млн/л (0,03-0,9) $L = 38$



д) Тх/Тс, единиц (2,5-5,0) $L = 40$

е) Е-РОН-теофиллин, % (10-50) $L = 40$

Рис. 4. Идентифицированные полимодальные плотности распределения первой группы иммунологических показателей

Эти результаты дополнены идентифицированными законами распределения иммунологических показателей в базисе Лежандра. Важным обстоятельством является факт исследования выборок малого объема. Известно, что обработка данных такого объема является сложной методологической и математической задачей [6]. На рис. 4-6 представлены совмещенные графики идентифицированные плотности распределения трех групп иммунологических показателей пациентов-мужчин. Объем выборок L изменяется от 33 до 71.

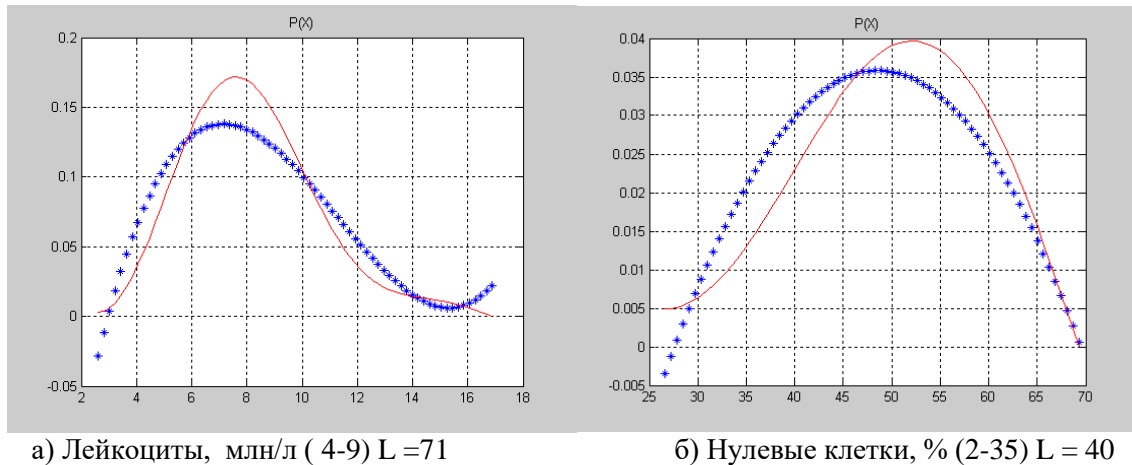


Рис. 5. Идентифицированные одномодальные плотности распределения второй группы иммунологических показателей

Время идентификации плотностей распределения: десятые доли секунды для тригонометрического базиса, не более 3 с – для базиса Лежандра.

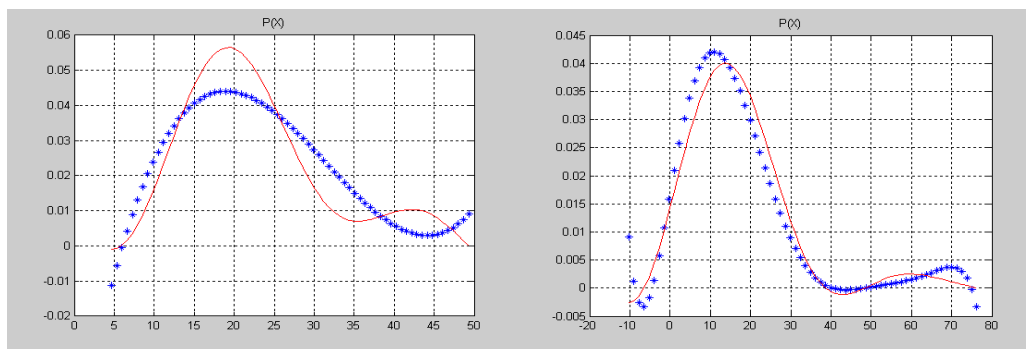
На рис. 7 представлены результаты регрессионной оценки системы двух случайных величин у женщин: Y -лейкоцитов, млн/л и X -лимфоцитов, %. Методом экспресс обработки статистических данных построено поле рассеяния (корреляционное поле) и линеаризованный вариант линий регрессии. Наблюдается значительное рассеяние величины Y и протяженность величины X . Об этом свидетельствует и вычисленный коэффициент корреляции $\rho = -0,39$.

Анализ корреляционного облака позволяет сделать следующие выводы:

- 1) наличие обособленной группы точек в интервале (36..44) по X (лимфоциты, %) свидетельствует о втором таксоне этого показателя, что подтверждает его двухмодальную форму распределения;
- 2) в силу значимости числа элементов этого подмножества ($\approx 25\%$) данный факт нельзя отнести к промахам и случайности выборки;
- 3) точность метода восстановления плотности распределения по примененному принципу решения некорректно поставленных задач имеет наглядное доказательство;
- 4) методы регрессионного анализа для иммунологических показателей должны априорно задавать в большинстве случаев нелинейную модель и учитывать многотаксонный характер данных.

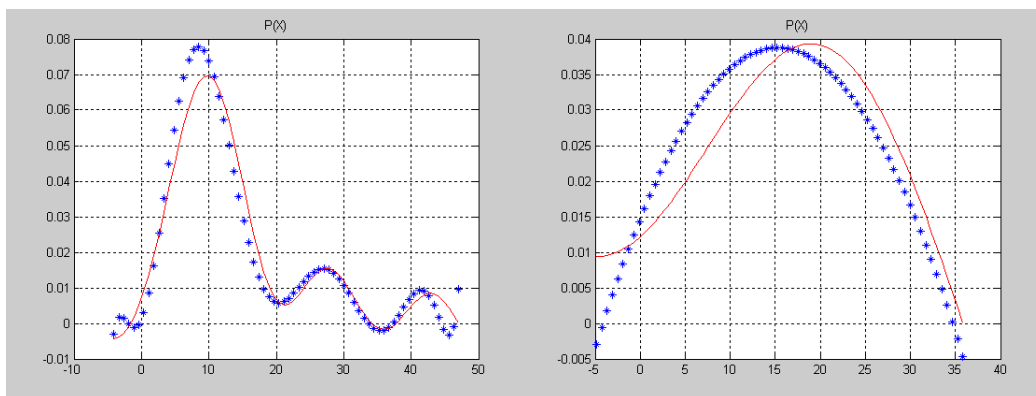
Рассмотрение аналогичных иммунологических показателей у пациентов-женщин в целом полностью подтверждает закономерность наличия высших мод в семействе лимфоцитарных показателей и CD-рецепторов.

Независимость этой выборки от мужской определяет дополнительные аргументы в обоснование предложенной модификации и классификации иммунологических данных.



а) CD 8+ (Т-киллеры), % (22,6 - 2,7)

б) CD 25 (Рецептор ИЛ2), % (14,0 - 3,5)



в) CD 71 (Рецептор трансферрина), %
(9,4 - 1,8)

г) CD 26 (Активационный рецептор), %
(13,6 – 5,0)

Рис. 6. Идентифицированные плотности распределения третьей группы иммунологических показателей с выборками минимального объема (L = 33 – объем выборки для каждого показателя)

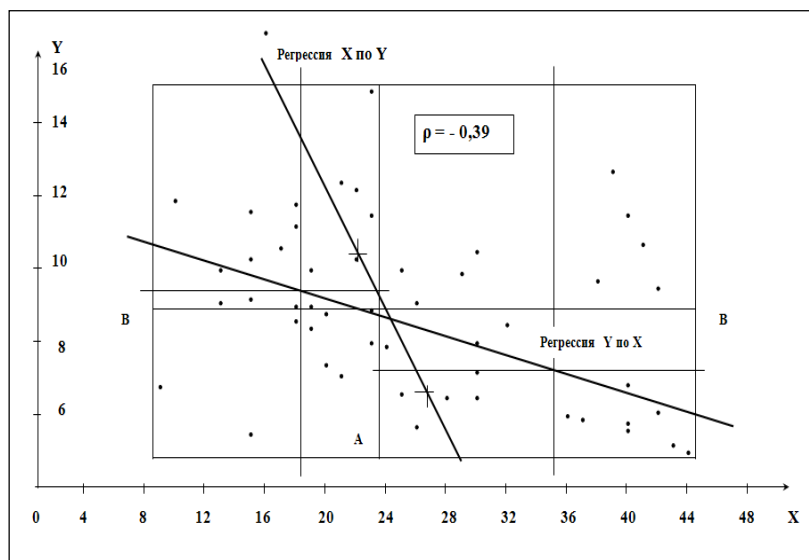


Рис. 7. Экспресс-метод статистической обработки иммунологических данных (пациенты – женщины): корреляционное поле и линии регрессии системы двух случайных величин (L = 52)

Выводы

Предлагаемый метод идентификации на основе функционального базиса Лежандра реализует дополнительную степень свободы при изучении характеристик иммунной системы по выборкам малого объема. Это позволяет в условиях дорогих или затратных по времени анализов, когда нет возможности увеличить объем выборки, более обоснованно и надежно вести диагностику и интерпретировать результаты терапии. Применение функционального базиса Лежандра при исследовании функциональных состояний иммунной системы подтверждает наличие многомодальных (выявленных на тригонометрическом базисе) распределений у целого ряда показателей.

Успешная идентификация эмпирических двух- и полимодальных распределений по выборкам малого объема предложенными методами позволяет считать восстановление плотностей вероятностей и сам подход адекватными проблеме точного оценивания.

Исследование на модельных примерах показывает, что альтернативный метод непараметрического восстановления Парзена-Розенблатта по эффективности и разрешающей способности значительно уступает применяемому подходу. Например, для относительно успешного восстановления функции трехмодального распределения требуется объем выборки в 1 200 отсчетов. Время вычислений по методу Парзена-Розенблатта составляет от 5 до 15 мин даже для одномодальной плотности [6]. На малых выборках (100-300 единиц) наблюдается пропуск значимых мод.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 19-07-00926_a.

Библиографический список

1. **Куликов, В.Б.** Восстановление полимодальных плотностей вероятности по экспериментальным данным в структурах со стохастическими свойствами // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2014. – № 1(1). – С. 248-256.
2. **Тихонов, А.Н.** Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. – М.: Наука, 1986. – 288 с.
3. **Kulikov, V.** The Identification of the Distribution Density in the Realization of Stochastic Processes by the Regularization Method / V. Kulikov // Appl. Mathem. Sciences. – Vol. 9. – № 137. – 2015. – P. 6827-6834.
4. **Дедус, Ф.Ф.** Классические ортогональные базисы в задачах аналитического описания и обработки информационных сигналов: учебное пособие / Ф.Ф. Дедус, Л.И. Куликова, А.Н. Панкратов, Р.К. Тетуев. – М.: Изд-во МГУ, 2004. – 141 с.
5. **Новицкий, П.В.** Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.
6. Поршев С.В., Копосов А.С. Использование аппроксимации Розенблатта-Парзена для восстановления непрерывной случайной величины с ограниченным одномодальным законом распределения / С.В. Поршев, А.С. Копосов // Научный журнал КубГАУ. – 2013. – № 92(08). – С. 1-14.

*Дата поступления
в редакцию: 29.09.2020*

V.B. Kulikov, A.B. Kulikov, V.P. Khranilov

**THE IDENTIFICATION AND VERIFICATION OF THE LAWS OF DISTRIBUTION
OF BIOMEDICAL INDICATORS BASED ON THE LEGENDRE ORTHOGONAL BASIS**

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

Purpose: Modern methods of analyzing experimental data from medical monitoring and expert systems for managing treatment and diagnostics processes are considered.

Design/methodology/approach: A modification of the basic method for identifying polymodal distribution densities of random variables is proposed by including the functional basis of orthogonal Legendre polynomials in the identification algorithm.

Findings: Identification of the laws of distribution of a group of immunological indicators in the Legendre basis, and verification of the proposed approach.

Research limitations/implications: The methods are based on algorithms for solving inverse ill-posed problems, include identification of the distribution laws of random biomedical indicators, verification aspects of test problems, and are relevant not only for therapy, but also for creating mathematical models of structures, organs, and systems of the human body that exhibit stochastic properties.

Originality/value: The method of identification based on the Legendre functional basis provides an additional degree of freedom when studying the characteristics of the immune system from small samples. This makes it possible to conduct diagnostics and interpret the results of therapy more reasonably and reliably in conditions of expensive or time-consuming analyses, when it is not possible to increase the sample size.

Key words: identification, distribution laws, random variables, Legendre polynomial basis, verification, biomedical indicators.

Н.Г. Лабутин, П.В. Костин, Н.Ю. Шадрунова

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЫЯВЛЕНИЯ ИНЦИДЕНТОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И РЕАГИРОВАНИЯ НА НИХ

Приволжский институт повышения квалификации федеральной налоговой службы

Проведен анализ действий должностных лиц при выявлении и расследовании инцидентов информационной безопасности, а также реагировании на них. С использованием методологии IDEF0 разработана модель этих действий, позволяющая формализовать и регламентировать процедуры выявления инцидентов информационной безопасности и реагирования на них в любой информационной системе.

Ключевые слова: инцидент информационной безопасности, моделирование процессов, методология IDEF0, выявление инцидентов информационной безопасности, расследование инцидентов информационной безопасности.

Введение

Выявление инцидентов информационной безопасности (ИБ) в процессе ее обеспечения – действие, четко не регламентированное и детерминированное многими факторами. К последним можно отнести назначение и тип информационной системы, ее структуру (распределенная, локальная, корпоративная) и масштабы, вид обработки информации (централизованная, децентрализованная), разграничение прав доступа к ресурсам (одинаковые или различные для разных пользователей), ограничение доступа к обрабатываемой информации и т.д. В информационных системах (ИС) выявление инцидентов ИБ является начальным этапом в процедуре определения и реагирования на них. От того, насколько полно они будут выявлены, зависит надежность защиты информации, уровень которой необходимо обеспечить в конкретной ИС. При этом у специалиста по защите информации или администратора безопасности возникают следующие вопросы. Все ли события, связанные с информационной безопасностью данной ИС, необходимо относить к инцидентам ИБ, или надо выбирать только те события ИБ, которые могут нанести ощутимый ущерб ИС? По каким критериям необходимо классифицировать события ИБ? Какие события необходимо считать инцидентами ИБ для конкретной ИС с определенной архитектурой, видами обработки информации и другими факторами, указанными выше.

Несмотря на то, что инциденты и события ИБ и принципы управления ими представлены в ГОСТ Р ИСО/МЭК ТО 18044-2007 [1], в настоящее время во многих организациях, использующих различные информационные системы, нет четкого понимания того, что необходимо относить к инцидентам ИБ, какие события ИБ могут быть отнесены к инцидентам, как классифицировать события и инциденты ИБ для того, чтобы формализовать и регламентировать порядок их выявления и реагирования на них.

При определении инцидентов ИБ возможны следующие крайности. Если все события, связанные с ИБ, выявленные в данной ИС, отнести к инцидентам ИБ, то на них надо определенным образом реагировать: либо прекращать обработку данных во всей ИС, либо прекращать работу пользователя, связанного с инцидентом, либо выполнять другие действия, которые, в любом случае, приводят к дополнительным временным затратам, простою оборудования и снижению эффективности работы всей ИС в целом. Если относить к инцидентам ИБ только выборочные события без должной их классификации по степени наносимого ущерба ИС, то будет страдать безопасность информации. Также необходимо понимать то, что инциденты ИБ – это неизбежное явление для любой ИС. И какие бы превентивные меры не предпринимались в ИС для их недопущения, избежать всех инцидентов ИБ невозможно, так как в любой, даже самой защищенной ИС могут происходить события,

приводящие к инцидентам ИБ. Поэтому при эксплуатации любой ИС очень важна четкая регламентация действий по определению инцидентов ИБ и реагированию на них.

Авторами проведено моделирование действий по выявлению, анализу и расследованию инцидентов ИБ в ИС с целью их формализации. Разработанная модель призвана помочь специалистам (администраторам) информационной безопасности регламентировать эти действия в любой организации, независимо от типа ИС, ее структуры, принципов обработки информации и т.д. Для моделирования использованы функциональные модели процессов, построенные по методологии IDEF0 [2]. Моделирование различных процессов по методологии IDEF0 производится с помощью диаграмм, которые изображаются в виде функциональных блоков, обозначающих какое-либо действие. Блоки обозначаются в диаграмме прямоугольниками. Каждая сторона прямоугольника играет свою роль: верхняя – управление (управляющее воздействие), нижняя – механизм реализации данной функции, левая – вход, правая – выход. Блоки соединяются линиями в виде стрелок. Каждая стрелка предназначена для отображения элемента системы, который или обрабатывается блоком (вход), или является результатом обработки (выход), или оказывает другое воздействие на функцию, отображенную данным блоком [2].

Анализ действий должностных лиц при выявлении инцидентов ИБ и реагировании на них, разработка модели действий

При моделировании использованы принципы, рассмотренные в [3]. Модель любой системы представляется сначала в виде основной целевой функции, затем с помощью декомпозиций детализируется до состояния, определяемого разработчиком. Целевой функцией в данном случае является последовательность процессов при выявлении инцидентов ИБ и реагировании на них и действий, производимых ответственными за безопасность информации должностными лицами организации. На рис. 1 представлена диаграмма с целевой (контекстной) функцией модели действий по обнаружению и реагированию на инциденты ИБ, т.е., обобщенное представление предметной области данного исследования.

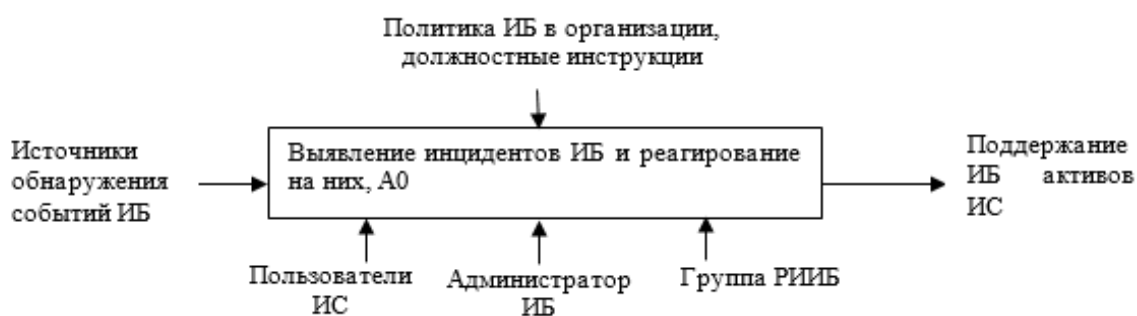


Рис. 1. Диаграмма А-0. Целевая функция «Выявление инцидентов ИБ и реагирование на них, А0»

Декомпозиция целевой функции представляется в виде диаграммы А0, на которой изображены функции А1 «Мониторинг и выявление событий ИБ», А2 «Выявление инцидента ИБ», А3 «Оперативное реагирование на инцидент ИБ», А4 «Расследование и закрытие инцидента ИБ, выработка превентивных мер».

В диаграмме А-0 в качестве входа представлены различные источники обнаружения событий ИБ, в качестве управляющих воздействий – Политика ИБ в организации как основной организационно-распорядительный документ локального уровня, в котором должны быть представлены механизмы и действия должностных лиц при выявлении инцидентов ИБ и реагировании на них. Также управляющими воздействиями можно считать должностные инструкции и различные другие инструкции пользователей ИС, администратора

ИБ, сотрудников организации, входящих в группу реагирования на инциденты ИБ (ГРИИБ) и т.д. ГРИИБ – это коллегиальный орган в любой организации, создаваемый для оперативного реагирования на возникающие инциденты ИБ, их расследования, анализа и выработки мер по недопущению подобных инцидентов в дальнейшем, то есть, для минимизации рисков для активов организации от инцидентов ИБ.

В роли «Механизмов» для выполнения функции А0 выступают должностные лица, задействованные в процессах выявления и расследования инцидентов ИБ: Пользователи ИС, администраторы ИБ, группа РИИБ. На выходе целевой функции в общем виде в качестве желаемого результата представим «поддержание ИБ активов ИС», что означает, недопущение негативных последствий в ИС от инцидента ИБ, определение источников инцидента и недопущение подобных инцидентов ИБ в будущем. На рис. 2 приведена диаграмма с декомпозицией целевой функции А0.

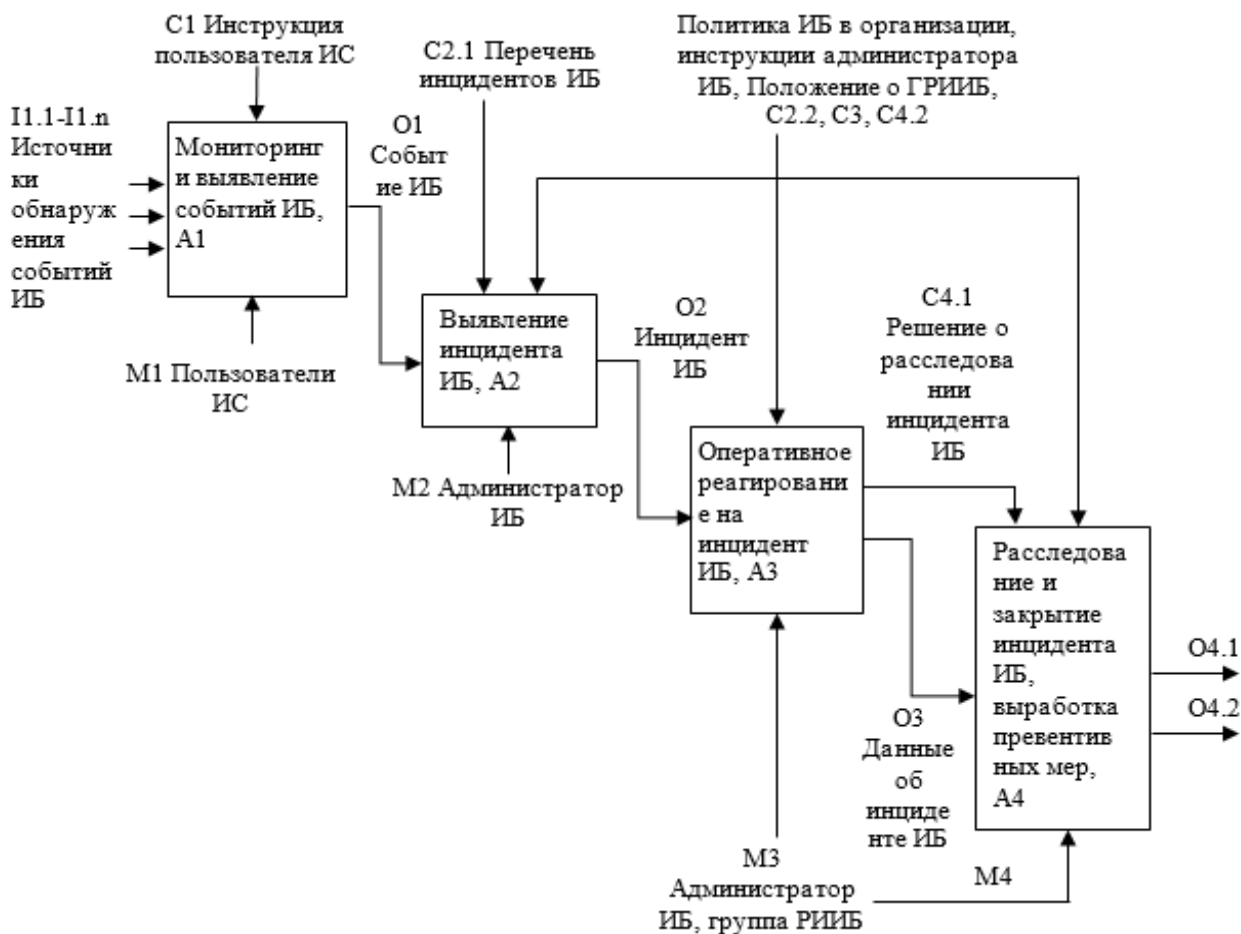


Рис. 2. Декомпозиция целевой функции «Выявление инцидентов ИБ и реагирование на них», А0

Описание диаграммы А0.

I 1.1 – I 1.n – Источники обнаружения событий ИБ.

Функция А1 «Мониторинг и выявление событий ИБ» предполагает применение пользователями ИС таких источников, как:

- автоматизированные системы мониторинга и оповещения, средства сигнализации о системных событиях, ошибках и нарушениях в работе системы;
- средства регистрации событий в системе, прикладных программах и аппаратном обеспечении;
- антивирусное ПО, системы обнаружения вторжений;
- сообщения пользователей и других сотрудников организации, допущенных к инфраструктуре вычислительной системы.

С1 – инструкция пользователя ИС.

М1 – пользователи ИС.

О1 – событие ИБ, является входом I2.

С2.1 – перечень инцидентов ИБ, установленный в организации.

С2.2, С3, С4.2 – политика ИБ в организации, инструкции администратора ИБ, Положение о ГРИИБ.

М2 – администратор ИБ.

О2 – инцидент ИБ, является входом I3.

М3, М4 – администратор ИБ.

О3 – подробные данные об инциденте ИБ – вход I4.

С4.1 – решение о расследовании инцидента ИБ, принимается руководителем группы реагирования на инциденты ИБ.

О4.1 – результаты работы ГРИИБ по расследованию инцидента ИБ с указанием нарушителей, источников и факторов, способствующих возникновению инцидента;

О4.2 – меры по недопущению подобных инцидентов, добавление этого инцидента в Перечень инцидентов ИБ организации.

Вообще все действия при выявлении инцидентов ИБ и реагировании на них можно представить в виде последовательности:

- обнаружение событий ИБ в результате мониторинга всех событий в ИС;
- обработка событий ИБ, то есть, определение того, относится событие к инцидентам или нет; любое событие ИБ может быть результатом преднамеренных или непреднамеренных попыток нарушения конфиденциальности, целостности и (или) доступности информации в ИС в обход защитных мер, но совсем необязательно то, что эта попытка будет отнесена к инцидентам ИБ исходя, в первую очередь, из того, какой ущерб активам ИС она может нанести;
- идентификация инцидента ИБ с целью дальнейшей оценки возможного ущерба от него и дальнейшего реагирования на него;
- оперативное реагирование на выявленный инцидент ИБ с целью минимизации воздействия инцидента на активы ИС;
- расследование инцидента ИБ, определение причин, по которым стал возможен инцидент, выявление «виновника» инцидента, был ли злой умысел и т.д.;
- выводы из расследованного инцидента ИБ и принятие мер для недопущения его в дальнейшем.

Первое действие назовем функцией А1 «Мониторинг и выявление событий ИБ». Действия по обработке и идентификации инцидентов объединим вместе и назовем А2 «Выявление инцидента ИБ». Остальные действия назовем одноименными функциями А3 «Оперативное реагирование на инцидент ИБ» и А4 «Расследование и закрытие инцидента ИБ, выработка превентивных мер».

После обнаружения события ИБ пользователь или иной сотрудник организации обязан оповестить администратора ИБ установленным в данной организации способом или несколькими способами, например, по телефону, электронной почте, или лично. При этом по требованию Администратора ИБ возможно уточнение данных о событии для того, чтобы он смог точно идентифицировать произошедшее событие как инцидент ИБ.

Декомпозиция функции (процесса) А1 «Мониторинг и выявление событий ИБ» приведена на рис. 3. Выходом О14 функции «Регистрация данных о событии в журнале (в электронном/бумажном виде)», А14 будет запись в журнале регистрации данных о событии ИБ, которая используется в качестве входа функции А2 «Выявление инцидента ИБ».

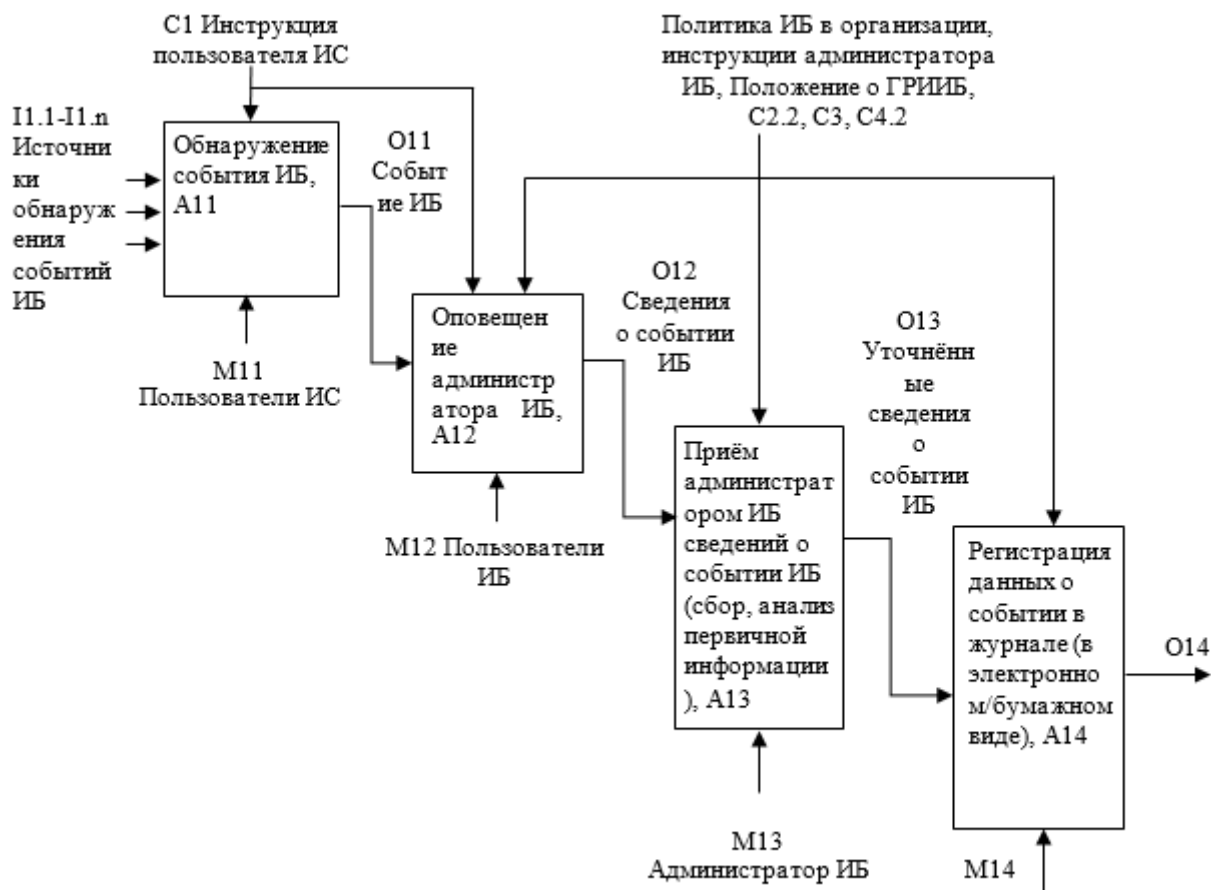


Рис.3. Декомпозиция функции «Мониторинг и выявление событий ИБ», A1

В процессе выявления инцидента из обнаруженных пользователями событий ИБ, администратором ИБ выполняются следующие процедуры:

- прием администратором ИБ сведений о событии ИБ (сбор, анализ первичной информации от пользователей ИС);
- регистрация данных о событии в журнале (в электронном/бумажном виде);
- идентификация Администратором ИБ события ИБ;
- отнесение или не отнесение события к инцидентам ИБ;

Выявление инцидентов ИБ и их идентификация может производиться по Перечню инцидентов ИБ, разработанному в данной организации, а также, с использованием методик отнесения событий ИБ к инцидентам, которые в индивидуальном порядке могут быть разработаны для организации в зависимости от используемых информационных систем, вида обрабатываемой информации и прочих факторов.

Администратор ИБ, проведя процедуры выявления инцидента ИБ из обнаруженных событий, в свою очередь, должен сообщить о нем руководителю группы реагирования на инциденты ИБ (ГРИИБ) и передать ему всю собранную об инциденте ИБ информацию. Если событие не отнесено к инцидентам ИБ, тогда администратор ИБ делает запись в журнал регистрации событий и инцидентов ИБ и затем Уведомление заявителю и руководителю ГРИИБ. Декомпозиция функции A2 «Выявление инцидента ИБ» представлена на рис. 4.

В результате выполнения функции «Выявление инцидента ИБ», A2 администратор ИБ сообщает о выявленном инциденте ИБ руководителю ГРИИБ по определенной в данной организации форме, в которой указывается вся имеющаяся информация о данном инциденте, а также делает запись о выявленном инциденте в журнал регистрации инцидентов ИБ. В диаграмме на рис. 4 такая форма обозначена O22. Выход O24 – это уведомление о событии, не признанном инцидентом ИБ.

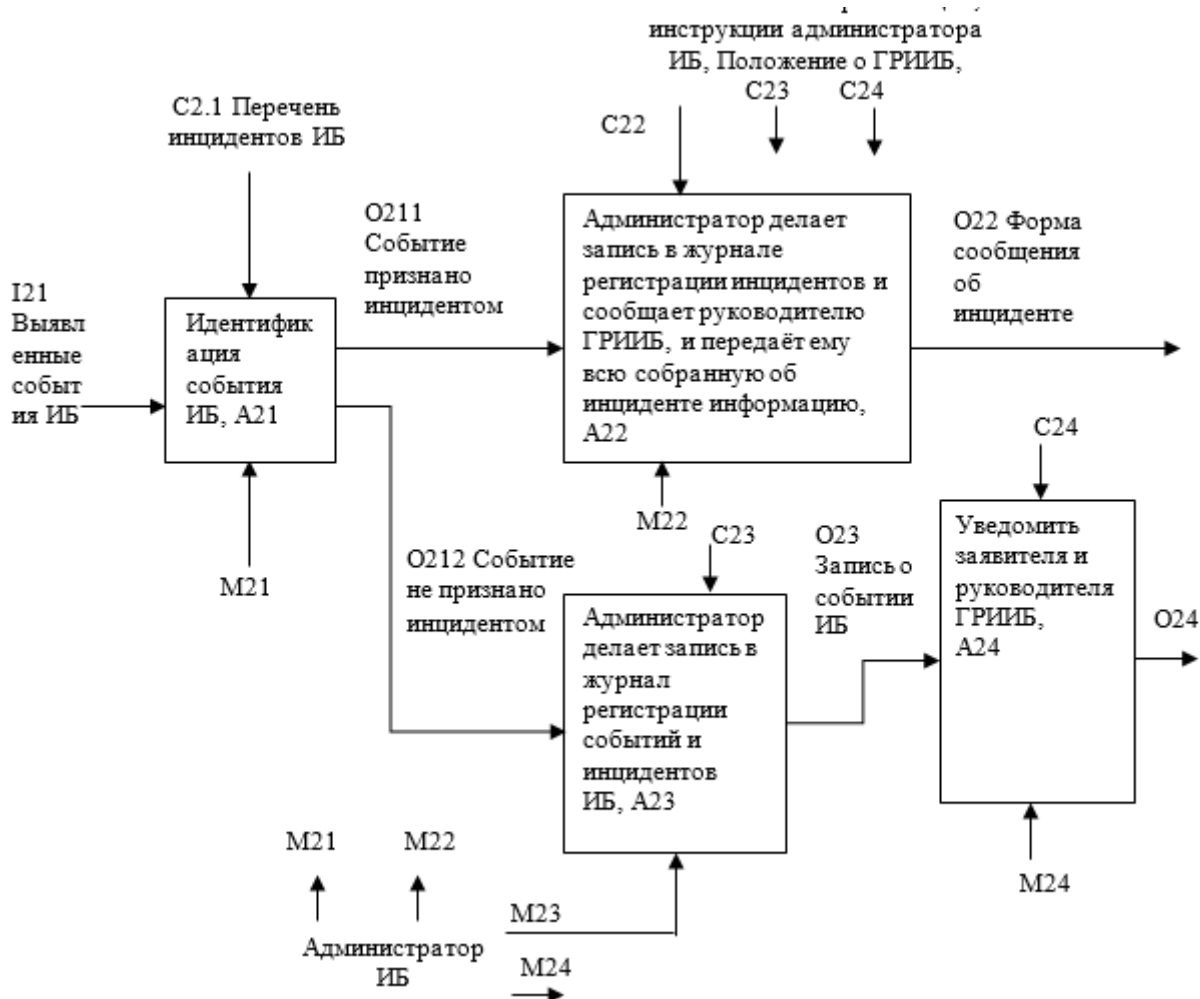


Рис. 4. Декомпозиция функции «Выявление инцидента ИБ», A0

Действия ГРИИБ вместе с администратором ИБ по оперативному реагированию на выявленный инцидент представим в виде одноименной функции «Оперативное реагирование на инциденты ИБ», A3, которая содержит следующую последовательность процедур: Определение факта обработки инцидента ИБ в ИС в настоящее время; Если обрабатывается, то сравнение его и нового инцидента: нет ли общих черт? Если в данный момент в системе уже обрабатываются инциденты ИБ, то вновь поступивший инцидент сопоставляется с обрабатываемыми. Идентичные события по источнику и носителю угрозы обрабатываются в рамках одного зарегистрированного инцидента ИБ.

Руководитель ГРИИБ организует сбор дополнительной информации об инциденте (зона, область, масштаб, длительность и источник воздействия, количество и значимость вовлечённых активов, список вовлеченных лиц, характер причиненного ущерба). На основании этого принимается решение о критичности инцидента, определяется перечень и степень срочности принятия мер по локализации инцидента ИБ.

Администратор ИБ обеспечивает оповещение руководства о регистрации событий и инцидентов ИБ. Затем производится оперативное реагирование на инцидент, включающее локализацию инцидента, отключение АРМов или ресурсов, подверженных негативному воздействию, от общей инфраструктуры, взятие инцидента под оперативный контроль. Для этого руководитель ГРИИБ привлекает любые подразделения и средства, необходимые для эффективного реагирования на произошедший инцидент. После взятия инцидента под оперативный контроль руководитель ГРИИБ определяет необходимость и вероятные способы дальнейшего реагирования на инцидент, включая восстановление повреждённых данных и принятие решения о расследовании инцидента ИБ.

Члены ГРИИБ, в том числе, администратор ИБ, по команде руководителя предпринимают меры по сохранности собранных сведений об инциденте; носители информации сохраняются в сейфе у Администратора ИБ, электронные документы об инциденте (например, журналы безопасности ИС) копируются на машинный носитель и сохраняются в сейфе Администратора ИБ. В дальнейшем, доступ к этим документам предоставляется уполномоченным сотрудникам только для чтения. Таким образом, декомпозиция функции А3 «Оперативное реагирование на инциденты» будет выглядеть в виде диаграммы, представленной на рис. 5.

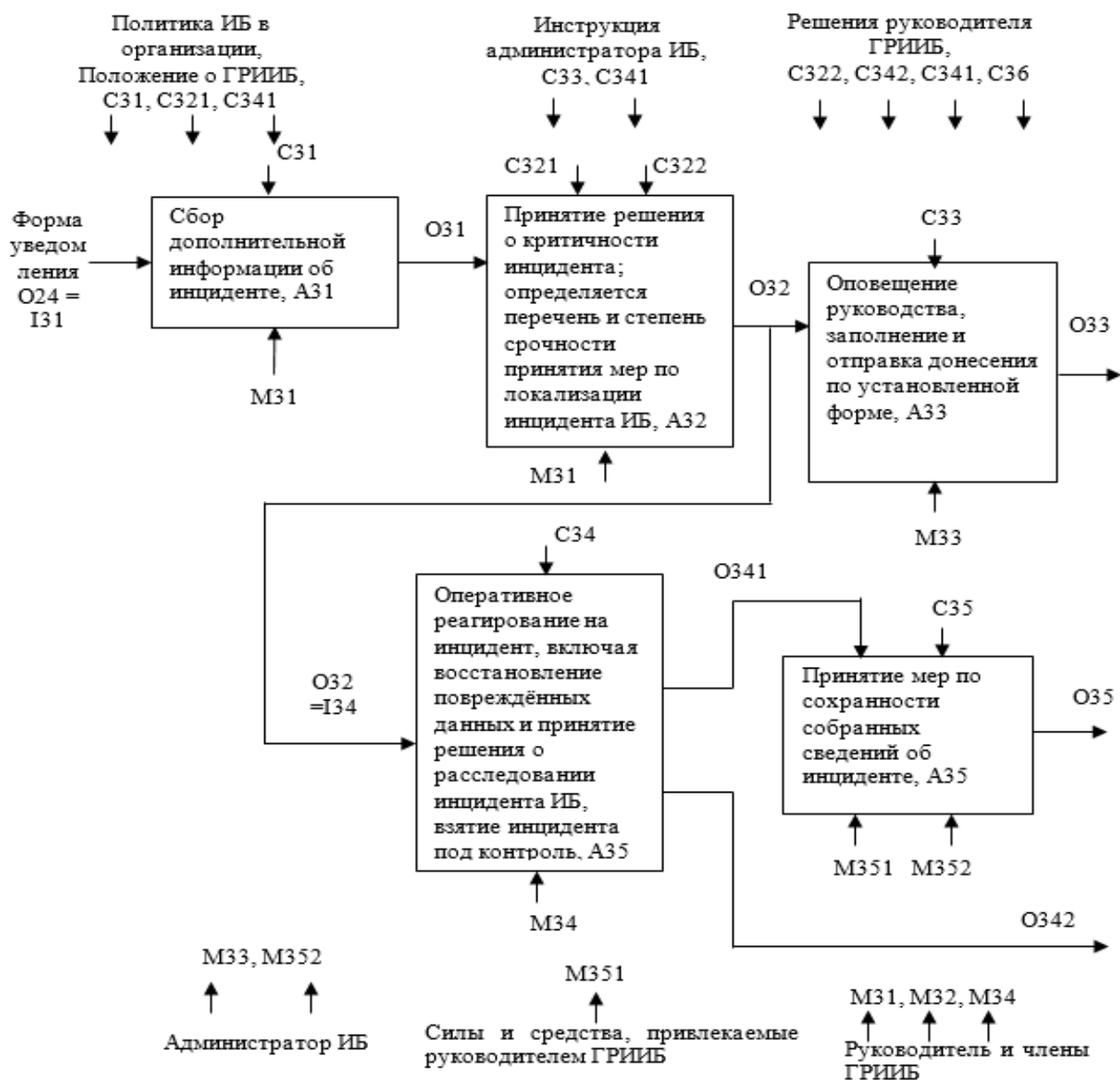


Рис. 5. Декомпозиция функции «Оперативное реагирование на инциденты ИБ», А3

Описание функции «Оперативное реагирование на инциденты ИБ», А3:

I31 – это уведомление заявителя и руководителя ГРИИБ о событии, которое не признано инцидентом ИБ, которое является выходом О24 функции «Уведомить заявителя и руководителя ГРИИБ», А24.

О31 – это информация, необходимая для принятия руководителем ГРИИБ решения о критичности инцидента и для определения перечня и степени срочности принятия мер по локализации инцидента ИБ.

О32 – решение руководителя ГРИИБ о критичности инцидента; перечень мер по локализации инцидента ИБ и очередность их принятия.

О33 – донесение руководителю организации по установленной форме о произошедшем инциденте ИБ.

О341 – задания (инструкции), выработанные группой реагирования на инциденты ИБ во главе с ее руководителем, которые необходимо выполнить администратору ИБ и всем задействованным сотрудникам организации.

О342 – решение о расследовании инцидента ИБ.

О35 – скомпилированные у ГРИИБ все сведения о произошедшем инциденте ИБ, может быть применена форма документа, разработанная для каждой организации индивидуально.

Декомпозиция функции А4 «Расследование и закрытие инцидента, выработка превентивных мер» представлена на диаграмме (рис. 6).

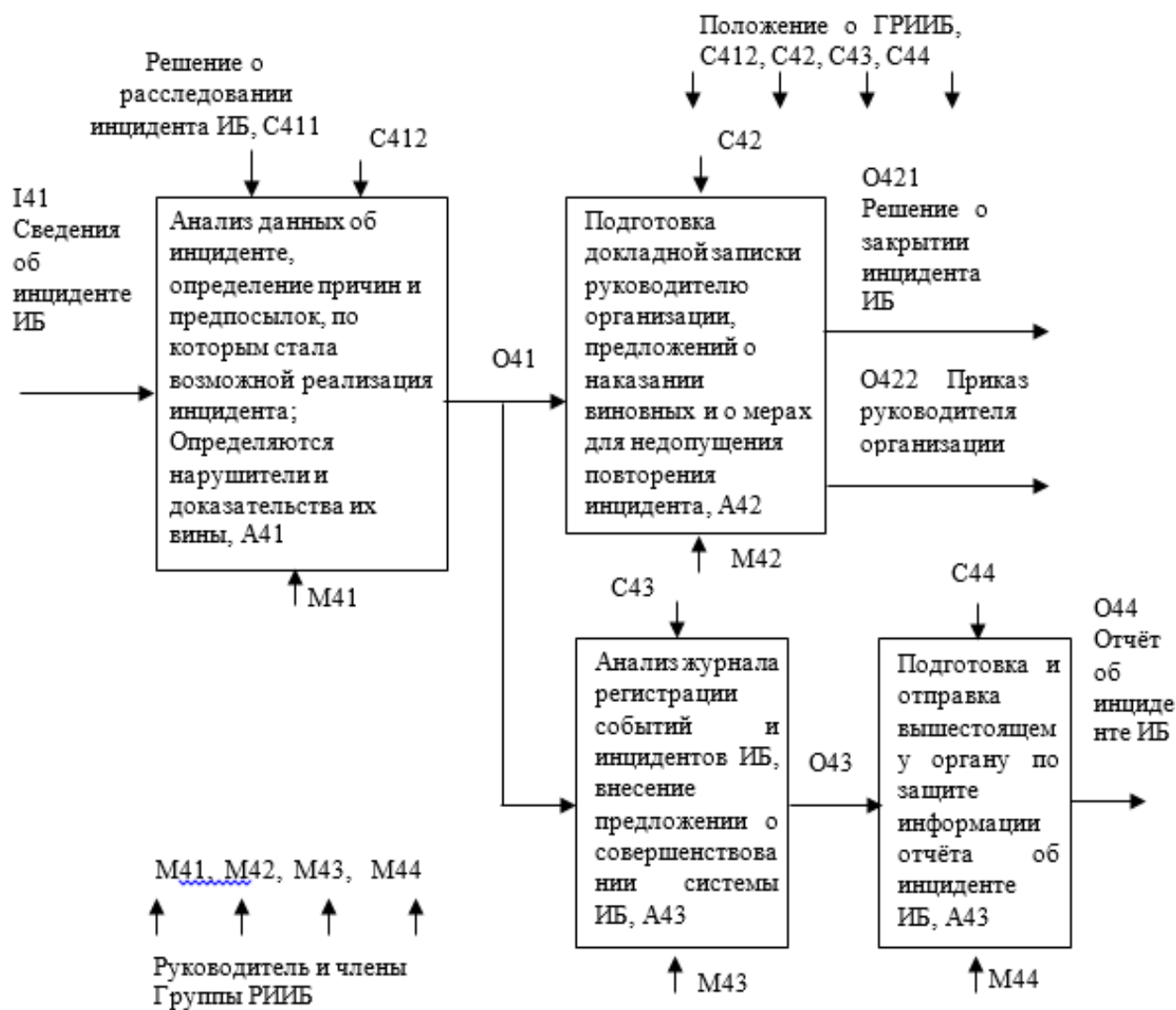


Рис. 6. Декомпозиция функции «Расследование и закрытие инцидента ИБ, выработка превентивных мер», А3

Описание диаграммы, представленной на рис. 6.

A41 – Проводится анализ данных об инциденте; определяются причины и предпосылки, по которым стала возможной реализация инцидента. Определяются нарушители (злоумышленники) и доказательства их деятельности в рамках инцидента ИБ.

A42 – Готовится докладная записка на имя руководителя организации, включающая собранную в рамках расследования информацию, а также, предложения о принятии дисциплинарных и организационных мер в отношении нарушителей и мер для недопущения повторения инцидента ИБ.

A43 – Анализ журнала регистрации событий и инцидентов ИБ; выявление тенденций и закономерностей возникновения инцидентов. Принятие решений о внесении изменений в перечень инцидентов, о совершенствовании системы управления инцидентами и системой ИБ организации.

A44 – На основе проведенного анализа ГРИИБ формирует и отправляет вышестоящему органу по защите информации отчет об инциденте ИБ, содержащий всю собранную информацию.

Выходами диаграммы декомпозиции функции A3, представленной на рис. 6, являются:

O421 – решение о закрытии инцидента ИБ;

O422 – приказ руководителя организации о наказании виновных в произошедшем инциденте ИБ и о принятии превентивных мер, направленных на предотвращение подобных инцидентов в будущем;

O44 – отчет об инциденте ИБ в вышестоящую организацию.

Отчет об инциденте ИБ может представляться в подразделение по защите информации или другое подразделение вышестоящей организации по установленной форме.

Заключение

Разработана модель процессов и действий, производимых должностными лицами при выявлении и расследовании инцидентов ИБ в любой организации, эксплуатирующей информационные системы. Моделирование произведено по методологии IDEF0, которая в настоящее время пользуется популярностью и отличается простотой в восприятии, понятностью и наглядностью моделируемых процессов.

Авторы статьи надеются на то, что представленная модель поможет специалистам по защите информации и их руководителям формализовать процессы по выявлению и расследованию инцидентов ИБ в их организации, а также будет способствовать разработке собственного регламента действий.

Библиографический список

1. ГОСТ Р ИСО/МЭК ТО 18044-2007 Информационная технология (ИТ). Методы и средства обеспечения безопасности. Менеджмент инцидентов информационной безопасности.
2. Integration DEFinition for function modeling (IDEF0). Draft Federal Information Processing Standards Publication 183, 1993 December 21. URL: <http://idef.com/wp-content/uploads/2016/02/idef0.pdf>. (дата обращения 19.09.2020 г.)
3. **Карпычев, В.Ю.** Функциональное моделирование (IDEF0) как метод исследования блокчейн-технологии // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – № 4 (123). – 2018.

*Дата поступления
в редакцию: 03.10.2020*

N.G. Labutin, P.V. Kostin, N.U. Shadrunkova

**SIMULATING INFORMATION SECURITY INCIDENT DETECTION
AND RESPONSE PROCESSES**

Federal State Institution of Advanced finance Professional Training
Federal Tax Service Training Institute

Purpose: development of a model designed to help information security specialists (administrators) regulate the detection and investigation of information security incidents in any organization, regardless of the type of information system, its structure, information processing principles.

Methodology: functional modeling of processes and actions of specialists when identifying and investigating information security incidents using the methodology of SADT/IDEF0

Value: the model of information security incident detection and investigation processes developed by the authors of the article can be used to develop the rules of these processes in any information system.

Research implications: modeling of actions of officials in the detection and investigation of information security incidents can be continued with more detail and specificity.

Key words: information security incident, process modeling, IDEF0 methodology, information security incident detection, information security incident investigation.

УДК 519.688

DOI: 10.46960/1810-210X_2020_4_26

А.Д. Леушкин, Е.А. Неймарк

КВАДРАТИЧНАЯ ЗАДАЧА О НАЗНАЧЕНИИ. ОБЗОР МЕТОДОВ, ГЕНЕРАЦИЯ ТЕСТОВЫХ ЗАДАЧ С АПРИОРНО ИЗВЕСТНЫМ ОПТИМУМОМ

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

Рассматривается подход к решению задачи оптимизации работы в системе конвейерного типа на основе метода ветвления и связывания с целью уменьшения затрат на вычислительные потери без потери оптимального решения. Рассмотрен без доказательства алгоритм построения задачи с априорным оптимальным решением, на его основе проведен эксперимент по получению и последующему решению задачи с априорно известным оптимумом для сравнения с апостериорным оптимумом. С помощью разработанного алгоритма получено решение тестовых задач. Показано, что априорно заданный оптимум является близким к глобальному оптимуму задачи. В большинстве случаев перестановка, построенная алгоритмом, может быть усовершенствована. Для генерации тестовых задач реализован генератор Палубецкиса, проведен эксперимент по его верификации при помощи локальной оптимизации.

Ключевые слова: комбинаторные задачи, задача квадратичного назначения, оптимизация, локальный поиск, генерация тестовых задач.

Введение

Основной целью настоящей работы является рассмотрение основ квадратичной задачи назначения (далее КЗН), ее постановки, вычислительной сложности, основных методов решения. Также рассмотрен алгоритм для построения тестовой задачи с априорно известным оптимальным решением. Заранее известно, что данная задача относится к классу задач комбинаторной оптимизации, поэтому достаточно удобно реализовывать программные комплексы для решения переборными методами. Наличие активности по данной теме на популярных академических площадках показывает, что данные исследования являются актуальным [1-3].

Общая постановка

В соответствии с формулировкой, представленной Купмансом и Бекманом [4], имеется набор из N объектов и N локаций для их размещения, для этого набора определены:

- матрица $C : N \times N$, состоящая из элементов c_{ij} -стоимостей расположения i -ого объекта в j -ой локации;
- матрица $F : N \times N$, состоящая из элементов $\begin{cases} f_{ij}, \text{ при } i \neq j, j = 1, \dots, N \\ 0, \text{ при } i = j \end{cases}$, характеризующих количество ресурсов к транспортировке из i -ого в j -ый объект;
- матрица $D : N \times N$, состоящая из элементов $\begin{cases} d_{ij}, \text{ при } i \neq j, j = 1, \dots, N \\ 0, \text{ при } i = j \end{cases}$, характеризующих стоимость транспортировки единицы ресурса из i -ой в j -ую локацию.

Тогда полная стоимость транспортировки ресурса из i -ого объекта в j -й выглядит как произведение $(f_{ij} \cdot d_{lk})$, где l – расположение i -ого объекта в пространстве локаций, а k – расположение j -ого объекта в пространстве локаций.

Зададим некоторую перестановку в виде вектора $P_N = (p_1, p_2, \dots, p_N)$, $p_i \in \mathbb{N}$ – соответствует назначению в i -ую локацию некоторого объекта.

Просуммируем все транспортировки между объектами, расположенными в локациях соответственно перестановке P_N , и добавим к этому стоимость расположения объектов в этих локациях при перестановке P_N . Получим полную стоимость для работы всех объектов при перестановке P_N . Необходимо найти такое назначение всех объектов на локацию, чтобы эта сумма была минимальной. В прикладном смысле решение этой задачи будет являться наименьшим размером издержек.

$$\min_{p \in P_N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f_{ij} \cdot d_{p_i p_j} + \sum_{j=1}^N c_{i p_j} \quad (1)$$

Математическая модель

На основе постановки задачи построим математическую модель [5]. Мы можем представить варьируемый параметр, являющийся перестановкой P_N , как некоторую матрицу $X : N \times N$, состоящую из элементов x_{ij} , при этом она должна гарантировать, что каждый объект назначен только на одну локацию (2) и каждая локация назначена только один объект (3).

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} = 1, i = 1, \dots, N \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N x_{ij} = 1, j = 1, \dots, N \quad (3)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (4)$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } p_i = j \text{ (объект } i \text{ расположен в локации } j) \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad i, j = 1, \dots, N$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N f_{ij} \cdot d_k \cdot x_{ik} \cdot x_{jl} + \sum_{i,j=1}^N c_{ij} \cdot x_{ij} \Rightarrow \min \quad (5)$$

Тогда наименьшее значение критерия (5) при выполнении ограничений (2), (3) и (4) будет достигаться с некоторой матрицей X , которая соответствует оптимальной перестановке P_N . При данной постановке явно видно, что критерий зависит как от расположения истока, так и от расположения стока потока ресурсов. В общей постановке (1) этот факт отображается в сложности индексов при суммировании.

Вычислительная сложность

В 1976 г. Sahni and Gonzalez показали NP-полноту [6]. Определение сложности задачи показало несостоятельность поиска алгоритма для нахождения оптимального решения задачи за полиномиальное время. Было также показано, что поиск ε -оптимального решения также является NP-полным. Зная это, можно назвать задачу «сложнейшей из сложных» [7]. Легко убедиться в NP-полноте проблемы, поскольку к ней можно свести другие известные NP-полные проблемы [5].

- Задача о коммивояжере: матрица F строится в соответствии с расстояниями между пунктами задачи коммивояжера; матрица D строится как матрица смежности задачи коммивояжера. Тогда оптимальная перестановка КЗН будет являться оптимальным циклом обхода для исходной задачи о коммивояжере.
- Задача о максимальной клике: для поиска клики размера k необходимо чтоб матрица F формировалась как матрица смежности графа исходной задачи; матрица D строится как матрица смежности клики размера k . Тогда максимальная клика может быть

найдена решением набора из N КЗН, каждое из этих решений будет являться кликой размера k ($1 \leq k \leq N$) если она существует в исходном графе.

Возможность полиномиального решения задачи

В прошлом пункте было показана NP-полнота проблемы в общем случае, но существуют примеры входных данных, когда возможно получение решения за полиномиальное время. Одно из таких решений описали Cristofides и Gerrard [8]. Они показали, что если матрицы D и F являются взвешенными матрицами смежности, описывающие граф типа-дерево, то проблема может быть разрешена с помощью динамического программирования за полиномиальное время. Условие является необходимым, и, если хотя бы одна из матриц под него не подходит, то задача превращается вновь в NP-полную.

Также существуют возможности решения за полиномиальное время задач, в обе матрицы являются матрицами смежности последовательно-параллельных графов, не содержащих двураздельный граф $K_{2,2}$.

Обзор методов решения

Как известно, для NP-трудных задач найти полиномиальный алгоритм нахождения оптимального решения не представляется возможным. Поэтому для нахождения решения используют разнообразные методики динамического программирования и техники «ветвей и границ».

Точные методы. Метод ветвей и границ

Наиболее эффективной себя показала техника ветвей и границ. Для решения КЗН наиболее используемыми являются три алгоритма [5, 9].

1. Алгоритм одиночного назначения (на каждом листе дерева поиска «ветвей и границ» объект назначается на одну локацию).
2. Алгоритм парного назначения (на каждом листе дерева поиска «ветвей и границ» фиксированная пара объектов назначается на пару локаций).
3. Алгоритм взаимной позиции (уровень дерева поиска «ветвей и границ» не соответствует назначению объекта на локацию. Частичная перестановка на каждом уровне определена с точки зрения дистанции между объектами).

Все три алгоритма объединяет то, что они начинаются с пустой перестановки и в конце гарантированно получается некоторая перестановка, являющаяся решением задачи. На практике же алгоритм одиночного назначения оказался наилучшим. Алгоритм парного назначения показал себя неэффективным в вычислении, а алгоритм взаимной позиции подходит в основном для проблем с разреженными матрицами. В методе «ветвей и границ» главным критерием для применения к задачам комбинаторной оптимизации является нижняя граница. Она будет отчетливо видна поэтому ее легко вычислить. Рассмотрим наиболее ранний метод определения нижней границы КЗН.

Граница Гилмора-Лоулера

Для вычисления границы Гилмора-Лоулера используется [5, 9] минимальный вектор продукции $\langle x, y \rangle_- = \min_{P \in \Pi} \langle x, Py \rangle$ и максимальный вектор продукции $\langle x, y \rangle_+ = \max_{P \in \Pi} \langle x, Py \rangle$.

В результате вычислений $\langle x, y \rangle_-$ могут быть получены продукции из x^+ – содержит возрастающие компоненты x_i и y^- содержит убывающие компоненты y_i . Обозначим $f_i, d_i, i = 1, \dots, N$ – вектора матриц F и D соответственно. Тогда \hat{f}_i, \hat{d}_i – векторы, состоящие из $(n-1)$ компонент f_i, d_i т.е. без компонент f_{ii}, d_{ii} .

Составим матрицу L состоящую из $l_{ij}=f_{ij}d_{ij} + \langle \hat{f}_i, \hat{d}_j \rangle$, $i, j = 1, \dots, N$. Получим определение границы Гилмора-Лоулера для КЗН с значениями F и D как линейную задачу о назначении:

$$GLB(F, D) = \min_{P \in \Pi} \sum_{j=1}^N l_{i p(j)} = LAP(L) \quad (6)$$

Граница, основанная на собственных числах

Данный метод [5, 9] основывается на собственных значениях входных матриц потока F и стоимости D . Из-за итеративности процесса поиска собственных чисел вычислительная сложность сильно повышается с увеличением размерности, что затрудняет построение границ в большинстве случаев.

Граница, основанная на переформулировании

Еще один итеративный метод, не отличающийся эффективностью [5]. Каждую итерацию решается $(n^2 + 1)$ линейных задач назначения размерности n .

Субоптимальные алгоритмы

Алгоритмы, направленные на получение некоторого решения. В отличие от «точных методов», наиболее часто такие алгоритмы основаны на стохастических принципах и могут с некоторой вероятностью сойтись в глобальном оптимуме. Существует большое количество разновидностей получения субоптимального решения, рассмотрим концепции наиболее распространенных из этих алгоритмов.

Метод ограниченного перечисления

Перебор всех перестановок для нахождения оптимального решения КЗН для задач с размерностью, превышающей отметку в 15 локаций (и объектов), занимает чересчур много времени. Поэтому существует множество механизмов ограничения перебора. Одним из наиболее простых способов является явное ограничение времени процесса [5] поиска. В этом случае поиск заканчивается строго в назначенное время и лучшим решением считается достигнутое до окончания поиска. Также можно рассматривать случаи, в которых найденное решение некоторое время не получало улучшений. Тогда верхняя граница опускается несколько ниже, что уменьшает дерево возможного перебора и увеличивает скорость перебора, хотя и есть возможность потерь некоторых решений. Это нивелируется за счет предположения, что оптимальное и около-оптимальное решение в КЗН отличаются незначительно.

Метод улучшения

Основные эвристические методы для КЗН – это методы улучшения [5]. Они начинают работу с некоторого решения и дерева возможных перестановок и в процессе работы пытаются улучшить решение.

Локальный поиск (LSA)

Итерационный алгоритм улучшения решения [5], т.е., на каждом шаге выбирается наилучшее решение из допустимой окрестности. Для КЗН хорошо подходит метод, при котором в решении перебираются решения от изменения позиций всех возможных пар элементов решения и для следующего шага выбирается наилучший. Алгоритм заканчивает работу в местах локального оптимума – случаях, когда ни одна перестановка не улучшает критерий для решения.

Табу-поиск

Табу-поиск [5] – это техника для преодоления локальной оптимальности в комбинационном поиске. Фундаментальная идея заключается в ограничении направления поиска на каждом шаге для получения наибольшего качества решения с наибольшей эффективностью.

Метод отжига

Является рандомизированным методом локального поиска [5], позволяющего избежать плохих локальных оптимумов. Исходит из моделирования физического процесса отжига. Благодаря подражанию процессам, происходящим с веществом при постепенном охлаждении есть возможность поучать сравнительно хорошие решения, являющиеся локальным оптимумом. Для алгоритма имитации отжига доказана асимптотическая сходимость к глобальному оптимуму что делает его привлекательным для использования.

Генетический алгоритм

Генетический алгоритм является стохастическим методом [5], который основывается на естественных свойствах существ к адаптации в природе и принципах естественного отбора. Использование генетических операторов и определенной стратегии мы получим улучшение приспособленности популяции и в итоге кодировка особи с наилучшей приспособленностью будет являться решением задачи. Для эффективного использования рекомендуется использование параллельных вычислений.

Муравьиная система

Муравьиная система [10] – это эволюционный алгоритм поиска, основанный на популяционных схемах строящихся на поведении муравьев в природе. Базовой идеей является принцип взаимодействия муравьев при построении кратчайшего пути от муравейника до цели. Это взаимодействие происходит в некоторой среде с помощью определенного химического соединения – феромона, оставляемого на земле каждой особью. Кратчайшим путем будет считаться тот, на котором феромона было оставлено наибольшее количество, что соответствует наибольшему количеству муравьев, следующих этому маршруту. Таким образом, феромон выступает в роли памяти системы, которая указывает на наличие ранее построенного «хорошего» решения, что можно использовать и для решения КЗН.

Жадный рандомизированный адаптивный поиск (GRASP)

GRASP – техника итеративного рандомизированного отбора [5], каждая итерация которого обеспечивает приближенное к оптимальному решение проблемы. При этом наилучшее решение из всех проделанных итераций сохраняется как финальное. Алгоритм состоит из двух шагов.

1. Конструкция первичного решения некоторой стохастической функцией.
2. Использование техники локального поиска над построенным решением в надежде его улучшения.

В рамках КЗН GRASP в сочетании с методом ветвей и границ позволил получить оптимальное или близкое к оптимальному решение для большинства задач КЗН.

Генерация тестовых задач

В парадигме вычислительной оптимизации генерация тестовых задач является важной частью. Эффективность алгоритма определяется совокупностью следующих критериев [5]: точность решения, скорость алгоритма, универсальность алгоритма в рамках данного класса задач. Для большинства трудных задач существующая теоретическая база не может обеспечить измерение критериев для оценки алгоритма. Поэтому необходимо иметь инструментарий по получению стандартизированных данных и получению решения, следуя конкретному алгоритму для последующей работы над алгоритмами.

Эволюцию и тестирование алгоритма удобнее реализовывать при наличии конкретных задач с заведомо известным оптимальным решением. Используя такую задачу, мы имеем возможность как получать необходимые данные о конкретном алгоритме, так и сравнивать несколько алгоритмов между собой. В рамках КЗН не всегда удается определить оптимум для задачи большой размерности, что приводит к неточностям при оценке алгоритмов. Наиболее доступным методом решения этой проблемы является построение задачи по некоторому принципу, позволяющему знать оптимальное решение до проведения эксперимента.

Генератор Палубецкиса

Один из первых методов конструирования тестовой задачи с известным решением предложил Г.С. Палубецкис [11]. Предполагается что матрица D строится из решеточного графа. На вход: N – размерность задачи, ω – параметр для инициализации F , $z < \omega$ – верхний предел для случайных чисел

Вывод: матрицы F и D и оптимальная перестановка p^* .

Алгоритм следующий.

1. Конструируем матрицу $D = \|d_{ij}\|$, элементы которой являются длиной пути между двумя вершинами (расстояние между соседними вершинами = 1) двумерного сеточного графа размером $r \times s$, $r \cdot s = N$.

2. Определяем $\omega = (\omega_{ij})$, $\omega_{ij} = \omega$ и вычислить $g_{ij} = 2 - d_{ij}$, $j = \overline{1, N}$.

3. Находим пару (l, m) такую, что $d_{lm} = \max_{i,j} \{d_{ij}\}$ и $g_{lm} \leq 0$.

Если необходимая пара не найдена, то переходим к шагу (5).

4. Случайно выбираем k так, что получим один из кратчайших путей от l до m ($|d_{lk} - d_{mk}| \leq 1$); случайно выбираем $\Delta \in [0, z < \omega]$.
 $\omega_{lm} = \Delta$, $\omega_{lk} = \omega_{lk} + (\omega - \Delta)$, $\omega_{mk} = \omega_{mk} + (\omega - \Delta)$, $g_{lm} = g_{lk} = g_{mk} = 1$.

Возвращаемся к шагу (3).

5. Генерируем случайную перестановку $p^* = p^*(i)$, $i = \overline{1, N}$; формируем матрицу $F = \|f_{ij}\|$, в которой $f_{ij} = \omega_{uv}$, где $i = p^*(u)$ и $j = p^*(v)$.

6. Возвращаем F , D и p^* .

Алгоритм позволяет получить задачу и перестановку к ней. Значение критерия этой перестановки будет находиться достаточно близко к оптимальному.

Применение генератора

Сгенерируем задачи разной размерности (6, 10, 16, 20, 26, 30) с фиксированными параметрами и проверим, можно ли улучшить решение с помощью алгоритма локальной оптимизации. Результаты оформим в виде табл. 1 и табл. 2. Сгенерируем задачи с параметрами: $\omega = 1, z = 0$.

Таблица 1

Генерация тестов разной размерности с параметрами: $\omega = 1, z = 0$.

| Размерность | Априорное решение | После локальной оптимизацией | Количество шагов локальной оптимизации | Среднее значение при случайной перестановке |
|-------------|-------------------|------------------------------|--|---|
| 6 | 54 | 54 | 1 | 68,56 |
| 10 | 232 | 232 | 1 | 301,78 |
| 16 | 796 | 788 | 3 | 933,2 |
| 20 | 1480 | 1426 | 8 | 1657,7 |
| 26 | 3662 | 3634 | 5 | 4982,72 |
| 30 | 4244 | 4114 | 12 | 4777,9 |

Сгенерируем задачи с параметрами: $\omega = 9, z = 3$.

Таблица 2

Генерация тестов разной размерности с параметрами: $\omega = 9, z = 3$.

| Размерность | Априорное решение | После локальной оптимизацией | Количество шагов локальной оптимизации | Среднее значение при случайной перестановке |
|-------------|-------------------|------------------------------|--|---|
| 6 | 480 | 480 | 1 | 582,08 |
| 10 | 2118 | 2034 | 3 | 2529,6 |
| 16 | 7024 | 6862 | 6 | 8002,5 |
| 20 | 12648 | 12180 | 6 | 14311,02 |
| 26 | 32248 | 31768 | 11 | 43093,32 |
| 30 | 36642 | 35936 | 11 | 41185,94 |

Примечание: первый шаг в алгоритме локальной оптимизации означает, что лучших перестановок не было найдено; среднее значение при случайной перестановке берется как среднее за 100 случайных перестановок.

Прослеживается некоторое отдаление априорного оптимума от оптимума локальной оптимизации при увеличении размерности задачи.

С увеличением параметра ω – увеличивается матрица цен F и соответственно значение итогового критерия. Параметр z влияет случайные процессы и соответственно на вариативность генерации задач.

Вычислительный эксперимент

Попробуем найти решение КЗН с помощью одного из перечисленных методов. Для простоты реализации используем метод локального поиска, для начала работы с которым необходима некоторая перестановка. Попробуем применить метод для случайной перестановки. Будем искать решение для задач, полученных при помощи генератора Палубецкиса. Для усреднения значений отклонения от оптимума при случайном построении исходной перестановки будем использовать 10 запусков для каждой задачи из списка. Полученные результаты оформим в виде таблиц (табл. 3, табл. 4), за оптимум примем значение, полученное после улучшения априорного решения из генерации:

Таблица 3

Результаты вычислительного эксперимента для задач с параметрами: $\omega = 1, z = 0$.

| Размерность задачи, $\omega = 1 \ z = 0$ | Оптимум | Среднее количество шагов алгоритма | Диапазон получаемых значений (min-max) | Медианное значение |
|---|---------|---------------------------------------|--|-----------------------|
| 6 | 54 | 3.5 | 54-60 | 55 |
| 10 | 232 | 5 | 232-256 | 243 |
| 16 | 788 | 10 | 790-810 | 800 |
| 20 | 1426 | 12 | 1436-1466 | 1452 |
| 26 | 3634 | 23 | 3610-3634 | 3623 |
| 30 | 4114 | 24 | 4100-4190 | 4145 |

Таблица 4

Результаты вычислительного эксперимента для задач с параметрами: $\omega = 9, z = 3$

| Размерность задачи, $\omega = 9 \ z = 3$ | Оптимум | Среднее количество шагов алгоритма | Диапазон получаемых значений (min-max) | Медианное значение |
|---|---------|---------------------------------------|--|-----------------------|
| 6 | 480 | 3.5 | 480-500 | 486 |
| 10 | 2034 | 6 | 2046-2236 | 2100 |
| 16 | 6862 | 10 | 6854-7046 | 6924 |
| 20 | 12180 | 16 | 12196-12574 | 12372 |
| 26 | 31768 | 24 | 31648-31768 | 31681 |
| 30 | 35936 | 25 | 35940-36472 | 36164 |

Примечание: За шаг алгоритма принимался переход от одной перестановки к другой после перебора возможных улучшений.

Поиск оптимума с помощью локальной оптимизации достигает априорного значения из сгенерированной задачи.

Программная система

Программа реализована на языке NetCore 3.1 C#. Среда разработки Microsoft Visual Studio 19. Структура файла данных представляет: размерность задачи, матрицы F , D опционально C .

Система позволяет:

- 1) решать задачу, импортированную из текстового файла;
- 2) генерировать задачу по алгоритму из п.3.;
- 3) экспортировать данные задачи в текстовый файл;
- 4) находить решение с помощью алгоритма локального поиска.

Выводы

Рассмотрена область задач комбинаторного типа. Выделена и локализована задача квадратичного назначения, которая в силу отсутствия аналитического метода нахождения оптимального решения является достаточно привлекательной для решения эвристиками. Экспериментально подтверждено, что разница между глобальным и локальным оптимумами незначительна. Для корректного оценивания алгоритма был реализован метод конструирования задач с априорным оптимумом.

Библиографический список

1. **Hameed, A.** A new hybrid approach based on discrete differential evolution algorithm to enhancement solutions of quadratic assignment problem / A. Hameed, B. Aboobaider, M. Mutar & N. Choon // International Journal of Industrial Engineering Computations. – 2020. – 11(1). – P 51-72.
2. **Xiang, Rui** Efficient and Robust Shape Correspondence via Sparsity-Enforced Quadratic Assignment / Rui Xiang, Lai Rongjie, Zhao Hongkai // arXiv preprint arXiv:2003.08680, 2020.
3. **Singh, Nirmal Jeet** Simulation and analysis of quadratic assignment problems (QAP) using ant colony optimization / Nirmal Jeet Singh, S.R. Mediratta // Arya Bhatta Journal of Mathematics and Informatics 12.1, 2020. – P. 25-30.
4. **Koopmans, T.C.** Assignment problems and the location of economic activities / T.C. Koopmans, M.: Beckman // Econometric. – 1957. – № 25. – P. 53-76.
5. **Panos, M.P.** The Quadratic Assignment Problem: A Survey and Recent Developments / M.P. Panos, Franz Rendl. Henry Wolkwicz, 1994.
6. **Sahni, S.** P-complete Approximation Problems / S. Sahni, T. Gonzalez // Journal of the ACM 23, 1976. – P. 555-565.
7. **Clayton, W.** Commander. Survey of the Quadratic Assignment Problem, with Applications / W.Clayton. – Darmstadt University of North Carolina at Chapel Hill, 2005.
8. **Christofides, N.** Special cases of the quadratic assignment problem / N. Christofides, M. Gerrard // Management Science Research Report 391, Carnegie Mellon University, April 1976.
9. **Li, Y.** Lower Bounds for ThequadraticAssignment Problem / Y. Li, P.M. Pardalos, K.G. Ramakrishnan, M.G.C. Resende, 1994.
10. Stützle T. MAX-MIN ant system for quadratic assignment problems / T. Stützle // Research Report AIDA-97-04, Department of Computer Science, Darmstadt University of Technology, Germany, 1997.
11. **Palubetskis G.S.** A generator of test quadratic assignment problems with known optimal solution / G.S. Palubetskis, Zh. Vychisl. Mat. Mat.Fiz., 1988, Volume 28, Number 11. – P. 1740-1743.

Дата поступления

в редакцию: 03.07.2020

A.D. Leushkin, E.A. Neumark

**THE QUADRATIC ASSIGNMENT PROBLEM. METHODS OVERVIEW,
GENERATION TEST PROBLEM WITH KNOWN OPTIMAL SOLUTION**

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

Purpose: The article is devoted to the consideration of the quadratic assignment problem. A canonical formulation of the problem is given; some methods for obtaining a solution are surveyed.

Approach: An algorithm for constructing a problem with an a priori optimal solution is considered without proof; on its basis, an experiment was conducted to obtain and subsequently solve a problem with an a priori known optimum for comparison with an a posteriori optimum.

Results: We got some test problems using the above algorithm, compared the a priori optimum with the optimum obtained by the local search method. It was shown that the a priori solution has a strong advantage over random permutations.

Originality/value: The Palubetskis generator was implemented in order to generate test problems, it was verified using local optimization.

Key words: combination problem, quadratic assignment problem, optimization, local search, test problem generation.

УДК 519.688

DOI: 10.46960/1810-210X_2020_4_35

Н.В. Тарасова

**ОСОБЕННОСТИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ВСПЛЫТИЯ ТВЕРДЫХ СФЕР И ВОЗДУШНЫХ ПУЗЫРЬКОВ**Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики

Дано подробное описание моделей, используемых для численного моделирования всплытия одиночных твердых сфер и воздушных пузырьков, приведены их особенности. Осуществляется анализ точности применяемых методов, проводятся исследования на сеточную сходимость и сеточную диффузию для задач всплытия одиночного пузырька воздуха или одиночной твердой сферы. Определяется оптимальный размер счетной области и оценивается точность приближения величин на интерфейсах перекрывающихся сеток. Целью исследования является анализ точности и доказательства достоверности получаемых с помощью такого подхода результатов.

Ключевые слова: неструктурированные сетки, сетки типа «Химера», сеточная сходимость, численная диссипация, метод интерполяции.

Введение

На протяжении последних десятилетий значительное внимание уделяется изучению движения одиночных пузырьков и твердых сфер в жидкости в поле силы тяжести [1-6]. Широкое поле исследований связано с многообразием режимов движения и большим диапазоном изменения возможных характерных параметров. Такие работы интересны как с точки зрения фундаментальной науки, так и в рамках начального базового этапа исследований для дальнейшего практического применения. Пузырьковые течения играют основную роль в процессах кавитации, барботажа, флотации полезных ископаемых, седиментации и др. Движение твердых частиц (в том числе, и сфер) является классической задачей механики сплошных сред с приложением к различным природным явлениям и техническим процессам (например, движение катализатора в химических реакторах, осаждение или восхождение дисперсных частиц в атмосфере, секвестирование углерода и т.д.)

В связи с трудностью создания идеальных условий и осуществления точных измерений в натурных экспериментах и одновременным наращиванием вычислительных мощностей и развитием численных методов в последние годы наиболее распространенным инструментом исследований становится численное моделирование. Оно позволяет проводить всесторонний анализ явлений, обеспечивает детальную визуализацию, дает возможность проводить точные измерения без затрат на оборудование.

Наращивание вычислительных мощностей в последние годы позволило применять новые более точные численные методы. В частности, всплытие одиночного пузырька воздуха или твердой сферы можно смоделировать в обозримые сроки с помощью методов прямого численного моделирования. Такой подход заключается в решении системы уравнений Навье-Стокса, записанной для двухфазной среды в трехмерной постановке, с учетом модели поверхностного натяжения [2, 7]. Для отслеживания межфазной границы используется объемный метод VOF [7, 8]. В этом случае, в отличие от феноменологических моделей взаимодействующих континуумов, в которых применяются эмпирические зависимости, взаимодействие фаз на интерфейсах учитывается автоматически в процессе решения.

При применении метода конечных объемов для дискретизации требуется подробное сеточное разрешение в окрестности межфазной границы. Поскольку размеры пузырька и сферы малы по сравнению с необходимой для исследования длиной пробега, для обеспече-

ния достаточного сеточного разрешения и экономии вычислительных ресурсов приходится применять специальные подходы: например, использование подвижных расчетных областей, или сеток с перекрытиями [9]. Особенностью применяемой модели также является учет члена поверхностного натяжения в уравнении сохранения импульсов. Будучи сингулярным, он является потенциальным источником дополнительной неустойчивости при взаимодействии сред с большой разницей в плотности [10]. Важнейшим этапом для установления точности, достоверности и приемлемости применяемых методов для любой модели является валидация. В работах [11-13] были представлены результаты численного моделирования всплытия одиночных пузырьков воздуха и твердых сфер диаметром от 1 до 20 мм в воде. Особое внимание уделялось изучению локальных физических характеристик процесса движения.

В данной работе подробно описываются используемые при моделировании модели и их особенности. Осуществляется анализ точности применяемых методов, проводятся исследования на сеточную сходимость и сеточную диффузию для задач всплытия одиночного пузырька воздуха или одиночной твердой сферы. Определяется оптимальный размер счетной области и оценивается точность приближения величин на интерфейсах перекрывающихся сеток. Все эти исследования позволяют убедиться в достоверности получаемых с помощью такого подхода результатов при решении задач о всплытии одиночных твердых сфер и пузырьков.

Физико-математическая модель и численные методы

Для численного исследования всплытия одиночных пузырьков и твердых сфер решается система уравнений Навье-Стокса [14, 15], дополненная уравнениями переноса объемной доли. Данная система в консервативной форме, в декартовых координатах, имеет вид (1):

$$\begin{cases} \operatorname{div}(\vec{u}) = 0, \\ \frac{\partial(\rho\vec{u})}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho\vec{u} \otimes \vec{u}) = -\nabla p + \operatorname{div} \mathbf{T} + \rho\vec{g} + \int_S \sigma'_i n' \delta(x - x') dS, \\ \frac{\partial\alpha_i}{\partial t} + \vec{u} \nabla \alpha_i = 0. \end{cases} \quad (1)$$

$$\tau_{ij} = \mu \left(2s_{ij} - \delta_{ij} \frac{2}{3} \operatorname{div} \vec{u} \right), \quad s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad i, j = 1, 2, 3.$$

Здесь ρ , \vec{u} , p , t – плотность, скорость, давление и время, соответственно, \mathbf{T} – тензор вязких напряжений, \vec{g} – вектор ускорения свободного падения, μ – ламинарная вязкость. α_i – концентрация i -го вещества, σ – коэффициент поверхностного натяжения, которые появляются в случае рассмотрения всплытия газообразных пузырьков.

Предполагается, что фазы несжимаемы. Последний член в правой части уравнения сохранения импульса описывает действие сил поверхностного натяжения. В качестве дискретной модели для реализации этих сил используется модель непрерывной поверхностной силы (CFS) [10]. В этой модели эффект поверхностного натяжения рассматривается как дополнительная объемная сила, сконцентрированная на интерфейсе: $\int_{S(t)} \sigma'_i n' \delta(x - x') dS \approx \sigma k \nabla \alpha_i$,

Кривизна поверхности вычисляется на основе локальных градиентов в поверхности по нормали к интерфейсу: $k = -\nabla \cdot (\nabla \alpha_i / |\nabla \alpha_i|)$. Тангенциальной компонентой силы пренебрегают. Коэффициент поверхностного натяжения σ вдоль поверхности раздела фаз не меняется.

В случае всплытия воздушного пузырька для возможности проведения расчетов в трехмерной постановке в обозримые сроки даже с использованием суперкомпьютерных мощностей (сотни вычислительных ядер) в условиях подробного сеточного разрешения при-

ходится использовать подвижную область. Пузырек окружается сеткой, которая движется вместе с ним в соответствии с движением центра масс пузырька. На границах подвижной области задаются граничные условия, обеспечивающие свободное протекание потока воды. При этом исходные уравнения модифицируются согласно следующему дифференциальному

$$\text{тождеству: } \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega(t)} \varphi dV = \int_{\Omega(t)} \frac{\partial \varphi}{\partial t} dV + \int_{\partial \Omega(t)/\partial t} \varphi \dot{x} \cdot \vec{n} dS,$$

где $\varphi = \rho, \rho u, \alpha_i$, \dot{x} – скорости перемещения центра масс пузырька.

Для описания движения твердой сферы в жидкости используется модель твердого тела (2):

$$\sum_{i=1}^N \vec{F}_i = m \frac{d\vec{V}}{dt}, \quad \sum_{i=1}^P \vec{M}_i = T \frac{d\vec{\omega}}{dt} + \vec{\omega} \times T \vec{\omega} \quad (2)$$

здесь m – масса твёрдого тела, \vec{F}_i – сила, действующая на тело, \vec{V} – скорость поступательного движения, \vec{M}_i – момент, действующий на тело, $\vec{\omega}$ – угловая скорость, T – тензор моментов инерции.

При этом множество \vec{F}_i включает в себя как внешние силы, так и внутренние гидродинамические силы, определяемые самой системой жидкость/твердое тело. В качестве внешней силы выступает сила тяжести. Равнодействующая гидродинамических сил вычисляется на каждом расчетном шаге в процессе решения и включает силу давления (F_p) и силу трения (F_τ) (3):

$$\vec{F} = \vec{F}_p + \vec{F}_\tau, \quad \vec{F}_p = \int p \vec{n} dS, \quad \vec{F}_\tau = \int \mu \frac{\partial u_\tau}{\partial n} dS, \quad (3)$$

здесь \vec{n} – внешняя нормаль к грани, μ – коэффициент динамической вязкости жидкости, u_τ – тангенциальная компонента скорости, V – объем ячейки интегрирования, S – площадь грани.

Дискретизация системы уравнений (1) осуществляется методом конечных объемов на произвольной неструктурированной сетке, а для её численного решения используется полностью неявный метод [16], основанный на известном алгоритме SIMPLE [14].

Для численного решения методом конечных объемов уравнения переноса величин, входящие в (1), записывают в общей интегральной форме [14, 17] (4):

$$\int_V \frac{\partial}{\partial t} \rho \varphi dV + \oint_S \rho \varphi \vec{u} \vec{n} dS = \oint_S \Gamma_\varphi \vec{n} \nabla \varphi dS + \int_V \Phi dV \quad (4)$$

здесь φ – немая переменная, Γ_φ – коэффициент диффузии или вязкости, или 0 (в случае уравнения непрерывности), Φ – источниковый член, V – контрольный объем, S – поверхность контрольного объема, \vec{n} – нормаль к поверхности.

Значения всех переменных хранятся в центрах контрольных объемов. Одним из ключевых моментов является нахождение значения произвольной величины φ_f на грани f , используя значения в центрах соседних ячеек φ_P и φ_N . Способ вычисления величины на грани определяется выбором соответствующей конвективной схемы [14, 15]. В данной работе при проведении численных экспериментов в основном используются три схемы: UD (противопоточная схема первого порядка), LUD (противопоточная градиентная схема с линейной интерполяцией второго порядка точности) и CD (центрально-разностная схема второго порядка точности) [17].

Простейшей конвективной схемой является противопотоковая схема первого порядка точности UD (Upwind Differencing). Эта схема устойчива на неструктурированных сетках, но обладает большой численной диффузией. Схема LUD подобна схеме UD, но

дополнительно использует реконструкцию величины на грань с линейной интерполяцией. Схема CD (второго порядка точности) обладает наименьшей диссипативной ошибкой, однако неустойчива, и при наличии больших градиентов использование схемы приводит к осцилляциям в поле решения [14,17].

Альтернативой использования вышеперечисленных схем является гибридная схема (схема смешанного дифференцирования), представляющая собой комбинацию устойчивой схемы UD и какой-либо схемы более высокого порядка точности [14, 18,19] (5):

$$\varphi_f = (1-\gamma)\varphi_f^{UD} + \gamma\varphi_f^{CD,LUD}, \quad (5)$$

где $0 \leq \gamma \leq 1$ - коэффициент смешения.

Для многофазных течений очень важно разрешать с нужной точностью окрестность межфазной границы, чтобы граница между фазами не размывалась. Для уменьшения влияния сеточной диффузии необходимо выбирать схемы и методы, обеспечивающие максимально четкое определение интерфейса между фазами. С этой целью для аппроксимации конвективного слагаемого уравнения переноса объемных долей используется схема M-CICSAM [20], относящаяся к классу сжимающих схем высокого разрешения и обеспечивающая сохранение минимально возможной толщины границы раздела сред, а также сохранение формы распределения объемных долей при параллельном переносе и вращении.

При рассмотрении всплытия пузырька воздуха в воде плотности сред воздух-вода различаются примерно в 1000 раз. Различные способы аппроксимации значений плотности на грани ячеек могут давать значения ρ_f , отличающиеся на порядки, оказывая сильное влияние на получаемое решение. Существуют специальные приемы [21, 22] для уменьшения численной неустойчивости, которая может возникнуть в данных случаях, и повышения качества расчетов. Дискретизация, основанная на записи уравнения сохранения импульса в полудивергентной форме, обеспечивает высокое качество решения и его малую чувствительность к способу вычисления плотности на гранях ячеек. Такой прием существенно стабилизирует итеративную процедуру численного решения. В таком случае система (1) записывается в следующем виде (6):

$$\begin{cases} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} - \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} - \rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] \\ \rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j \rho) - u_i \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j \rho) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \\ \frac{\partial \alpha_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i \alpha_k) = -\frac{\alpha_k}{\rho_k} \left(\frac{\partial \rho_k}{\partial t} + u_i \frac{\partial \rho_k}{\partial x_i} \right) \end{cases} \quad (6)$$

Для описания движения твердой сферы используются технология «Химера» [9], подразумевающая построение независимых сеток для различных объектов с последующим объединением в одну общую сетку с перекрытиями. Вся область моделирования в этом случае заполнена «базовой» расчетной сеткой, на которую накладывается и по которой движется сетка, привязанная к твердой сфере. На каждом расчетном шаге эти сетки объединяются в одну общую сетку, представляющую область решения (рис. 1).

Результатом интегрирования уравнений (2) являются новые координаты центра тяжести сферы и новый угол поворота. На основе полученных данных вычисляются перемещение узлов, лежащих на поверхности сферы. Вместе со смещением узлов, принадлежащих поверхности твердого тела, происходит смещение всей сеточной области, привязанной к данной границе.

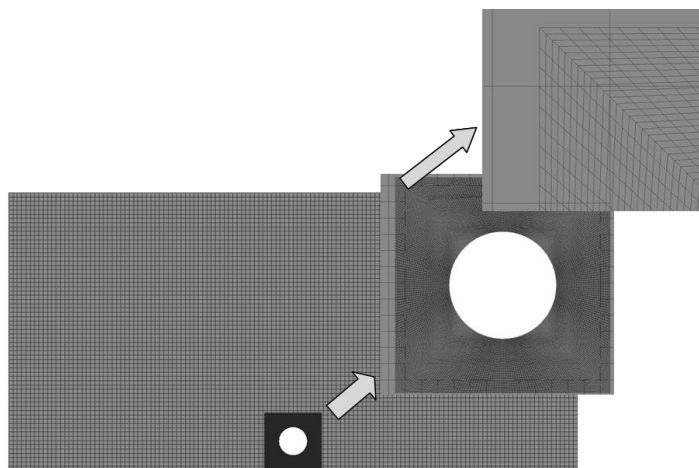


Рис. 1. Расчетная область с выделенной зоной для движущегося объекта

Взаимодействие сеток осуществляется посредством интерполяции величин с ячеек одной сетки на грани другой сетки в местах их наложения. Для этого строится интерполяционный шаблон, определяющий: 1) ячейки, исключенные из счета на данный момент, 2) ячейки доноры, расчетные поля которых используются для передачи информации на грани другой расчетной сетки и 3) грани акцепторы – интерфейсные грани, на которые передается информация с другой расчетной сетки.

Такой подход дает возможность использовать большие расчетные области. Базовая расчетная сетка может быть достаточно грубой, в то время как сетка, привязанная к твердой сфере, имеет более подробное сеточное разрешение. В этом случае нет необходимости в отслеживании границ твердого тела, оно происходит автоматически.

Описанная физико-математическая модель реализована в пакете программ ЛОГОС, предназначенном для решения трехмерных задач аэродинамики и гидродинамики на параллельных ЭВМ [23].

Постановка задачи

В случае всплытия одиночного пузырька рассматривается трехмерная область размерами от $2D$ до $10D$ по каждому пространственному направлению. На границах области задаются граничные условия, обеспечивающие свободное протекание жидкости. Во избежание размытия межфазной границы расчетный шаг выбирается таким образом, чтобы число Куранта составляло величину $CFL \approx 0.5$. Изначально жидкость считается покоящейся, а коэффициент поверхностного натяжения для воды равен 0.0727 Н/м. Начальное давление во всей области равно атмосферному.

При проведении расчетов на двумерной неподвижной сетке для тестирования границ применимости технологии движения сетки расчетная область представляет собой прямоугольник размерами $16D$ на $120D$ (D – диаметр пузырька). Пузырь задан не касающимся стенок, на расстоянии 5 мм от нижней стенки расчетной области. В случае движения твердой сферы внешняя расчетная область представляет собой параллелепипед размерами $20D \times 20D \times 100D$, размеры подвижного региона варьируются от $2D$ до $5D$. На поверхности твердой сферы ставится граничное условие «непроницаемая стенка».

Анализ точности, выбор оптимальных параметров моделирования

Сеточная сходимость

При использовании сеточных методов для моделирования процессов одним из ключевых этапов валидации является исследование сеточной сходимости. Принимая во внимание

изложенные выше особенности используемых моделей (моделирования многофазных сред, учета сил поверхностного натяжения), важно обеспечить достаточное сеточное разрешение, особенно в окрестности межфазной границы.

В случае воздушных пузырьков расчеты на сеточную сходимость проводились на последовательности двумерных неподвижных эйлеровых сгущающихся сеток для пузырька диаметром $d = 5$ мм. Рассматривалось 6 вариантов сеток: с разрешением $N=6, 10, 12, 14, 16$ и 20 ячеек на радиус пузырька. Фрагменты некоторых из них представлены на рис. 2.

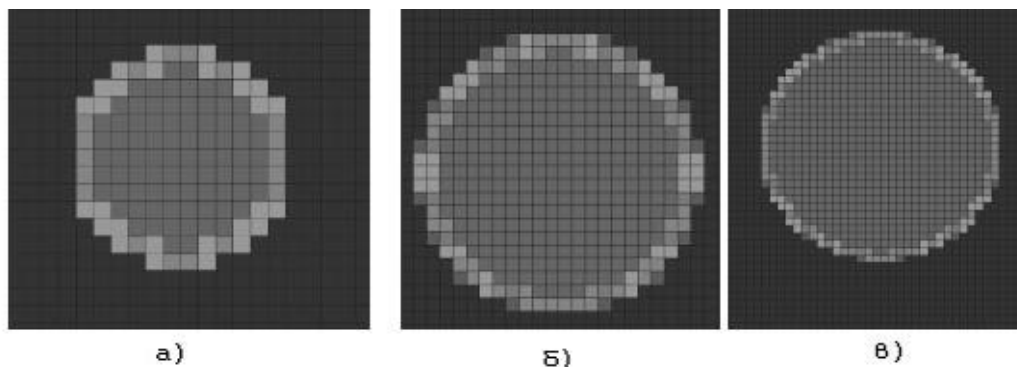


Рис. 2. Фрагменты расчетных сеток в окрестности пузырька:
а) 6 ячеек на радиус пузырька, б) 10 ячеек на радиус, в) 16 ячеек на радиус

Влияние сеточного разрешения на точность решения исследовалось на основе оценки средней скорости всплытия пузырька. Результаты анализа представлены на рис. 3, 4. На рис. 3 отражены графики зависимости средней скорости всплытия пузырька от времени, полученные на последовательности сгущающихся сеток; на рис. 4 – график установления средней скорости всплытия в зависимости от разрешения сетки.

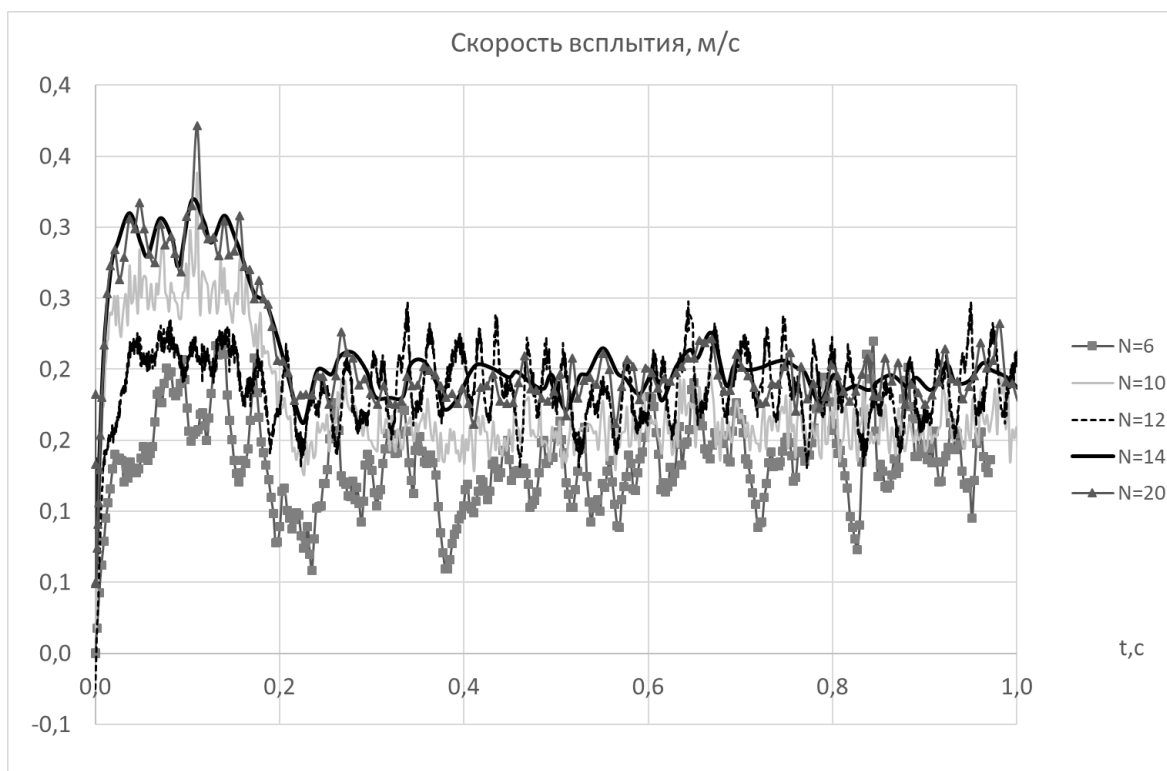


Рис. 3. Динамика изменения средней скорости всплытия пузырька на сетках с разным разрешением

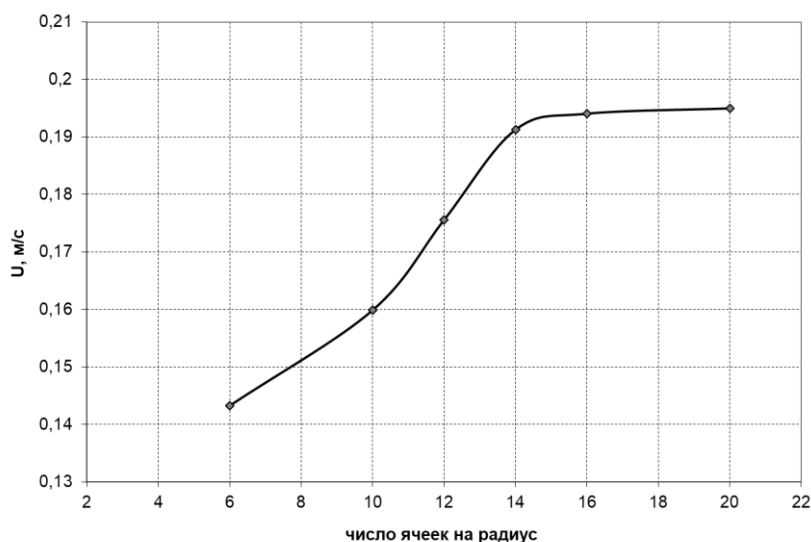


Рис. 4. Средняя скорость всплытия воздушного пузырька в зависимости от сеточного разрешения

Результаты установившегося решения сравнивались с результатами [7]. Видно, что сеточного разрешения 16 ячеек на радиус пузырька достаточно для достижения приемлемой точности. Следует заметить, что средняя скорость всплытия пузырька очень чувствительна к сеточному разрешению, пока оно не становится больше, чем 16 ячеек на радиус пузырька. Однако увеличение разрешения от 16 до 20 ячеек на радиус выражается в изменении средней скорости всплытия не более чем на 1 %. Целесообразно проводить расчеты на сетках с разрешением 16 ячеек на радиус пузырька.

Аналогичные исследования на сеточную сходимость были проведены и для твердых сфер. В условиях использования сеток с перекрытиями сеточное разрешение может быть грубым в областях, расположенных вдалеке от твердого тела, тогда как в его окрестности строится расчетная сетка с подробным разрешением. При этом особое внимание стоит уделять размерам подвижного региона, связанного с твердой сферой.

Рассматривались сетки с разрешением: $N = 5, 10, 25$ и 50 ячеек на радиус сферы в подвижном регионе для сферы диаметром 10 мм. Примеры сеток представлены на рис. 5. Следует отметить, что в качестве характерного размера рассматривается диаметр твердой сферы, тогда как сама сфера моделируется твердым телом, представленным жесткими границами и не содержащим ячеек.

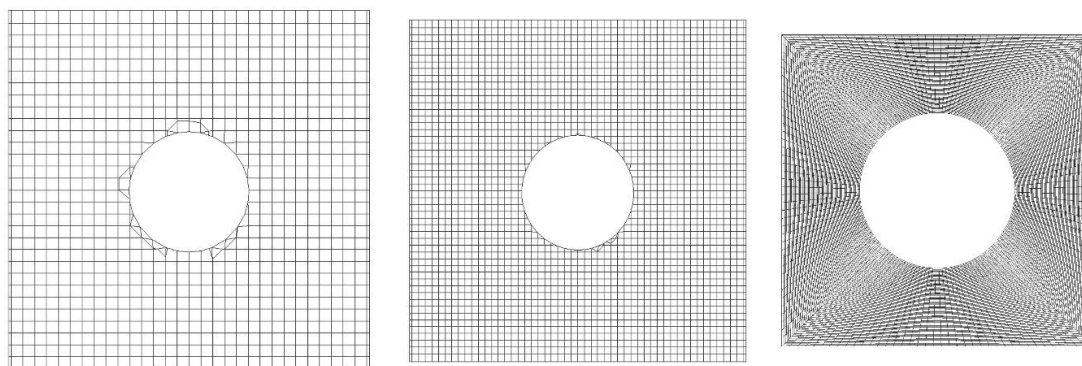


Рис. 5. Фрагменты расчетных сеток в окрестности твердой сферы:
а) 5 ячеек на радиус сферы, б) 10 ячеек на радиус, в) 25 ячеек на радиус сферы

В результате исследований выявлено, что сходимость по средней скорости всплытия наступает уже при разрешении 25 ячеек на радиус сферы (табл. 1).

Таблица 1

Средняя скорость всплытия твердой сферы

| Количество ячеек на радиус сферы | 5 | 10 | 25 | 50 |
|----------------------------------|-----|------|-------|-------|
| \bar{u} (м/с) | 0,2 | 0,27 | 0,283 | 0,285 |

При использовании сеток с перекрытиями точность моделирования в большей степени определяется размерами движущегося региона с подробным сеточным разрешением. При его небольших размерах относительно всей области моделирования можно использовать самые подробные сетки без значительного увеличения размеров всей расчетной сетки. Поэтому при расчетах использовались сетки с разрешением 60 ячеек на радиус сферы.

Сеточная диффузия, численная диссипация

При численном решении задач математической физики с помощью сеточных методов возникают эффекты, связанные с аппроксимационной (схемной) вязкостью, то есть вязкостью, порождаемой структурой разностных схем. Очень важно оценивать ее величину для каждого класса задач. Влияние аппроксимационной вязкости на решение аналогично влиянию физической вязкости. Поэтому необходимо соизмерять эти величины и оценивать численную диссипацию и схемную (сеточную) диффузию. Схемная вязкость должна быть мала по сравнению с физической.

Численные расчеты показывают, что свойства схем особенно проявляются в областях разрывов решения. Исследование схемной вязкости можно проводить на примере решения первой задачи Стокса, имеющей аналитическое решение для вязкой несжимаемой среды, как это сделано в работе [24]. В случае тангенциального разрыва двух плоскопараллельных потоков имеется аналитическое решение для зависимости зоны размазывания скачка скорости от времени, которая выражается формулой Шлихтинга [25] (7):

$$\Delta \approx 8\sqrt{\eta t}, \quad (7)$$

здесь η – кинематическая физическая вязкость.

Рассматривается плоская задача, геометрия которой представляет собой прямоугольник, состоящий из двух равных областей (рис. 6). Потоки в этих областях направлены противоположно друг другу вдоль оси OY и имеют скорость, по модулю равную w . На верхней и нижней границах (BC и AD) задано условие периодичности. Плотность вещества равна 1 кг/м^3 . В расчетах использовалась расчетная сетка с размером ячейки $h = 0,00015$. Этот размер соответствует сеточному разрешению 16 ячеек на радиус пузырька для самого крупного из них.

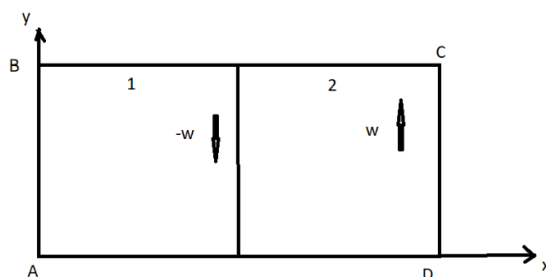


Рис. 6. Начальная геометрия для первой задачи Стокса

В расчетах в стационарной постановке с физической вязкостью $\eta = 10^{-10} \text{ Па}\cdot\text{с}$ размазывания зоны скачка уплотнения не происходило, что соответствует аналитическому решению (7) для невязкой жидкости. При задании физической вязкости $\eta = 0,005 \text{ Па}\cdot\text{с}$ происходит размазывание скачка скорости. Ширина зоны размазывания определялась по ячейкам

расчетной сетки, в которых скорости отличались от скорости основного потока на 1 %. На рис. 7 представлено для примера поле значения скорости на момент времени 9 с.

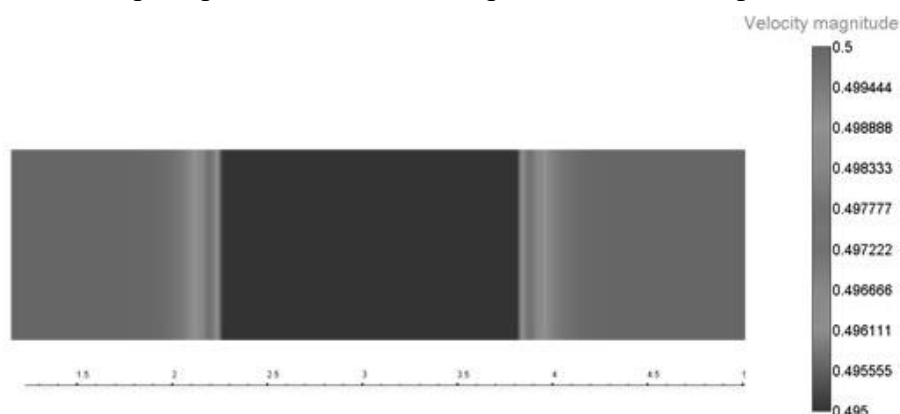


Рис. 7. Поле модуля скорости на $t = 9$ с

На рис. 8 приводится расчетная и аналитическая (7) зависимости ширины зоны Δ от времени. Видно, что расчетная зависимость ширины зоны хорошо согласуется с аналитической зависимостью для данного разрешения сетки.

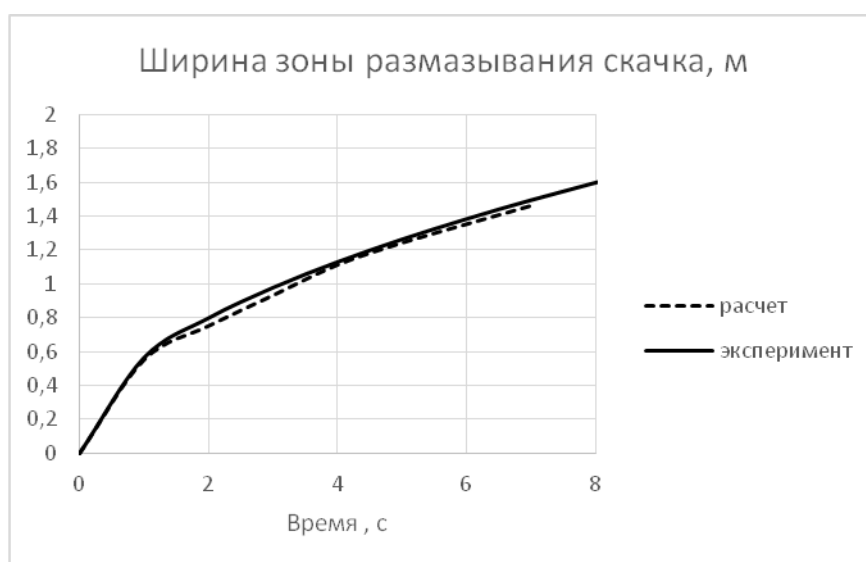


Рис. 8. Задача Стокса. Зависимость ширины зоны Δ от времени (стационарный расчет)

Данные результаты показывают, что для задач в стационарной постановке схемная вязкость для рассматриваемого разрешения близка к нулю. Далее рассматривается эта же задача в нестационарной постановке. В нестационарном случае вся область моделирования движется как одно целое вдоль оси Ox со скоростью $Ux = 1$.

При решении задачи Стокса в случае нулевой физической вязкости с помощью численных методов, имеющих схемную вязкость, должен наблюдаться рост зоны размазывания скачка скорости. В таком случае, пользуясь аналитической зависимостью (7), можно оценить величину схемной вязкости по ширине расчетной зоны размазывания скачка скорости:

$$\eta_c \approx \left(\frac{\Delta_c}{8\sqrt{t}} \right)^2$$

В расчетах на сетках с характерным размером счетной ячейки $h = 0,00015$ (что соответствует самому большому размеру ячейки при разрешении 16 ячеек на радиус пузырька)

с пренебрежимо малой физической вязкостью флюидов, равной 10^{-10} Па*с, вычисленный коэффициент схемной вязкости оказался порядка 10^{-5} .

Влияние схемной вязкости на результаты расчетов исследовано для расчета в нестационарной постановке с физической вязкостью $\eta = 0.001$ Па*с. На рис. 9 приведена расчетная зависимость ширины зоны Δ от времени для численного расчета на сетке с $h = 0,00015$ и аналитическая зависимость (7).

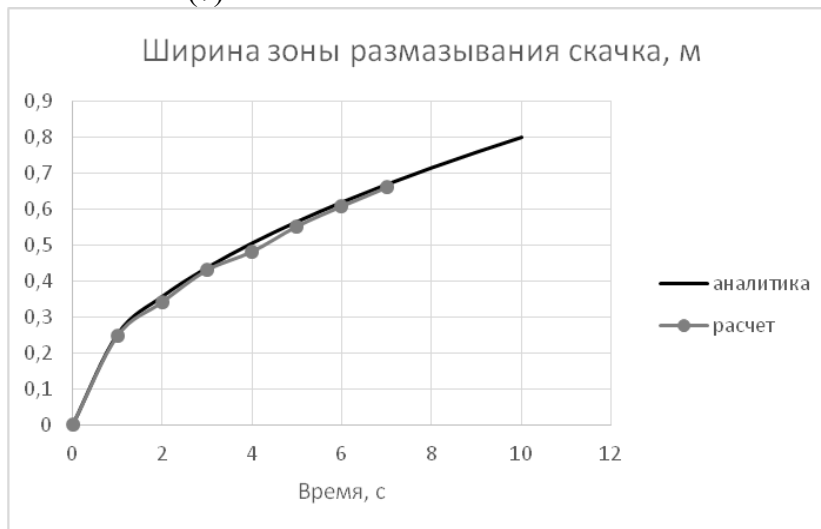


Рис. 9. Задача Стокса. Зависимость Δ от времени (нестационарный расчет)

Аналитическая зависимость хорошо согласуется с расчетной, т.е., коэффициент схемной вязкости меньше коэффициента физической вязкости ($\eta_c < \eta$) и не влияет на результаты расчета для такого сеточного разрешения. В дополнение к приведенным исследованиям, проиллюстрировать точность метода определения формы пузыря по изменению функции-маркера можно, вычислив зависимость объема пузыря от времени. На рис. 10 приводятся графики зависимости объема пузыря, нормированного на начальный объем, от времени. Из графиков следует, что при рассмотрении пузырьков диаметром 1, 3, 5, 8 и 10 мм во всех расчетах, кроме случая $d = 1$ мм, сеточная диффузия не превышала 15 %.

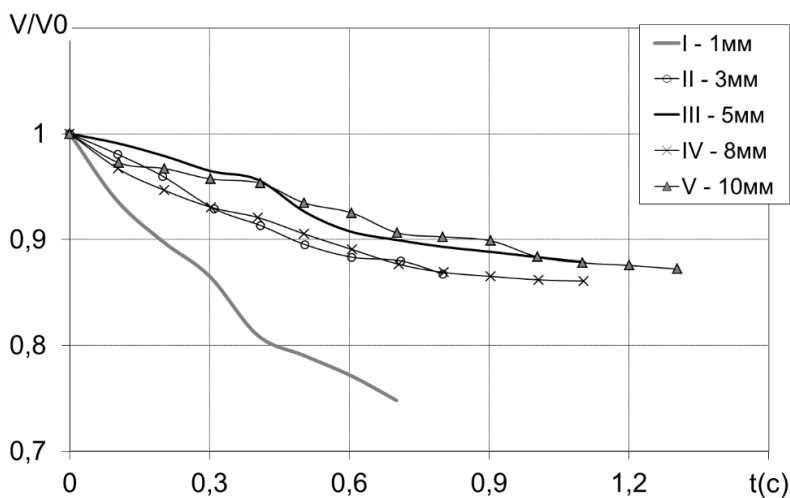


Рис. 10. Изменение объема пузырька в течение расчета (степень сеточной диффузии)

Влияние размеров области моделирования

В случае всплытия пузырька при использовании подвижного региона для анализа влияния размеров области моделирования был проведен ряд расчетов. Размеры области варьировались от $2D$ до $10D$ в каждом пространственном направлении, где D – диаметр пузырька. При этом сеточное разрешение было фиксированным и составляло приблизительно 16 ячеек на диаметр пузырька. Для оценки влияния близости границ использовались показания средней скорости всплытия пузырька. Целью этого анализа являлось определение наименьшего допустимого размера области моделирования, при котором влияние близости границ пренебрежимо мало на скорость всплытия.

На рис. 11 представлены графики зависимости средней скорости всплытия пузырька от времени для сеток разного размера. Наблюдается существенное изменение скорости по мере увеличения области от $2D$ до $6D$. При дальнейшем увеличении размеров области моделирования существенных различий уже нет. При размерах области больших $6D$ разница между получаемыми значениями скорости всплытия становится менее трех процентов. Основываясь на этих наблюдениях, можно заключить, что размера области в $6D$ достаточно для проведения расчетов.

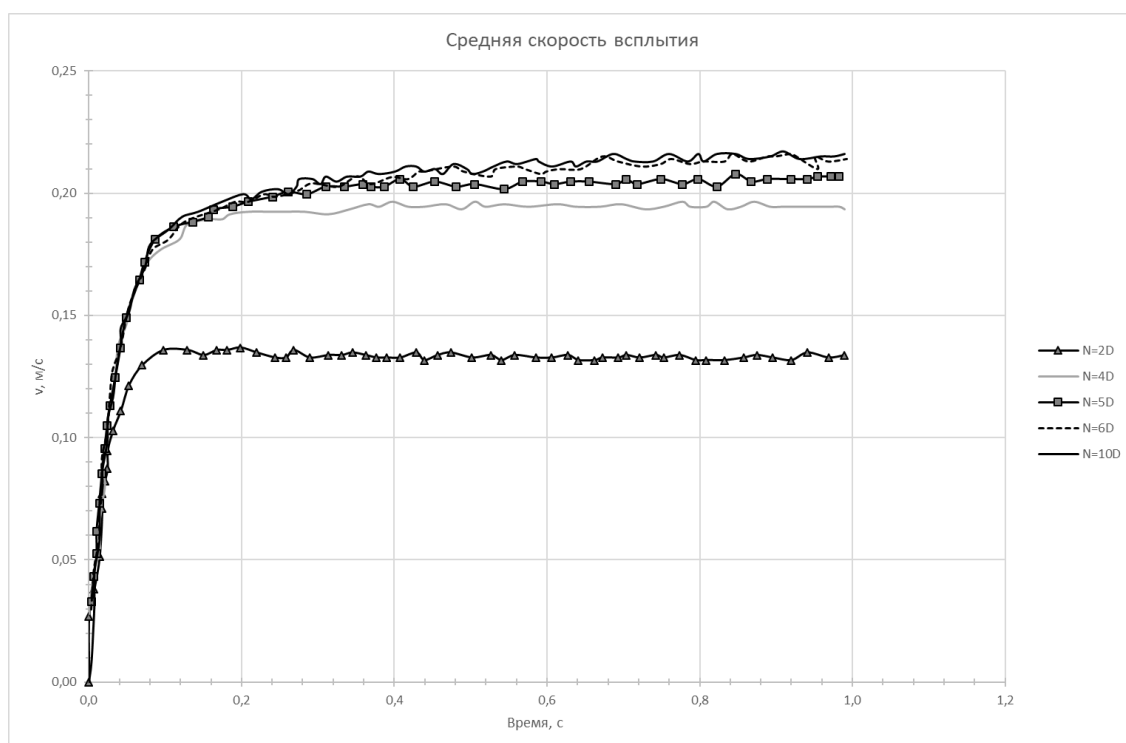


Рис. 11. Средняя скорость всплытия пузырька в зависимости от времени для разных размеров области моделирования

При рассмотрении всплытия твердых сфер внешняя расчетная область представляет собой параллелепипед размерами $20D \times 20D \times 100D$. Поскольку расчеты в таком случае проводятся на перекрывающихся сетках, то на первый план выходит влияние на точность решения размеров подвижного региона, связанного со сферой. А точнее близость интерфейсных границ этого региона к сфере.

Для анализа зависимости средней скорости всплытия сферы диаметром 10 мм от размера подвижного региона была проведена серия расчетов с варьируемым размером этого региона. Сеточное разрешение при этом составляло 60 ячеек на радиус сферы. В табл. 2 представлены результаты расчетов на сетках с размерами подвижной области $2D$, $3D$, $4D$ и $5D$ в каждом пространственном направлении, где D – диаметр сферы.

Таблица 2

Средняя скорость всплытия твердой сферы диаметром 10мм

| Размер подвижного региона, D | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------------------|------|------|-------|-------|
| u, м/с | 0,26 | 0,28 | 0,287 | 0,291 |

Видно, что значение средней скорости всплытия не меняется для подвижных областей размерами больше 4D. Это означает, что подвижный регион размером 4D следует считать оптимальным при дальнейшем моделировании. Следует отметить, что сетка внешнего региона в окрестности интерфейсных границ должна иметь сеточное разрешение близкое к разрешению в подвижном регионе. Поэтому от размеров подвижного региона будет зависеть предполагаемые зоны измельчения внешнего региона.

Влияние подвижной области моделирования

Для получения достоверной картины всплытия пузырька необходимо рассматривать область размерами, намного превосходящими размеры самого пузырька. При этом траектория пузырька заранее непредсказуема для обеспечения необходимого разрешения сетки по пути следования. Все это выливается в огромные размерности требуемых расчетных сеток при стандартном подходе. Для уменьшения численных затрат применяются идеология подвижного региона, когда сетка строится только в небольшой окрестности пузырька и двигается согласно перемещению центра масс пузырька. На границах такой расчетной области задаются граничные условия, которые обеспечивают свободное протекание жидкости. При этом характерный размер области моделирования по направлениям составляет 6D, где D – диаметр пузырька.

Для оценки достоверности результатов, получаемых при применении технологии движения сетки, выполнено сравнение результатов расчетов, проведенных на подвижной и неподвижной двумерных сетках для пузырей диаметром 3мм и 5 мм. Количественное сравнение результатов проводилось по средней скорости всплытия пузырька (табл. 3). Видно, что расхождение результатов незначительное, в пределах допустимой погрешности.

Таблица 3

Средняя скорость всплытия пузырька на подвижной и неподвижной сетках

| Диаметр пузырька (мм) | 3 | 5 |
|-------------------------------------|-------|-------|
| \vec{u} (м/с) (неподвижная сетка) | 0.189 | 0.195 |
| \vec{u} (м/с) (подвижная сетка) | 0.183 | 0.19 |

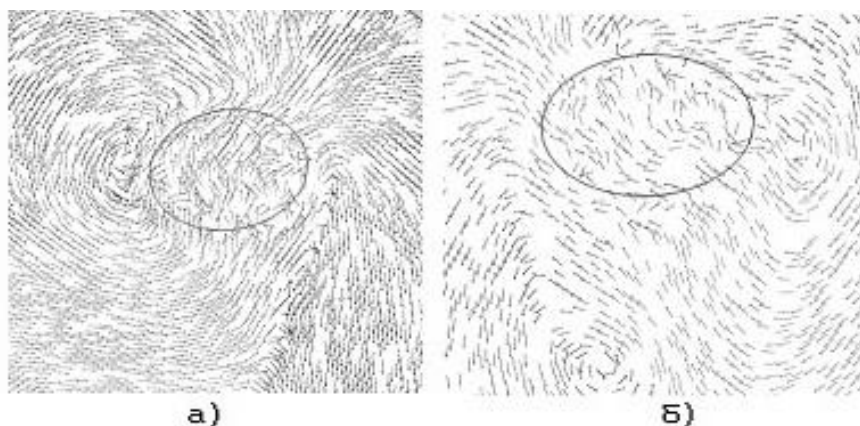


Рис. 12. Поле скорости в окрестности пузырька $d = 5$ мм в двумерном расчете: а) подвижная сетка, б) неподвижная область (пузырь выделен черной окружностью)

На рис. 12 представлено сравнение характерного поля скорости в окрестности пузырька ($d = 5$ мм) в случае использования подвижной и неподвижной сетки. Нестационарное поле скорости обладает одними и теми же характеристиками. В обоих случаях с одной стороны пузырька происходит формирования вихря, в то время как с другой его стороны виден уже оторвавшийся вихрь. Из представленных результатов можно сделать вывод, что применение идеологии подвижной области не дает погрешностей, существенно влияющих на результат. Наблюдается хорошее качественное и количественное согласие результатов на подвижной и неподвижной сетках. Это говорит о корректности применения подвижных сеток для численного решения задачи.

Заключение

Представлена методика, применяемая для численного моделирования всплытия одиночных пузырьков воздуха и твердых сфер. Особое внимание уделено особенностям, которые следует учитывать при проведении расчетов. Проведено исследование точности моделирования, обоснованности выбора описанного подхода. С помощью численного эксперимента исследовано влияние выбора размеров области моделирования, сеточного разрешения. Исследованы свойства используемых численных схем применительно к задачам данного класса. Определены оптимальные параметры моделирования.

Проведенные исследования являются предварительным этапом перед проведением серии расчетов для более детального исследования особенностей всплытия твердых сфер и воздушных пузырьков.

Библиографический список

1. **Veldhuis, C.** Shape oscillations on bubbles rising in clean and in tap water / C. Veldhuis, A. Biesheuvel, L. Wijngaarden // *Physics of fluids*. – 2008. – V. 20. – P. 1-12.
2. **Hua, J.** Numerical simulation of 3D bubbles rising in viscous liquids using a front tracking method / J. Hua, J. Stene, P. Lin // *J. Comp. Phys*. – 2008. – V. 227. – No. 6. – P. 3358-3382.
3. **Horowitz, M.** The effect of Reynolds number on the dynamics and wakes of freely rising and falling spheres / M. Horowitz, C.H.K. Williamson // *J. Fluid Mech*. – 2010. – V. 651. – P. 251-294.
4. **Архипов, В.А.** О нестационарном всплытии пузырька в вязкой жидкости при малых числах Рейнольдса / В.А. Архипов, И.М. Васенин, А.С. Ткаченко, А.С. Усанина // *Известия РАН. Механика жидкости и газа*. – 2015. – № 1. – С. 86-94.
5. **Abbad, M.** Effects of the history force on an oscillating rigid sphere at low Reynolds number / M. Abbad, M. Souhar // *Experiments Fluids*. – 2004. – No. 36. – P. 775-782.
6. **Stepanyants, Y.A.** Particle and bubble dynamics in a creeping flow / Y.A. Stepanyants, G.H. Yeoh // *Eur. J. Mech. – B/Fluids*. – 2009. – V. 28. – P. 619-629.
7. **Rusche, H.** Computational Fluid Dynamics of Dispersed Two-Phase Flows at high phase fraction // PhD thesis, Imperial College of Science, Technology & Medicine, Dep. of Mech. Eng., London, 2002.
8. **Jacquim, D.** Calculation of two-phase Navier-Stokes flows using phase-field modeling // *J. Comp. Phys*. – 1999. – №155, – P. 96-127.
9. **Benek, J.A.** A 3-D Chimera Grid Embedding Technique / J.A. Benek, P.G. Buning, J.L. Steger // *AIAA Paper*. – 1985. – No. 85-1523.
10. **Brackbill, J.U.** A continuum method for modelling surface tension / J.U. Brackbill, D.B. Kothe, C. Zemach // *J. Comp. Phys*. – 1992. – V. 100. – P. 335-354.
11. **Козелков, А.С.** Численное моделирование свободного всплытия пузырька воздуха / А.С. Козелков, А.А. Куркин, В.В. Курулин, С.В. Лашкин, Н.В. Тарасова, Е.С. Тягوشкина // *Известия РАН. Механика жидкости и газа*. – 2016. – № 6. – С. 3-14.
12. **Kozelkov, A.S.** Study of specific features of free rise of solid spheres in a viscous fluid at moderate Reynolds number / A.S. Kozelkov, A.A. Kurkin, S.M. Dmitriev, N.V. Tarasova, V.R. Efremov, E.N. Pelinevsky, D.Yu. Strelets // *European Journal of Mechanics – B / Fluids*. – 2018. – V.72. – P. 616-623.
13. **Козелков, А.С.** Исследование особенностей всплытия пузырьков воздуха и твердых сфер / Козелков А.С., Ефремов В.Р., Дмитриев С.М., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н., Тарасова Н.В., Стрелец Д.Ю. // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2018. – Т.11. – №4. – С.73-80.

14. **Ferziger, J.H.** Computational methods fluid dynamics / J.H. Ferziger, M. Peric // Springer. 2001.
15. **Флетчер, К.** Вычислительные методы в динамике жидкости / К. Флетчер. – М.: Мир, 1991.
16. **Chen, Z.J.** A coupled pressure-based computational method for incompressible/compressible flows / Z.J. Chen., A.J. Przekwas // J. Comp. Phys. – 2010. – V. 229. – P. 9150-9165.
17. **Jasak, H.** Error Analysis and Estimation for the finite volume method with applications to fluid flows. Thesis submitted for the degree of doctor // Imperial College of Science, 1996.
18. **Козелков, А.С.** Моделирование турбулентных течений вязкой несжимаемой жидкости на неструктурированных сетках с использованием модели отсоединенных вихрей / А.С. Козелков, В.В. Курулин, О.Л. Пучкова, Е.С. Тятюшкина // Математическое моделирование. – 2014. – Т. 26. – №8. – С.81-96.
19. **Kozelkov, A.** Comparison of convective flux discretization schemes in detached-eddy simulation of turbulent flows on unstructured meshes / A. Kozelkov, V. Kurulin, V. Emelyanov, E. Tyatyushkina, K. Volkov // Journal of Scientific Computing. – 2016. – V. 67. – P. 176-191.
20. **Waclawczyk, T.** Remarks on prediction of wave drag using VOF method with interface capturing approach / T. Waclawczyk, T. Koronowicz // Archives of civil and mechanical engineering. – 2008. – V. 8. – P. 5-14.
21. **Храбрый, А.И.** Численное моделирование течений со свободной поверхностью на основе метода VOF / А.И. Храбрый, Д.К. Зайцев, Е.М. Смирнов // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова (Труды Крыловского государственного научного центра). – 2013. – Вып. 78 (362). – С. 53-64
22. **Яцевич, С.В.** О применении алгоритма PISO в задачах динамики молекулярно-несмешивающихся жидкостей / С.В. Яцевич, В.В. Курулин, Д.П. Рубцова // ВАНТ. Серия: Математическое моделирование физических процессов. – 2015. – № 1. – С. 16-29.
23. **Козелков, А.С.** Исследование потенциала суперкомпьютеров для масштабируемого численного моделирования задач гидродинамики в промышленных приложениях / А.С. Козелков, Р.М. Шагалиев, В.В. Курулин, А.В. Ялозо, С.В. Лашкин // Вычислительная математика и математическая физика. – 2016. – Т. 56. – № 8. – С. 1524-1535.
24. **Янилкин, Ю.В.** Об аппроксимационной вязкости разностных схем и расчеты течений вязкой жидкости / Ю.В. Янилкин, О.О. Топорова, А.Л. Стадник, Л.Е. Корзакова // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. – 2016. – Вып. 3. – С. 3-17.
25. **Шлихтинг, Г.** Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М.: Наука, 1974.

*Дата поступления
в редакцию: 05.11.2020*

N.V. Tarasova

SPECIFIC FEATURES OF NUMERICAL SIMULATION OF FREE RISE OF SOLID SPHERES AND AIR BUBBLES

Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center –
All-Russian Research Institute of Experimental Physics»

The paper presents detailed description of models used for numerical simulation of freely rising single solid spheres and air bubbles, including their features. Analysis of accuracy of applied methods is made. Grid sensitivity analysis and research of level of numerical diffusion for problem of rising single bubble or single solid sphere were carried out. The acceptable domain size is defined and the accuracy of approximation of values to interface of overset grids is estimated. The main goal of this study is analysis of accuracy and proving validity of results obtained with the help of such methods.

Keywords: unstructured grids, overset grids (Chimera), grid sensitivity analysis, numerical diffusion, interpolation method

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.039.53

DOI: 10.46960/1810-210X_2020_4_49

О.Ю. Виленский¹, С.А. Душев¹, Д.А. Лапшин¹, Э.Г. Новинский¹, В.А. Пахомов¹,
А.М. Татарский¹, М.А. Легчанов²

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ В АТОМНОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

¹Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова

²Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты расчетно-экспериментального исследования динамических характеристик одного из распространенных в атомном машиностроении конструкционного материала – стали 08X18H10T. Проведена идентификация математической модели поведения данного материала при ударных воздействиях высокой интенсивности; выполнена верификация этой модели путем сравнения с результатами экспериментов. Рассмотрены транспортно-технологические операции, при проведении которых наиболее вероятны случаи падения перемещаемого крупногабаритного ответственного оборудования. В качестве критерия сохранения целостности оборудования взята деформация, приводящая к разрушению при стендовых испытаниях на растяжение стандартного образца и определяемая по относительному поперечному сужению сечения в месте разрыва. Для расчетов использовался аттестованный программный комплекс ANSYS/LS-DYNA, в основу динамических расчетов которого заложен метод конечных элементов. Обоснована актуальность и экономическая целесообразность проведения данных расчетов оборудования для ядерных установок в случае аварийного падения.

Ключевые слова: математическая модель деформирования, конструкционный материал, экспериментальное исследование, падение перемещаемого оборудования, динамические характеристики, надежность, безопасность ЯЭУ.

Введение

Создателями ядерных энергетических установок (ЯЭУ) и атомных электростанций (АЭС) особое внимание уделяется разработке эффективных и радиационно безопасных технологий обращения со свежим и отработавшим ядерным топливом. К данной сфере относится разработка не только надежного, но и конкурентоспособного оборудования для хранения и транспортировки топлива. Очевидно, что аварийная ситуация в результате падения и разрушения такого оборудования во время транспортно-технологических работ (ТТР) приведет к серьезным радиационным последствиям для обслуживающего персонала и окружающей среды. Поэтому требование обоснования безопасности при проектировании такого оборудования и обслуживающих систем закладывается изначально в нормативную документацию на проект. Следует отметить, что конструкция транспортно-технологического оборудования относится к изделиям повышенной сложности и должна удовлетворять требованиям динамической прочности при воздействии ударных нагрузок повышенной интенсивности. При этом она должна обладать демпфирующими свойствами, позволяющими амортизировать внешние ударные нагрузки, снижая их воздействие на внутреннюю «начинку». Таким образом, расчетный анализ позволяет оценить степень механического разрушения оборудования и его разгерметизации в этих условиях.

Для выполнения подобного анализа применяют специализированные программные продукты (ANSYS, LS-DYNA, ABAQUS, AUTODYN и т.д.), позволяющие решать уравнения механики сплошной среды для определения напряженно-деформированного состояния узлов и элементов конструкций в условиях интенсивного динамического нагружения. От качества математических моделей, описывающих воздействие параметров нагружения в процессе соударений на степень деформирования конструкционных материалов, зависит степень достоверности получаемых результатов численного моделирования. В анализе процесса ударного нагружения должны быть учтены такие факторы, как влияние скорости деформации на радиус поверхности текучести, значительный адиабатический разогрев материала в области локальных пластических деформаций и снижения значений его механических характеристик.

В настоящей работе использована широко применяемая в атомной отрасли коррозионностойкая сталь аустенитного класса 08X18H10T для идентификации и верификации модели деформирования. Диаграммы деформирования и граничные характеристики разрушения получены на стандартных образцах этой стали, испытанных на сжатие и растяжение в диапазоне скоростей деформаций от $0,001 \text{ с}^{-1}$ до 1500 с^{-1} и при температурах от 20 до $350 \text{ }^\circ\text{C}$.

При высокоскоростном нагружении с целью определения механических свойств сталей применен метод Кольского с несколькими вариантами разрезного стержня Гопкинсона. Диаграммы деформирования, полученные для различных режимов нагружения, позволили определить пределы прочности материала и их зависимость от скоростей деформаций и температуры. Для оценки изменения прочности в широком диапазоне скоростей деформации материала результаты динамических экспериментов сравнены с результатами аналогичных статических испытаний. В проведенных экспериментах определены параметры модели пластичности Jonson-Cook из библиотеки LS-DYNA (1), учитывающей влияние скорости деформации и температуры на радиус поверхности текучести. С использованием специальных тестовых экспериментов проведена верификация математических моделей.

Методы экспериментального исследования. Характеристики стали 08X18H10T при динамическом нагружении в настоящей работе определяли методом Кольского по схеме Николаса [1-4]. Деформирование материала при повышенных температурах исследовалось с использованием миниатюрной печи трубчатой конструкции, которая надевается на торцы мерных стержней с расположенным между ними образцом. К боковой поверхности образца приварена ХК-термопара для контроля его температуры. Программой испытаний предусматривалось дважды проведение каждого режима нагружения (скорость, деформация, температура). Средняя кривая с характеристиками разброса экспериментальных данных (доверительные интервалы) для каждого режима определялась из полученных диаграмм. В работе А.М. Брагова [5] показано, что погрешность определения напряжения с использованием метода Кольского не превышает 7 %, а деформации образца – не превышает 6 %.

Результаты экспериментальных исследований. Проведенные испытания показали, что материал имеет:

- положительную чувствительность предела текучести к росту скорости деформации (динамическая диаграмма деформирования ($\sim 1000 \text{ с}^{-1}$) оказалась на 8 % выше статической кривой);
- отрицательную чувствительность к повышению температуры (разогрев образцов до $350 \text{ }^\circ\text{C}$ снизил предел текучести на 20 %);
- предельные значения характеристик пластичности, практически не зависящие от скорости деформации и температуры и составляющие относительное удлинение $\delta \approx 50 \%$ и относительное сужение $\psi \approx 70 \%$.

Идентификация математических моделей. Приведенные исследования деформирования стали 08X18H10T при статическом и динамическом нагружениях позволили параметризовать модель Jonson-Cook из библиотеки LS-DYNA. Модель Jonson-Cook относит напряжение текучести к функциям деформации, скорости деформации, температуры и представляется в следующем виде [6] (1):

$$\sigma_{JC} = (A + B \cdot \varepsilon_p^n) \cdot (1 + C \cdot \ln \dot{\varepsilon}^*) \cdot (1 - T^{*m}), \quad (1)$$

где $A + B \cdot \varepsilon_p^n$ – статическая составляющая; $1 + C \cdot \ln \dot{\varepsilon}^*$ – динамическая составляющая; $1 - T^{*m}$ – температурная составляющая; A, B, C, n, m – постоянные материала; ε_p – эффективная пластическая деформация; $\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}$ – безразмерная пластическая скорость деформации $\left(\dot{\varepsilon}_0 = 1 \frac{1}{c}\right)$; $T^* = \frac{T - T_0}{T_m - T_0}$ – модифицированная гомологическая температура; $T_0 = 293$ К и $T_m = 1723$ К – соответственно температура окружающей среды и температура плавления материала. Адиабатический разогрев материала за счет пластической деформации рассчитывается по формуле (2):

$$\Delta T = \frac{0,9 \cdot W_p}{\rho \cdot c_p}, \quad (2)$$

где W_p – работа пластической деформации, ρ – плотность материала, c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении.

В модели Jonson-Cook деформации множителя $(1 + C \cdot \ln \dot{\varepsilon}^*)$ носят линейный характер по логарифму скорости. Для чистоты эксперимента рассматривались и другие математические модели учета влияния скорости деформации на напряжение течения. Полный перечень исследованных моделей приведен ниже.

- $1 + C \cdot \ln \dot{\varepsilon}^*$ – модель 1 – Jonson-Cook [6];
- $1 + C \cdot \ln(\dot{\varepsilon}^*) + C_2 \cdot \ln(\dot{\varepsilon}^*)^2$ – модель 2 – Huh & Kang [7];
- $(\dot{\varepsilon}^*)^C$ – модель 3 – Allen, Rule & Jones [8];
- $1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}^*}{C}\right)^{\frac{1}{p}}$ – модель 4 – Cowper-Symonds [9].

На рис. 1. показан общий вид модели Jonson-Cook.

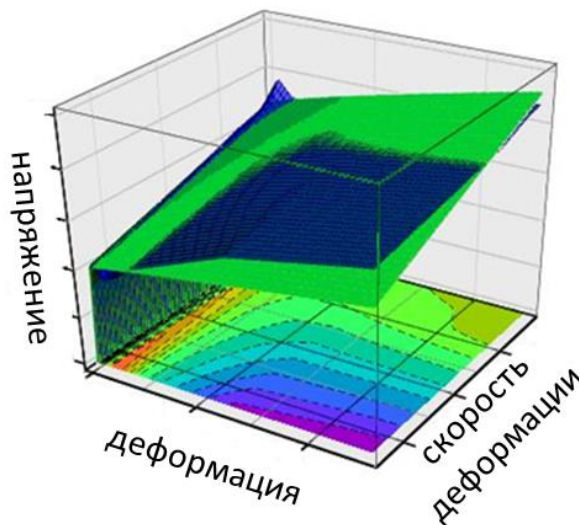


Рис. 1. Иллюстрация аппроксимации экспериментальной поверхности текучести аналитической функцией

В табл. 1. указаны характеристики стали, которые необходимо задать в модели.

Таблица 1

Физико-механические характеристики стали

| Характеристика | Значение | Размерность |
|------------------------------|----------|-------------------|
| Плотность, ρ | 7850 | кг/м ³ |
| Модуль Юнга, E | 200 | ГПа |
| Коэффициент Пуассона, ν | 0,28 | |
| Модуль сдвига, G | 78 | ГПа |
| Удельная теплоемкость, C_p | 462 | Дж/кг/К |

Для разных моделей динамической составляющей в процессе решения оптимизационной задачи получены параметры модели Jonson-Cook (A, B, n, C, C_2, p, m).

Для принятой для исследования стали 08Х18Н10Т дает наименьшую погрешность (минимальное отклонение математической кривой от экспериментальных диаграмм деформирования) модель 4 – Cowper-Symonds. Сравнение кривых деформирования, рассчитанных в соответствии с моделью (сплошная линия), с экспериментальными диаграммами деформирования (маркеры), полученными при разных условиях нагружения показано на рис. 2, где ось X – относительная пластическая деформация, ось Y – напряжение в МПа.

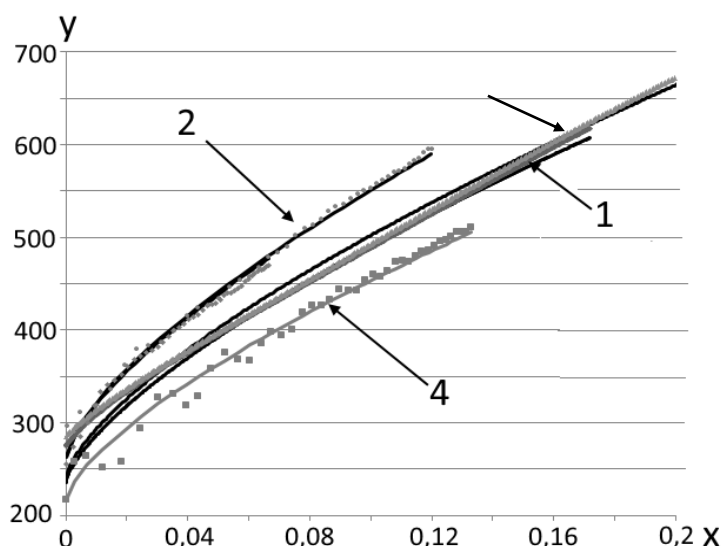


Рис. 2. Сравнение экспериментальных диаграмм деформирования (напряжение течения в МПа от пластической деформации) с кривыми, построенными по модели Cowper-Symonds

1 – статика, 2 – динамика, 20 °С, 3 – динамика, 150 °С, 4 – динамика 350 °С

Верификация модели деформирования стали. Для идентификации математических моделей используются данные «простых» (базовых) экспериментов (однородное и одноосное напряженное состояние, постоянная скорость деформации и температура), а значит, требуется проверка работоспособности определяющих соотношений в реальных условиях работы узлов конструкций. В связи со сложной геометрией подобных элементов, а также благодаря разнообразию распределений и истории изменений нагрузок, напряженное и деформированное состояние в них не является однородным и одноосным, а скорость деформации может сильно изменяться в процессе нагружения. Для проверки адекватности модели используются специальные тестовые эксперименты, которые, с одной стороны, достаточно просты и допускают однозначную трактовку результатов и численное воспроизведение без упрощений, а с другой – напряженное состояние в этих видах испытаний. Также история изменения параметров нагружения отличается от таковой в базовых экспериментах.

Для верификации модели деформирования стали 08X18H10T использовались эксперименты на высокоскоростное внедрение инденторов со сферической и конической головными частями в образцы из исследуемого материала [10, 11] и на диагональное сжатие. В первом верификационном эксперименте индентор с образцом размещались в системе разрезного стержня и нагружались аналогично традиционной схеме летящим с некоторой скоростью ударником. В ходе эксперимента регистрировались деформации в сечениях нагружающего и опорного стержней, а также проводились измерения характерных размеров пластического отпечатка в образце. Во втором верификационном эксперименте (динамическом диагональном сжатии) используется цилиндрический образец в виде таблетки, повернутой на 90° таким образом, что его нагружение осуществляется по диагонали (по диаметральной плоскости). Схема нагружения образца аналогична схеме испытания на раскалывание [12]. Как и в предыдущем случае тензодатчики на мерных стержнях позволяют проводить регистрацию импульсов деформаций. Информация, наряду с остаточной формой образца, используется для верификации моделей упруго-пластического поведения материалов.

Нагружение образцов проводилось в системе разрезного стержня диаметром 20 мм, выполненного из высокопрочной стали. Стальной ударник диаметром 20 мм и длиной 300 мм в случае внедрения конического индентора разгонялся до скорости 18,3 м/с, а в случае использования сферического индентора и в схеме диагонального сжатия – до скорости 22,4 м/с. При моделировании экспериментов на высокоскоростное внедрение между индентором и образцом задавался контакт с трением (коэффициент трения равен 0,1). Расчет проводился в плоской осесимметричной постановке для схем индентирования, и трехмерной постановке – для диагонального сжатия.

Результаты сравнения отпечатков инденторов и сравнение форм образцов таблеток, полученных в натурном и численном экспериментах, приводятся на рис. 3. Относительная погрешность расчетного предсказания диаметра отпечатка в случае использования конического индентора составила 2,0 %, для сферического индентора 0,4 %, в случае с диагональным сжатием образцов, относительная погрешность не превысила 9,7 %.

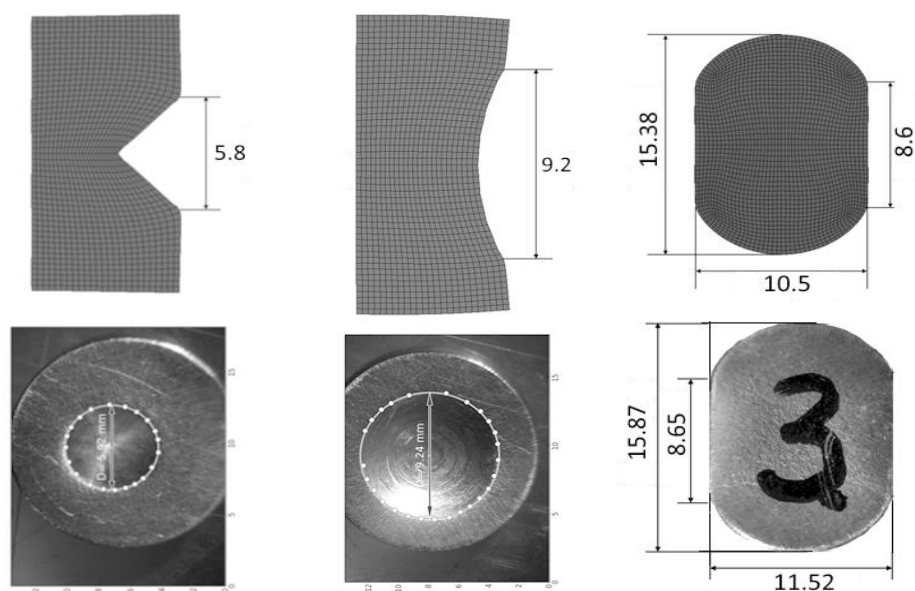


Рис. 3. Сравнение пластических отпечатков, полученных в вычислительном (сверху) и натурном (снизу) экспериментах (все размеры в мм)

Заключение по исследованиям материала. По результатам серии статических и динамических экспериментов при различных температурах для исследованного материала идентифицирована математическая модель из библиотеки программного комплекса LS-DYNA.

Полученная математическая модель верифицирована с использованием тестовых испытаний на высокоскоростное внедрение конического и сферического инденторов, а также эксперимента на динамическое диагональное сжатие образца в системе разрезного стержня. Результаты сравнения данных натуральных и вычислительных экспериментов позволяют сделать вывод о достоверности и точности математической модели. Таким образом, совокупность полученных экспериментальных данных, идентифицированной и верифицированной математической модели (определяющих соотношений) теории течений свидетельствует о применимости данной модели для анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) и прочности исследуемых конструкций, изготовленных из исследуемого материала в условиях динамических нагрузений.

Моделирование разрабатываемых конструкций. В АО «ОКБМ Африкантов» разработан целый ряд конструкций, которые должны отвечать всем требованиям нормативных документов по обеспечению безопасности объектов использования атомной энергии. В соответствии с требованиями НП-061-05 («Правила безопасности при хранении и транспортировании ядерного топлива на ОИАЭ») разрабатываемые конструкции должны быть способны выполнять свои функции в установленном проектом объеме с учетом всех внутренних и внешних воздействий природного и техногенного происхождения. В перечень воздействий должны входить все нагрузки при нормальной эксплуатации (НЭ), нарушении нормальной эксплуатации (ННЭ) и проектной аварии (ПА). В этом плане, отдельно выделяется группа режимов, в которой анализируются последствия ситуаций, связанных с падением оборудования с радиоактивными материалами в процессе ТТО.

В соответствии с НП-018-05 («Требования к содержанию отчета по обоснованию безопасности атомных станций с реакторами на быстрых нейтронах»), в перечень исходных событий ННЭ входят:

- падение тепловыделяющей сборки (ТВС) в реактор при перегрузке;
- падение тяжелых предметов на реактор.

Оценка прочности оборудования выполнена в соответствии с требованиями ПНАЭ Г-7-002-86 (Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок). Прочность конструкции оценивается по категориям напряжений, регламентированным для расчетного случая, к которому отнесена та или иная ситуация ННЭ или ПА. Допускаемые напряжения принимаются с коэффициентами запаса соответствующими расчетному случаю. Допускается возникновение пластических деформаций в локальных зонах, зонах концентрации напряжений, не препятствующих нормальной эксплуатации и не приводящих к переходу конструкции в предельное состояние, при котором ее дальнейшая эксплуатация по назначению недопустима или нецелесообразна, либо восстановление ее работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно. Вопрос о допустимости локальных пластических деформаций для каждой конкретной конструкции решается индивидуально.

Актуальность разработки расчетных моделей и оснащения этих моделей необходимыми параметрами и характеристиками вызвана необходимостью проведения всестороннего анализа НДС разрабатываемых конструкций на стадии проектирования и сложностью проведения представительных полномасштабных испытаний.

Ряд конструкций с результатами расчетных исследований показаны на рис. 4-14.

Рассмотрены такие задачи как: падение строительных конструкций на реакторную установку (рис. 4, 5); заваливание контейнера с промежуточным теплообменником на трубопровод II контура (рис. 6,7); падение контейнера с теплообменником на поворотное надреакторное перекрытие (рис. 8,9); падение внутриобъектового транспортного упаковочного комплекта (рис. 10, 11); падение ТВС (рис. 12-14).

Все расчеты выполнены с использованием модуля динамических расчетов LS-DYNA аттестованного в Ростехнадзоре ПК ANSYS [13], основанного на методе конечных элементов. Модуль LS-DYNA предназначен для расчетного анализа высоконелинейных динамических процессов по явной схеме интегрирования уравнений динамики.

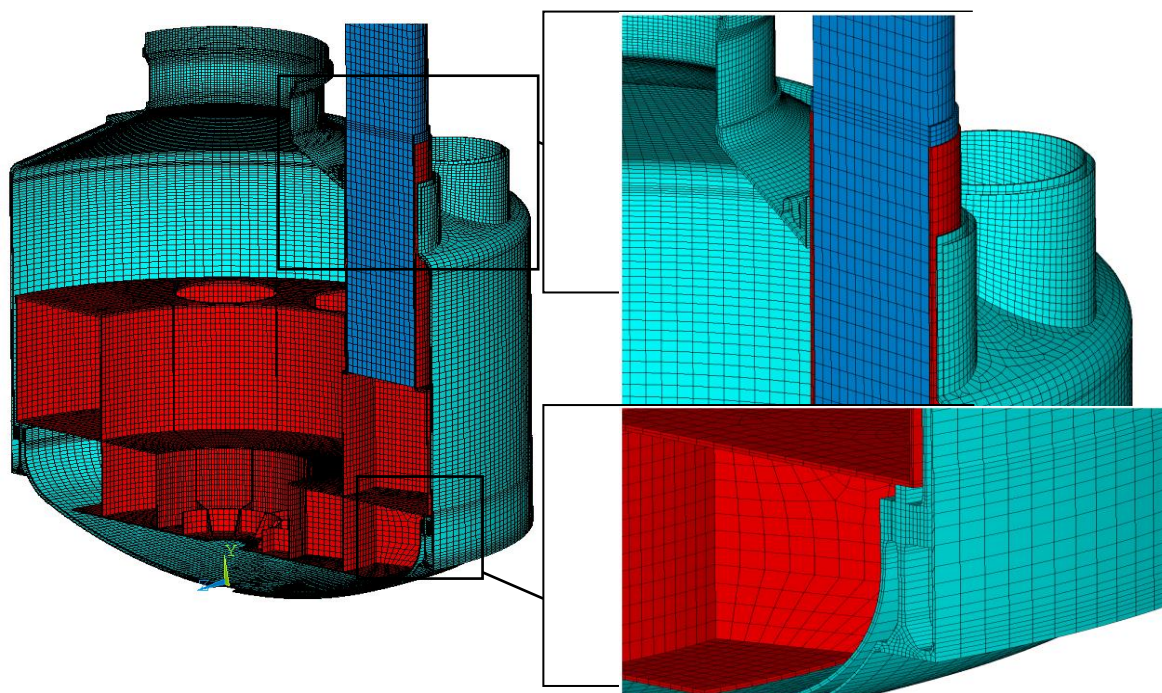


Рис. 4. Конечно-элементная расчетная модель реактора

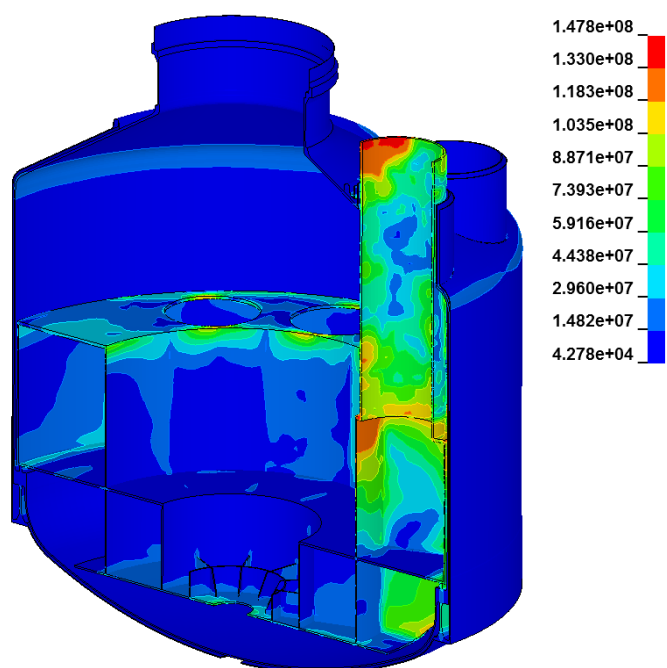


Рис. 5. Распределение напряжений SINT в конструкции на момент передачи ударного импульса на опорный пояс, Па

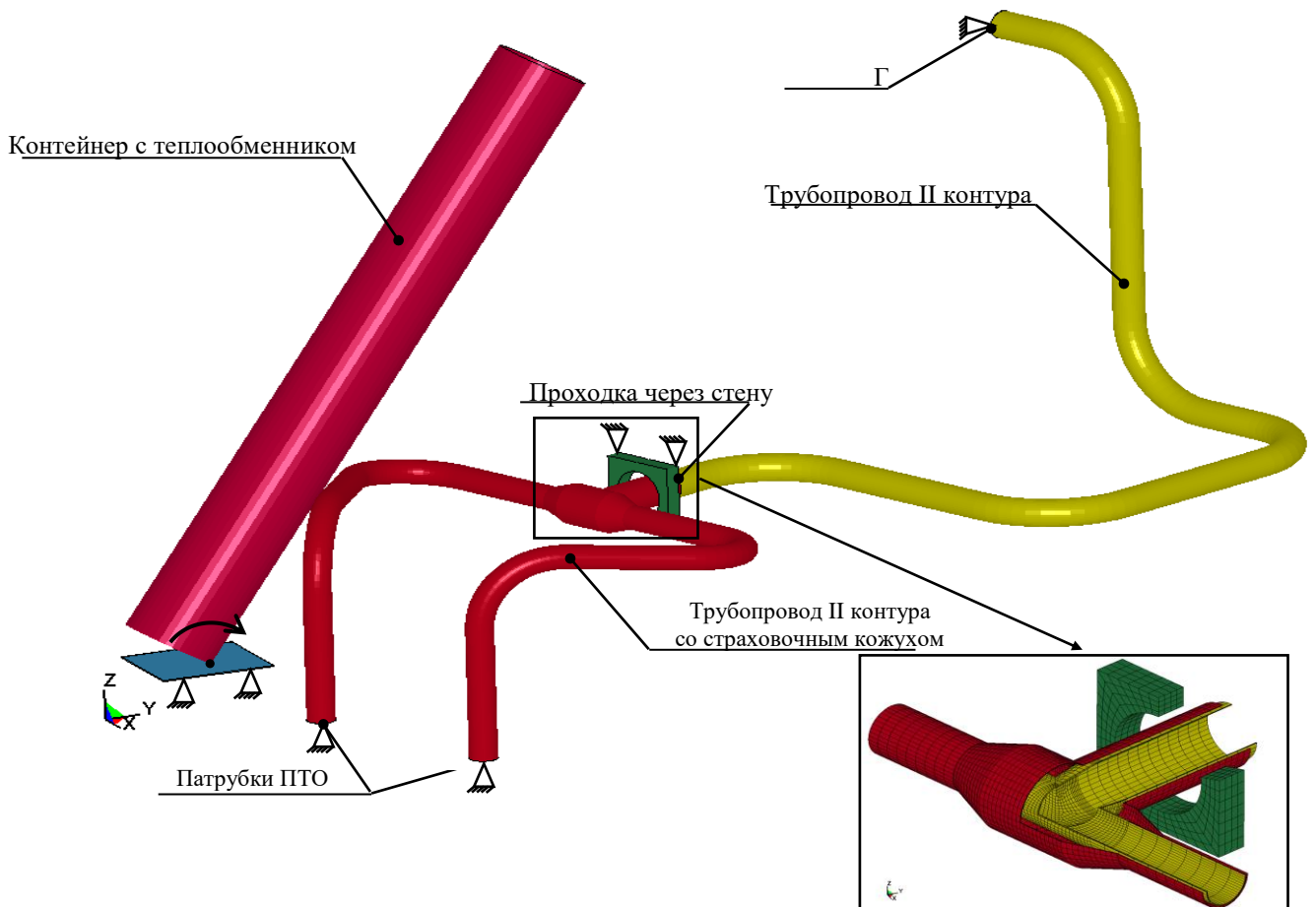


Рис. 6. Расчетная модель трубопровода II контура с падающим на него контейнером

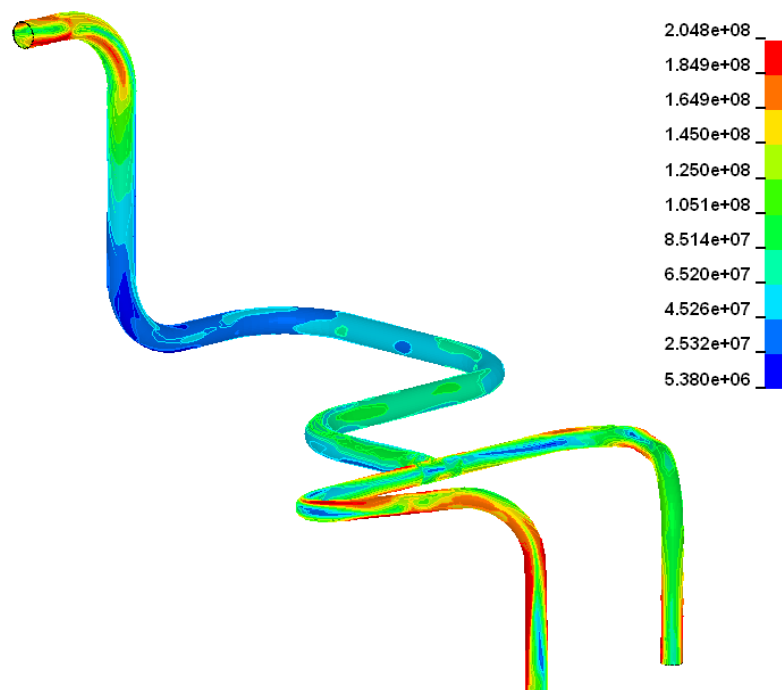


Рис. 7. Распределение напряжений SINT в трубопроводе II контура для характерного временного интервала, Па

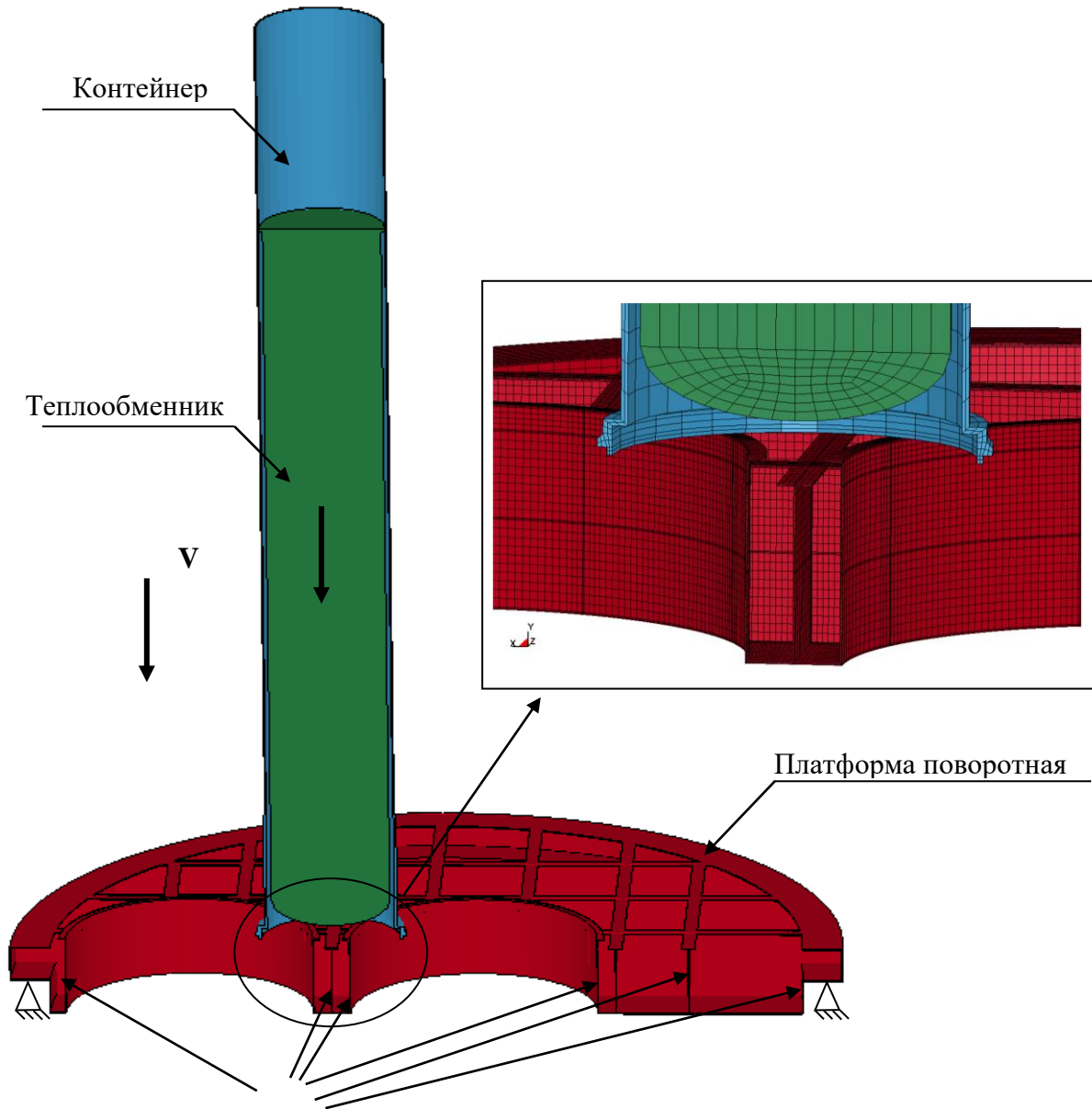


Рис. 8. Расчетная модель поворотного надреакторного перекрытия, с падающим на него теплообменником и контейнером

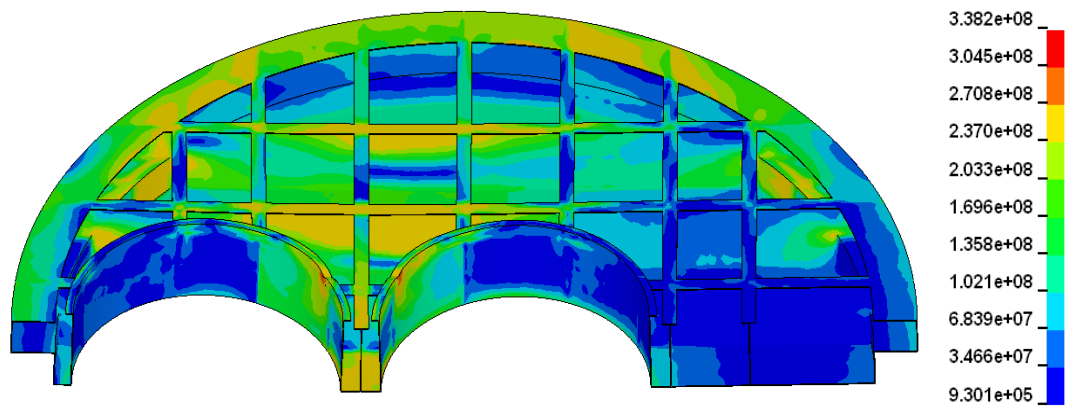


Рис. 9. Распределение напряжений SINT в поворотном надреакторном перекрытии для характерного временного интервала, Па

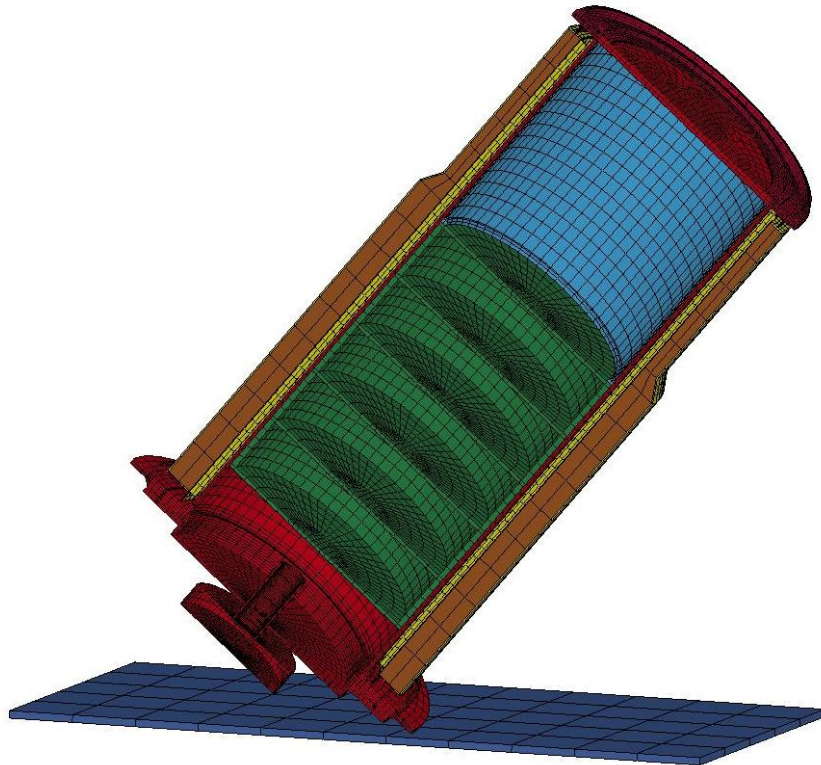


Рис. 10. Расчетная модель транспортно-упаковочного комплекта, падающего под углом к горизонтальной плоскости

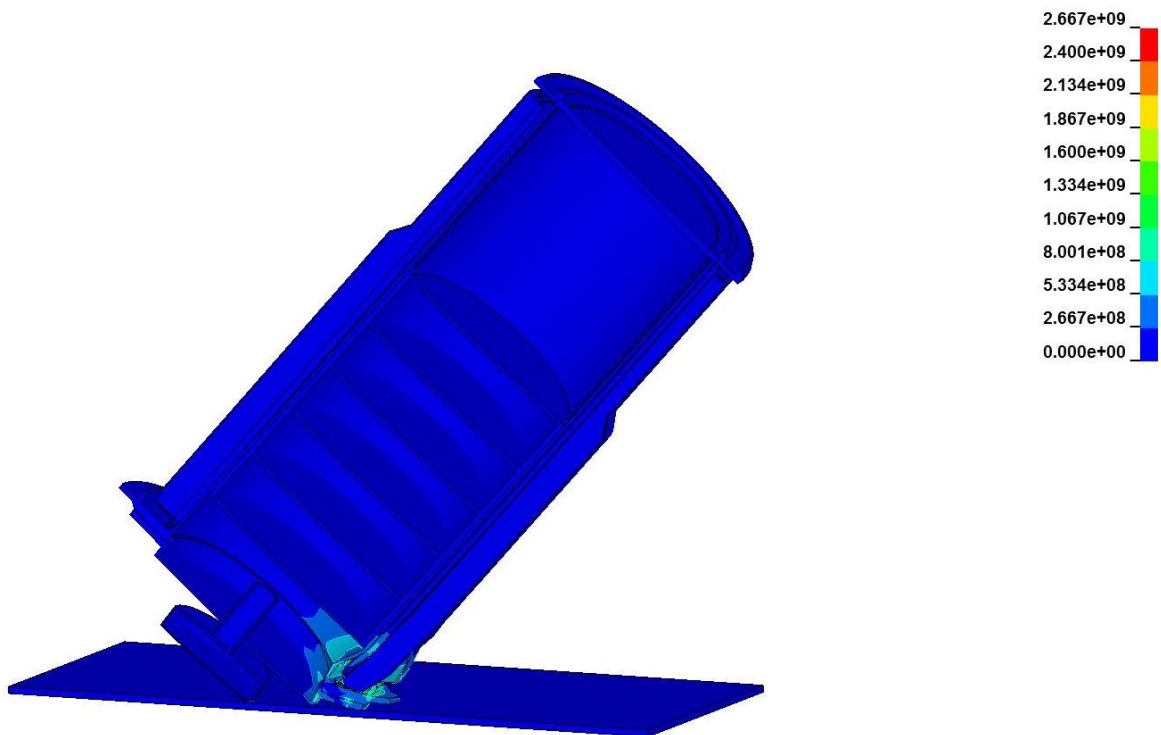


Рис. 11. Распределение напряжений SINT в конструкции для характерного временного интервала, Па

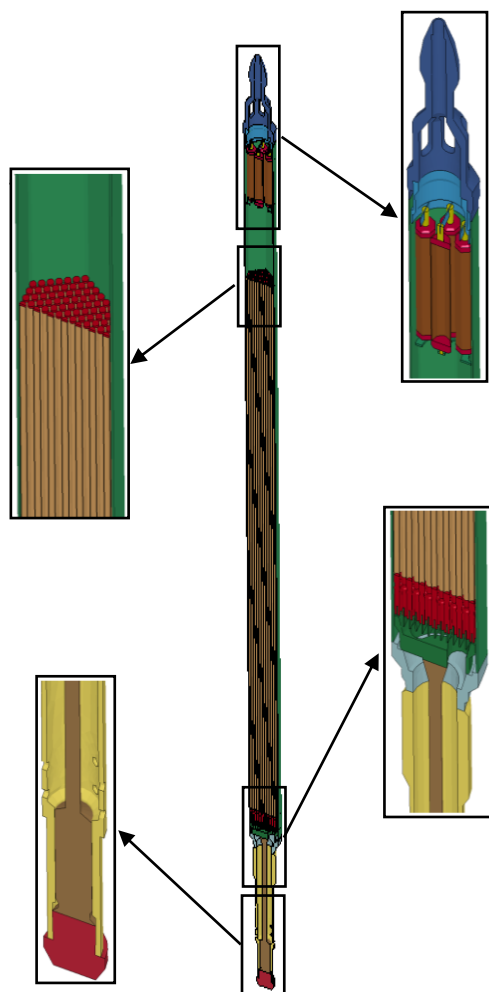


Рис. 12. Расчетная модель ТВС

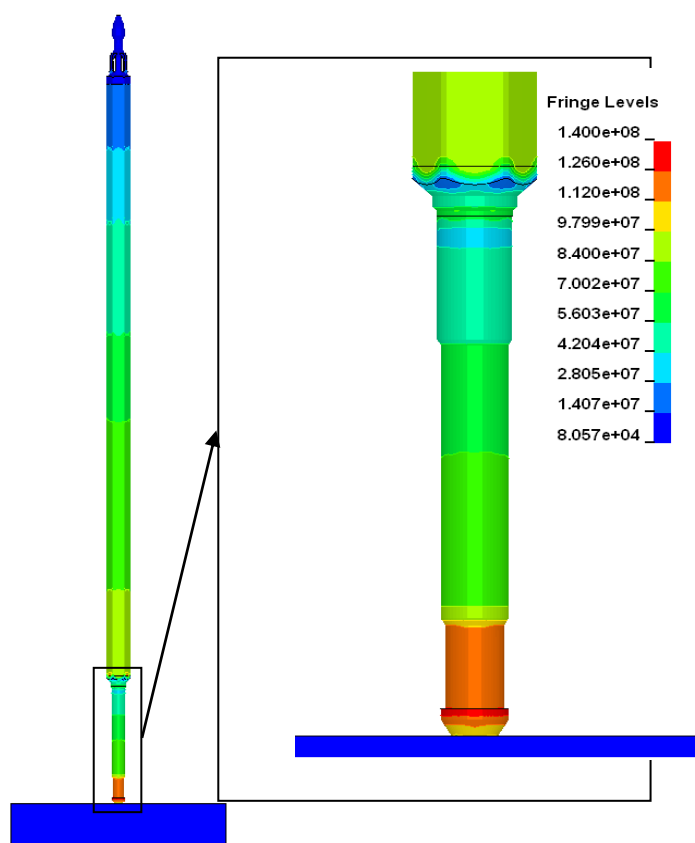


Рис. 13. Распределение осевых напряжений макета ТВС при ударе, Па

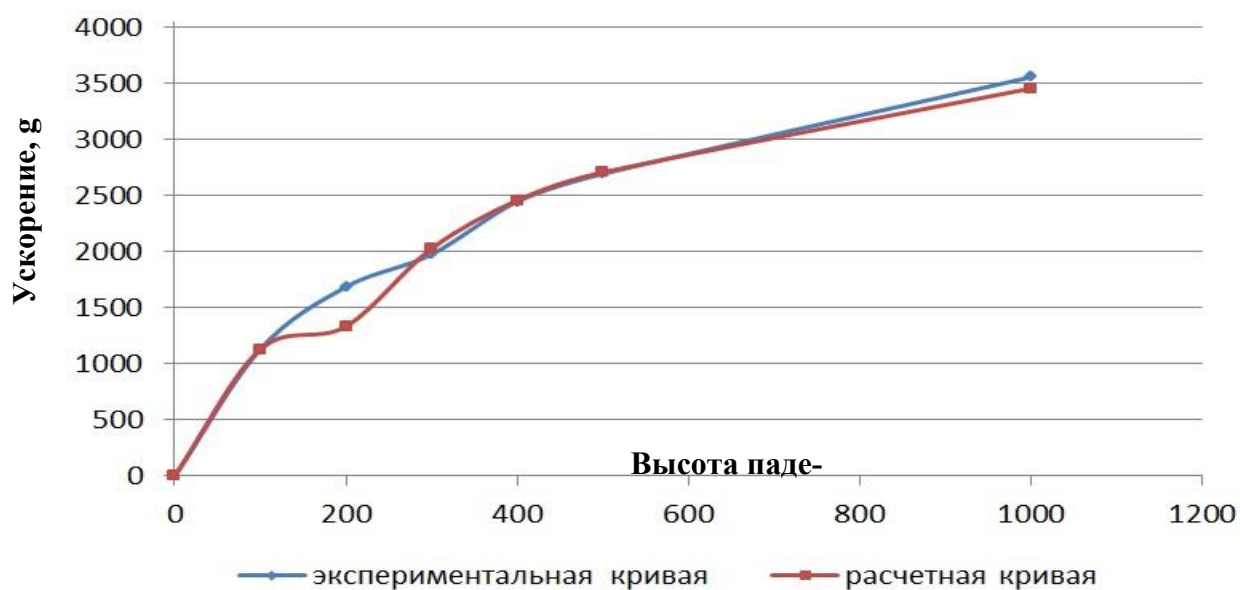


Рис. 14. Ускорение макета ТВС в характерном сечении при падении с различных высот, в долях g

Для ситуаций, не классифицированных как ННЭ или ПА, выполняется оценка по предельному состоянию с использованием критериев разрушения. В качестве критерия разрушения материала предложена деформация разрушения $\varepsilon_{пред}$ при кратковременных стандартных испытаниях на растяжение образца. Она определена по относительному поперечному сужению ψ сечения образца в месте разрыва [14] (3):

$$\varepsilon_{пред} = \ln\left(\frac{1}{1 - 0,01 \cdot \psi}\right). \quad (3)$$

Вопрос разработки критериев разрушения, их численных величин представляет собой тему отдельного исследования. Часть проектируемого оборудования разработана на основе верифицированных расчетных моделей. На базе экспериментального комплекса ОА «ОКБМ Африкантов» испытан на ударостойкость макет ТВС. Расчетный анализ конструкции и экспериментальные данные по ряду параметров показали хорошую сходимость (рис. 12-14).

Заключение

Проблемы обеспечения прочности и сохранения целостности оборудования для ядерных энергетических установок при динамических воздействиях высокой интенсивности весьма актуальны при обосновании безопасности. Импульсы, приходящие на конструкции от ударных нагрузок, являются определяющими при формировании конечного облика проектируемых объектов. По результатам полномасштабного 3D компьютерного моделирования на стадии проектирования в разрабатываемое оборудование внесены конструктивные изменения, направленные на обеспечение радиационной безопасности. Эти рекомендации позволяют оптимизировать конструкции, повышать их надежность и как правило, снижать металлоемкость за счет уменьшения необоснованно заложенных запасов прочности.

Реализованный в работе комплексный подход к выполнению расчетного анализа аварийных ситуаций, связанных с падением оборудования, основан на соблюдении следующих принципов:

- определение реальных сценариев постулируемых аварий на основании анализа транспортно-технологического тракта;
- соблюдение требований к построению расчетных моделей исследуемых конструкций с целью отражения реальных жесткостных и весовых характеристик, обеспечивающих получение достоверных результатов;
- использование физико-механических свойств конструкционных материалов в области значительных пластических деформаций при их высокоскоростном динамическом нагружении (определение на этой основе параметров математических моделей конструкционных материалов, адекватно описывающих процесс высокоскоростного деформирования и разрушения);
- использование современных высокопроизводительных аттестованных конечно-элементных вычислительных комплексов расчета НДС и прочности конструкций ОИАЭ, позволяющих учитывать интенсивные воздействия ударного характера;
- выполнение, нормативных требований безопасности, предъявляемых к ОИАЭ, содержащих радиоактивные материалы, применительно к случаям их аварийных падений.

Использование такого подхода позволяет решать целый класс задач, связанных с падением оборудования и обоснованием динамической прочности различных конструкций ОИАЭ, и избежать дорогостоящих натурных испытаний, что, в свою очередь, способствует повышению конкурентоспособности изделий за счет снижения его себестоимости.

Библиографический список

1. **Кольский, Г.** Исследование механических свойств материалов при больших скоростях нагружения // *Механика*. – 1950. – N4. – С. 108-119.
2. **Брагов, А.М.** Особенности построения диаграмм деформирования методом Кольского / А.М. Брагов, А.К. Ломунов // *Прикладные проблемы прочности и пластичности. Статика и динамика деформируемых систем: Всесоюз. межвуз. сб./ Горьк. ун-т., 1984. – С.125-137.*
3. **Bragov, A.M.** Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method / А.М. Bragov, А.К. Lomunov // *Int.J. of Impact Engineering*, 1995. – 16(2), p.321-330.
4. **Nicholas, T.** Tensile testing of materials at high rates of strain / T. Nicholas // *Exp. Mech.* 1981. –Vol. 21. – N 5. – P.177-195.
5. **Брагов, А.М.** Экспериментальный анализ процессов деформирования и разрушения материалов при скоростях деформации 10^2 – 10^5 с⁻¹: Дисс.... докт.техн.наук. Нижегород.ун-т. 1998.
6. **Johnson, G.R.** A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistic / G.R. Johnson, W.H. Cook // *The Hague, The Netherlands*, 1983, – P. 541-547.
7. **Huh, H.** Crash-Worthiness Assessment of Thin-Walled Structures with the High-Strength Steel Sheet / H Huh, W.J.Kang // *International Journal of Vehicle Design*, Volume 30, Numbers 1/2, 2002.
8. **Allen, D.J.** Optimizing Material Strength Constants Numerically Extracted from Taylor Impact Data / D.J. Allen, W.K. Rule, S.E. Jones // *Experimental Mechanics*, Volume 37, Number 3, September, 1997.
9. **Cowper, G.R.** Strain Hardening and Strain Rate Effects in the Impact Loading of Cantilever Beams / Cowper, G.R., P.S. Symonds, Brown University, Applied Mathematics Report, 1958.
10. **Константинов, А.Ю.** Экспериментально-расчетное исследование поведения конструкционных материалов под действием динамических нагрузок: Дисс... канд. техн. наук. – Н. Новгород, 2007.
11. **Котов, В.Л.** Численное моделирование плоскопараллельного движения конических ударников в упругопластической среде / В.Л. Котов, А.Ю. Константинов, Ю.И. Кибец, А.А. Тарасова, В.П. Власов // *Проблемы прочности и пластичности*. – Т. 75. – № 4. – 2013. – С. 303-311.
12. **Rodriguez, T.** Splitting tests: an alternative to determine the dynamic tensile strength of ceramic materials / T. Rodriguez, C. Navarro, V. Sanchez-Galvez // *Journal de Physique IV*, 1994. – P.101-106.
13. Программный комплекс ANSYS. Аттестационный паспорт программного средства №327 от 18.04.2013.
14. **Надаи, А.** Пластичность и разрушение твердых тел / А. Надаи. – М.: Издательство иностранной литературы, 1954.

*Дата поступления
в редакцию: 20.10.2020*

O.Yu. Vilenskiy¹, S.A. Dushev¹, D.A. Lapshin¹, E.G. Novinskiy¹, V.A. Pakhomov¹,
A.M. Tatarskiy¹, M.A. Legchanov²

MATHEMATICAL MODELS OF STRUCTURAL MATERIAL DEFORMATION UNDER DYNAMIC LOADS FOR APPLIED PROBLEM SOLUTION IN NUCLEAR ENGINEERING

¹Afrikantov OKB Mechanical Engineering

²Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: To increase safety of the equipment under development.

Technology/approach: The paper implements the complex approach to design analysis performance for emergency situations caused by equipment falling based on observance of requirements to design model development and use of structural material properties under high-speed loading.

Substantiation: The mathematical model of structural material behavior under high intensity impact has been identified, and also verification of this model by comparison with the results of experiments has been performed.

Result: As a result of full-scale 3D modeling, design changes have been made to the equipment under development aimed at ensuring radiation safety with regard to situations related to possible equipment fall.

Key words: Mathematical deformation model, structural material, experimental study, movable equipment fall, dynamic loading, NPU safety.

С.Н. Пичков¹, Д.А. Захаров¹, А.А. Хлыбов²**ФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЛНОВОДНЫХ ЛИНИЙ ДЛЯ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ ЦЕЛОСТНОСТИ МЕТАЛЛА КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**¹Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова²Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты разработки системы акустико-эмиссионного контроля целостности металлических материалов и оборудования АЭС в процессе их эксплуатации. Показано, что в условиях длительной эксплуатации при высоких температурах, сложной геометрии объекта контроля, агрессивной среды, радиации, повышенного уровня помех при акустико-эмиссионном контроле можно использовать волноводные линии. Приводятся данные по выбору формы и размеров акустических трансформаторов, материала для волноводных линий, удовлетворяющих требованиям условий эксплуатации и обеспечивающих согласование с приборами акустико-эмиссионного контроля. Представлены экспериментальные данные по затуханию упругих волн, распространяющихся как в волноводе, находящемся на воздухе, так и в волноводе, погруженном в водную среду. Эти данные использовались при оптимизации волноводной линии. Описаны результаты экспериментов по отладке работоспособности системы в лабораторных условиях для различных волноводных линий и условий эксплуатации.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, упругие волны, скорость, затухание, волновод, неразрушающий контроль, безопасная эксплуатация ЯЭУ, техническая диагностика.

На стадии эксплуатации [1-6] ответственного оборудования атомных электростанций (АЭС) в ряде случаев главным критерием безопасной эксплуатации становятся дефекты, не только имеющиеся в конструкции, но и вновь образовавшиеся или развивающиеся. В процессе эксплуатации они могут привести к сбоям работоспособности оборудования (в том числе, разрушению или аварии) до очередного технического обслуживания. Для повышения безопасности на стадии эксплуатации такие дефекты необходимо найти и проанализировать степень их опасности. Результаты статистических исследований показывают, что при длительной эксплуатации число опасных дефектов в конструкции увеличивается и тем самым возрастает вероятность создания аварийной ситуации. Таким образом, задача обнаружения наиболее вероятных мест разрушения в процессе эксплуатации, прогнозирование их развития при котором они приводят к отказу является актуальной задачей.

Ядерные энергетические установки (ЯЭУ) эксплуатируются в сложных условиях: высокие температуры, коррозионная среда, повышенное давление, повышенный уровень радиации, а также множество других неблагоприятных факторов. Обеспечение безопасной эксплуатации оборудования ЯЭУ требует разработки новых подходов к диагностике и контролю целостности, позволяющих эксплуатировать конструкцию в сложных условиях. Условия безопасной эксплуатации также требуют, чтобы выбираемые методы неразрушающего контроля обеспечивали бы освидетельствование оборудования не только в ремонтный период, но и в процессе эксплуатации: именно в процессе эксплуатации происходит зарождение и развитие опасных дефектов. Среди современных методов неразрушающего контроля, пригодных для использования в процессе эксплуатации, является метод акустической эмиссии, основанный на анализе параметров сигналов акустической эмиссии (АЭ). [1-3]. В основе метода лежит физическое явление излучения упругих напряжений при быстрой локальной перестройке структуры материала: пластическая деформация, зарождение и распространение трещин. Возбуждение упругих волн возможно только при достижении критического значе-

ния напряжений в некоторой области контролируемой конструкции. Регистрируемые сигналы АЭ представляют собой поток случайно распределенных импульсов, накладывающихся друг на друга и вызывающих смещение поверхности конструкции. Частотный спектр сигнала АЭ меняется от единиц килогерц до нескольких мегагерц.

В качестве информативных параметров обычно используются:

- N – число регистрируемых импульсов;
- τ_n – длительность импульса;
- A – амплитуда регистрируемого сигнала;
- $\frac{dN}{dt}$ – интенсивность, число импульсов в единицу времени.

Каждый из перечисленных параметров несет информацию о процессах, происходящих в материале. Регистрируя и анализируя сигналы АЭ можно определить так же прочностные параметры, как начало пластической деформации, зарождение и развитие трещины. Если параметр не превышает заданной величины, то конструкция считается пригодной к эксплуатации. При превышении параметром заданной величины конструкция подвергается дополнительному контролю. Выбор критерия пригодности конструкции к эксплуатации по сигналам АЭ основан на связи параметров АЭ с процессами, протекающими в материале. В случае выявления источников в месте их расположения проводят обследование другими методами: ультразвуковым, радиационным, магнитным, проникающими веществами, другими. При этом сокращается объем применяемых методов неразрушающего контроля, поскольку нет необходимости проведение сканирования по всей поверхности ОК. Следует отметить, что использование методов неразрушающего контроля [8,9] (в частности, метода АЭ) при обеспечении безопасной эксплуатации оборудования ЯЭУ и использование результатов контроля при оценке выработанного ресурса, имеет важное значение.

По сравнению с другими методами [10, 11] неразрушающего контроля (НК) метод АЭ имеет ряд преимуществ:

- обнаружение зарождающихся и развивающихся дефектов в процессе эксплуатации;
- определение места расположения дефектов;
- обеспечение контроля в процессе эксплуатации конструкции или в процессе ее нагружения (это позволяет контролировать конструкцию в реальном масштабе времени и, как следствие, своевременно обнаружить дефекты при развитии аварийной ситуации);
- АЭ системы работают в дистанционном, автоматическом режиме практически в любом конструктивном узле энергетической установки, в том в не обслуживаемых радиационно опасных помещениях атомной станции.

Для АЭ контроля обычно используют пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП), чувствительным элементом которого является пьезокерамика. Температура пьезокерамики в процессе эксплуатации не должна превышать 300 °С. Это ограничивает возможности ее использования. Для защиты от коррозии необходимо использовать специальные изолирующие материалы. Также следует отметить стойкость керамики к радиации. Но работа обслуживающего персонала в условиях радиации практически невозможна. Датчик АЭ вырабатывает электрический сигнал при деформации поверхности исследуемого материала. Для обеспечения контроля пьезоэлектрические преобразователи размещают на поверхности контролируемого объекта. Пьезопреобразователь располагается в зоне расположения наиболее вероятного дефекта. Это обеспечивает наиболее высокую чувствительность, минимальную вероятность пропуска развивающегося дефекта.

Известно, что условия эксплуатации энергетических установок являются сложными (высокая температура, радиация, химически агрессивная среда), а также сложность замены пьезопреобразователей установка датчиков в зоне предполагаемого расположения дефектов невозможна. Требуется защита датчиков от указанных выше воздействий. Одним из возможных направлений решения такой задачи является размещение чувствительных пьезопреоб-

разователей вне зоны экстремальных воздействий. Для передачи сигналов АЭ используются конструкции из материалов, обеспечивающие распространение упругих волн на значительные расстояния в выбранном диапазоне частот. Наиболее простым и надежным способом передачи акустических колебаний на пьезопреобразователь является использование волноводов. Волновод – это канал с резкими границами в виде стенок, свойства которых резко отличаются от свойств внутренней и наружной сред. В качестве такой среды в данной работе рассматриваются металлические стержни (проволока) с различной формой поперечного сечения. В данной работе использовалась проволока из стали аустенитного класса.

При выборе волноводов необходимо учитывать поперечные размеры и длину упругой волны, так как это влияет на условия распространения упругих волн. Для используемого на практике диапазона частот АЭ-сигнала длина упругой волны, распространяющейся в волноводе, больше или сравнима с поперечными размерами волновода. При таких условиях на боковых границах волновода исчезают механические напряжения, влиянием границ можно пренебречь. В результате наблюдается ряд явлений.

1. Распространяются только упругие волны, векторное поле смещений которых удовлетворяет условию исчезновения на боковой поверхности упругих напряжений. Такие волны принято называть нормальными волнами: они распространяются без изменения формы.

2. Для данной частоты возбуждения одновременно могут существовать несколько нормальных волн, различающихся распределением поля смещений по сечению. Амплитуда колебаний в результирующей волне является суперпозицией колебаний в каждой из нормальных волн.

3. Скорость распространения упругих волн зависит от частоты, имеет место так называемая дисперсия скорости звука. Дисперсия приводит к искажению акустико-эмиссионного импульса. При узкополосном сигнале форма волны меняется, но форма ее огибающей остается без изменения. При распространении широкополосного сигнала меняет свою форму и огибающая. Для импульсных АЭ сигналов это приводит к значительной ошибке при определении местоположения источника АЭ.

Резонансная частота однородного тонкого волновода со свободным концом определяется по формуле [1] (1):

$$F_0 = \frac{C \cdot k}{2 \cdot L} \quad (1)$$

где L – длина волновода; C – скорость звука; $k=1, 2, 3, \dots$ – порядок гармоники.

Из компромиссных соображений обеспечения помехозащищенности и минимального затухания сигнала АЭ в объекте контроля частотный диапазон приема сигналов выбирается обычно в пределах 0,1... 2,0 МГц. Это условие обеспечивается используемой аппаратурой. В зависимости от конкретных условий распространения сигнала, наличия помех, и характеристик используемого преобразователя рабочую полосу частот выбирают более узкой 100...300 кГц.

Для волноводов, в которых распространяется продольная волна в диапазоне частот 100...300 кГц, справедливо соотношение (2):

$$d \cdot f / C \leq 0.4 \quad (2)$$

где d – диаметр волновода; f – частота; C – скорость продольной волны.

Рассматриваем случай, когда распространяется только одна продольная волна [2]. Скорость распространения продольной волны в стальных волноводах порядка 6000 м/с. Конструкция волноводов для передачи сигналов АЭ должна выбираться таким образом, чтобы диапазон рабочих частот находился намного выше его нижней резонансной частоты. При длине стального волновода 0,5 м низшая частота собственных продольных колебаний, рассчитанная по формуле (2.1), составит $f_i \approx 5$ кГц. Длина стального волновода определяется условиями размещения приемных датчиков АЭ: от зоны контроля до зоны установки датчиков.

Если диапазон регистрации занимает полосу частот от 100 до 200 кГц. Возбуждение волновода на таких высоких частотах дает существенные преимущества: отдельные резонансные пики от различных мод, накладываясь один на другой, дают относительно плавную кривую зависимостей переходного импеданса и передаточной функции волновода от частоты [3].

Из условия (2), а также из условий размещения датчиков относительно зоны контроля, для передачи сигналов АЭ целесообразно применять волноводы диаметром 0,8...3,0 мм. Полученные экспериментальные данные показали, что для выбранного поперечного сечения наблюдается лишь некоторое расплытие волнового пакета, которое не оказывает существенного влияния на принимаемые АЭ сигналы.

Диаметр приемного датчика АЭ (порядка 10 мм), согласованного с АЭ аппаратурой значительно превышает диаметр используемых волноводных линий, поэтому крепление АЭ преобразователей к волноводу с другим диаметром представляет собой сложную задачу с точки зрения стабильности получаемых характеристик. Поскольку пьезопреобразователи имеют диаметр больше диаметра волновода, то для согласования волновода с датчиком необходимо использовать акустические концентраторы, которые трансформирует нагрузку, приложенную к входному концу, до некоторого значения на его выходе. Коэффициент трансформации:

$$K = Z_{\text{вх}}/Z_{\text{вых}} = S_{\text{вх}}/S_{\text{вых}} \quad (3)$$

где $Z_{\text{вх}}$ – нагрузка на входном конце; $Z_{\text{вых}}$ – нагрузка на выходном конце; $S_{\text{вх}}$ – площадь входного торца; $S_{\text{вых}}$ – площадь выходного торца.

На практике наибольшее распространение получили концентраторы трех типов: ступенчатые, конические и экспоненциальные (рис. 1). Диаметр концентратора определяется диаметром волновода с одной стороны и диаметром ПЭП, с другой стороны. Длина концентратора определяется длиной волны на резонансной частоте.

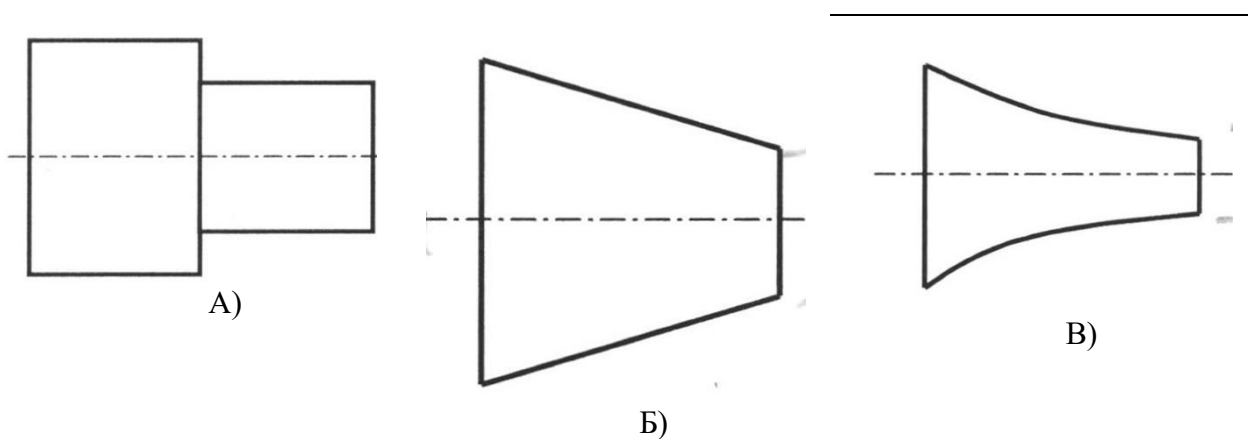


Рис. 1. Типы концентраторов:

А – ступенчатый, Б – конический, В – экспоненциальный

Из представленных концентраторов минимальное искажение и переотражение сигнала имеют экспоненциальные концентраторы. Концентратор выполняется из того же материала, что и волновод, и соединяется с ним при помощи сварки.

Проведем экспериментальные исследования [2] волноводных линий, изготовленных из стальной проволоки (сталь 12Х18Н10Т) диаметром 3 мм длиной 10, 8, 6 и 5 м. В испытаниях использовали волноводы из неотожженной и отожженной проволоки. Отжиг применяли для получения однородной аустенитной структуры, температура отжига при 1050°C с охлаждением с печью. К одному концу волновода был приваривали экспоненциальный концентратор, служащий для согласования волновода с ПЭП. Другой конец волновода при-

варивали к стальной пластине, имитировавшей контролируемую поверхность. Схема размещения датчиков и приварки волноводной линии представлена на рис. 1.

Для регистрации и анализа АЭ сигналов использовали акустико-эмиссионную систему DiSP-8, работающую в режиме анализа формы сигнала, с комплектом среднечастотных резонансных датчиков типа R15I (резонансная частота 150 кГц) со встроенным малошумящим предварительным усилителем на 40 дБ. Имитацию сигналов АЭ осуществляли ПЭП типа П113 (0,02-0,2), возбуждаемого электрическими импульсами от генератора прямоугольных импульсов Г5-54, обеспечивающего: частоту следования импульсов – 10 Гц; амплитуда генерируемых импульсов – 60 В; длительность возбуждающего электрического импульса – 0,1 мкс. Схема расположения имитирующих датчиков представлена на рис. 1. Датчики располагали следующим образом: ПЭП № 1 устанавливали рядом с местом приварки волновода к поверхности пластины; ПЭП № 2 при помощи механического прижима крепили к широкому концу концентратора. Преобразователь-имитатор АЭ сигналов ПЭП № 3 устанавливали на поверхность пластины рядом с ПЭП №1 (рис. 2). Для обеспечения акустического контакта установку датчиков производили через слой контактной смазки, в качестве которой использовали литол.

Одним из важнейших показателей, обеспечивающих возможность применения волноводных линий является затухание упругих волн в волноводной линии. Для измерения затухания сигналов проводили сравнение амплитуд сигналов, полученных с ПЭП № 1 и № 2. Все волноводные линии испытывали как в обычных условиях (на воздухе), так и погруженные в емкость с водой. Перед погружением в воду волновод скручивали спиралью с применением текстолитовых стоек-изоляторов для исключения касания витков спирали между собой (рис. 3). Для имитации акустических помех в условиях, когда объект контроля работает в воде, производили сломы стержня карандаша диаметром 0,5 мм и твердостью 2Н на стенках емкости. Генератор прямоугольных импульсов отключали. Результаты измерения затухания сигналов АЭ при прохождении через волноводные линии различной длины приведены на рис. 4.

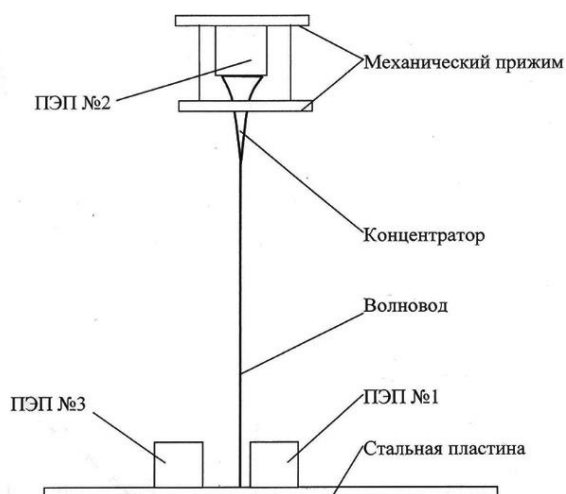


Рис. 2. Эскиз волноводной линии с указанием мест установки ПЭП

Из рис. 4 следует, что затухание АЭ сигналов при нахождении волноводной линии в водной среде больше, чем на воздухе, т.к. граница раздела металл-вода более «прозрачна» для сигналов АЭ, чем граница металл-воздух. Отжиг волноводной линии позволил несколько снизить затухание, что немаловажно при использовании волноводов большой длины, до 10 м и более. При сломах стержня карандаша на стенках емкости с водой в обоих акустических каналах наблюдали сигналы, что говорит о хорошем проникновении акустических помех через воду в волновод, а затем в приемные тракты аппаратуры. Для избавления от этих помех необходимо оградить волновод от контакта с водой при помощи чехловой трубы.

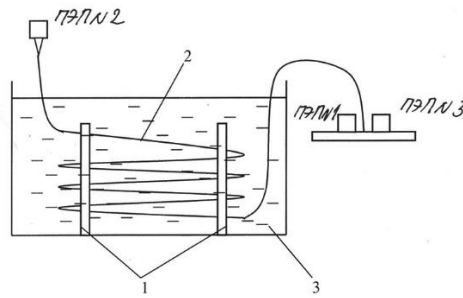


Рис. 3. Схема испытаний волноводной линии в воде:

1 – стойки-изоляторы; 2 – испытываемая волноводная линия; 3 – емкость с водой

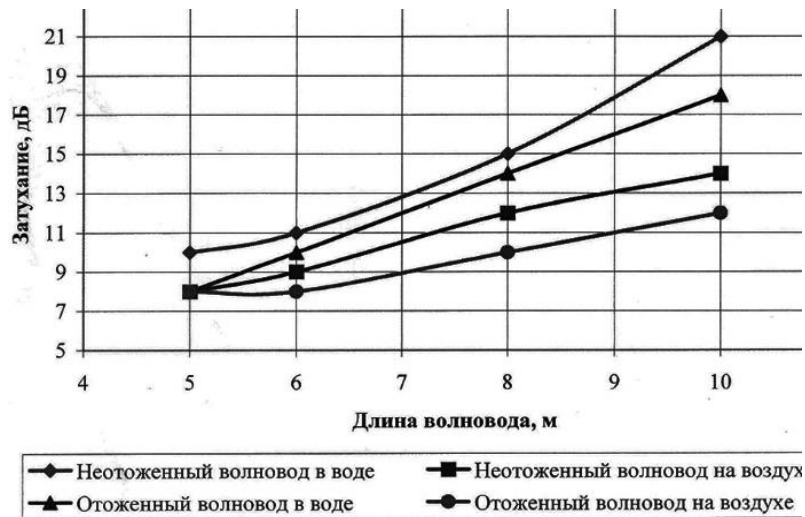


Рис. 4. Затухание сигналов АЭ при прохождении через волноводные линии различной длины

На рис. 5-7 приведены формы сигналов, полученные с ПЭП № 1 и № 2. Формы сигналов, полученные при испытании в воде неотожженного волновода длиной 10 м, показаны на рис. 5. На 1-ой осциллограмме изображен АЭ сигнал, прошедший через волновод (ПЭП № 2), на 2-ой сигнал, полученный в месте приварки волновода к пластине (ПЭП № 1). Импульс, прошедший через волновод, имеет пологий передний фронт, его максимум смещается вправо по оси времени, что отрицательно скажется на определении координат источника сигнала.

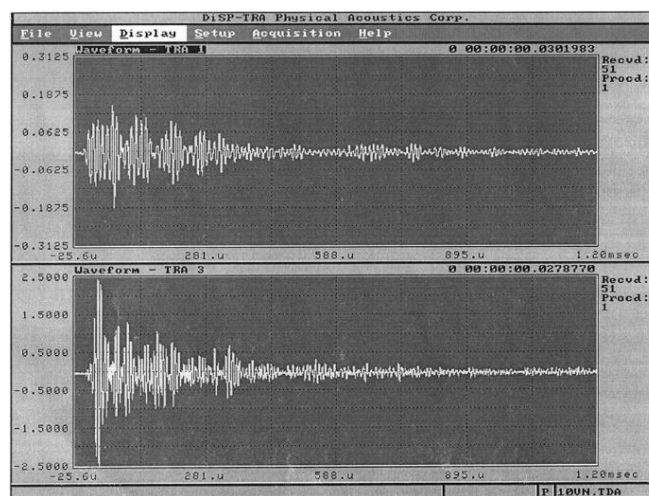


Рис. 5. Формы сигналов АЭ, полученных при испытании неотожженного волновода, длина 10 м

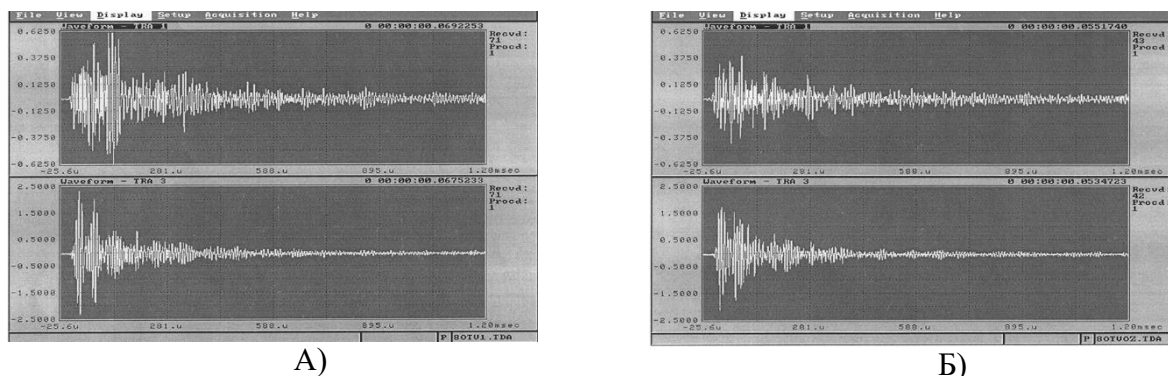


Рис. 6. Форма сигнала АЭ при испытании отожденного волновода длиной 8 м:

А) в воде, Б) на воздухе

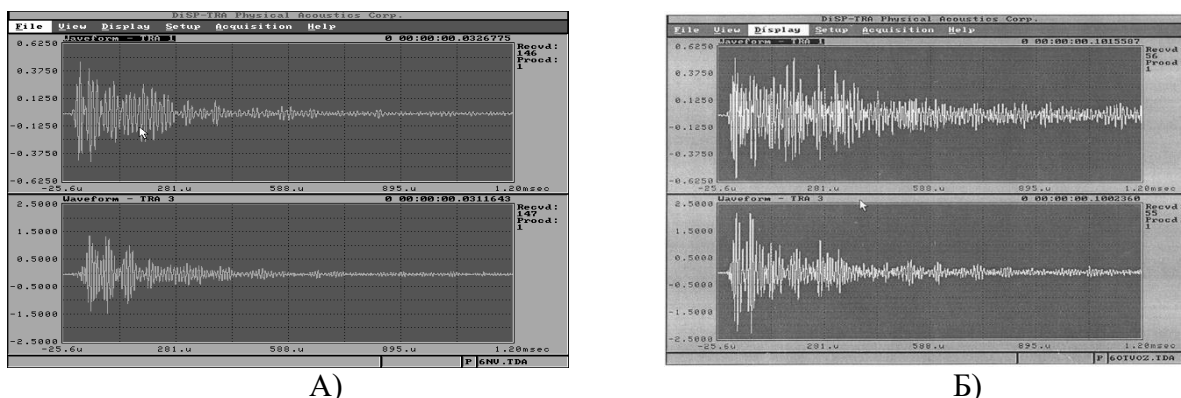


Рис. 7. Форма сигнала АЭ при испытании отоженного волновода длиной 6 м:

А) в воде, Б) на воздухе

На рис. 6 (А, Б) изображены осциллограммы, полученные при испытании 8-ми метровых волноводов. Форма импульса, прошедшего через волноводную линию, также имеет пологий передний фронт, и максимум смещен по времени.

На рис. 7 (А, Б) изображены осциллограммы, полученные при испытании 6-ти метровых волноводов (осциллограммы, полученные для 5-ти метровых волноводов, имеют схожую форму). Форма импульса, прошедшего через волновод, мало отличается от принятой с поверхности пластины. С учетом относительно небольшого затухания (величиной 8 дБ) можно сказать, что регистрация АЭ сигналов с помощью волноводной линии длиной 5-6 м принципиально не отличается от регистрации непосредственно с поверхности контролируемого объекта и не оказывает значительного влияния на процесс локализации источников АЭ.

Проведенные исследования показали, что:

- использование волноводных линий расширяет возможности акустико-эмиссионного метода контроля развивающихся дефектов в оборудовании ЯЭУ (сварные соединения корпусов реакторов, насосов, парогенераторов и др.);
- контролируемые зоны подводных объектов контроля могут быть расположены на глубине до 6 м.

Библиографический список

1. Акустическая эмиссия и ее применение для неразрушающего контроля в ядерной энергетике / под ред. К.Б. Вакара. – М.: Атомиздат, 1980. – 216 с.
2. Прочность и акустическая эмиссия материалов и элементов конструкций / В.А. Стрижало, Ю.В. Добровольский, С.Н. Пичков [и др.]; отв. ред. Г.С. Писаренко. – Киев: Наук. думка, 1990. – 232 с.

3. **Пичков, С.Н.** Исследования кавитационных процессов в насосном оборудовании акустическим методом / С.Н. Пичков, Д.А. Захаров, Э.Г. Новинский // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – № 4 (123).
4. ПНАЭ Г-01-011-97 (ОПБ 88/97) Общие положения обеспечения безопасности атомных станций.
5. **Митенков, Ф.М.** Методы обоснования ресурса ядерных энергетических установок / Ф.М. Митенков, В.Б. Кайдалов, Ю.Г. Коротких, С.Н. Пичков. – М.: Машиностроение, 2007. – 445 с.
6. **Хлыбов, А.А.** Обеспечение эксплуатации крупногабаритных конструкций по техническому состоянию: Монография / А.А. Хлыбов. – Н. Новгород: НГПУ, 2008. – 136 с.
7. **Голямина, И.П.** Ультразвук. Маленькая энциклопедия / И.П. Голямина. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.
8. **Клюев, В.В.** Неразрушающий контроль. Том 3. Ультразвуковой контроль / В.В. Клюев. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.
9. **Иванов, В.И.** Метод акустической эмиссии. Неразрушающий контроль: Справочник / В.И. Иванов, И.Э. Власов. В 7 т. Под общ. ред. В.В.Клюева. Т. 7. Кн. 1. М.: Машиностроение. 2005. – 340 с.
10. **Иванов, В.И.** Акустико-эмиссионная диагностика: справ / В.И. Иванов, В.А. Барат. – М.: Издательский дом «Спектр», 2017. – 368 с.
11. **Шайбаков, Р.А.** Помехоустойчивый метод акустико-эмиссионного мониторинга резервуаров / Р.А. Шайбаков, Д.Г. Давыдова, А.Н. Кузьмин, Н.Х. Абдрахманов., А.Г. Марков // Нефтегазовое дело. – 2013. – №4. – С. 448-464.
12. **Шемякин, В.В.** Аспекты применения метода акустической эмиссии для мониторинга опасных промышленных объектов / В.В. Шемякин, С.А. Стрижков // В мире неразрушающего контроля. – 2004. – №4. – С. 16-19.

*Дата поступления
в редакцию: 01.10.2020*

S.N. Pichkov¹, D.A. Zakharov¹, A.A. Khlybov²

PHYSICAL ASPECTS OF THE USE OF WAVEGUIDE LINES FOR ACOUSTIC-EMISSION CONTROL OF THE INTEGRITY OF THE METAL OF HULL STRUCTURES OF NUCLEAR POWER FACILITIES

¹Afrikantov OKB Mechanical Engineering

²Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: The article presents the results of work on the development of a system for acoustic emission control of the integrity of metal materials and equipment of nuclear power plants during their operation.

Findings: It is shown that in conditions of long-term operation at high temperatures, complex geometry of the control object, aggressive environment, radiation, high noise level and other complex operating conditions, waveguide lines can be used for acoustic emission control.

Data on the choice of shape and size of acoustic transformers, the choice of material for waveguide lines that meet the requirements of operating conditions and ensure compliance with acoustic emission control devices are provided. Experimental data on the attenuation of elastic waves propagating both in a waveguide located in air and in a waveguide immersed in an aqueous medium are presented. This data was used to optimize the waveguide line.

Results: The results of experiments on debugging the system's operability under laboratory conditions for various waveguide lines and operating conditions are described.

Key words: acoustic emission, elastic waves, speed, attenuation, waveguide, non-destructive testing, safe operation of nuclear power plants, technical diagnostics.

А.Н. Соколов¹, А.А. Баринов¹, А.Е. Хробостов², И.А. Коновалов², А.А. Чесноков²

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ВАРИАНТНЫХ РАСЧЕТОВ ПО ОБОСНОВАНИЮ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ ВОДО-ВОДЯНОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

¹Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова

²Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлена методика проведения вариативных расчетов при проектировании перспективных комплексов систем безопасности. Изложена методология генерации наборов варьируемых технических параметров реакторной установки, а также предложены способы визуального представления пространства решений, получаемых в результате вариативных расчетов. Апробация представленной методики производилась на примере поиска пространства решений для системы аварийного расхолаживания и системы охлаждения активной зоны в условиях аварии ЛОСА при помощи связки расчетных кодов КУПОЛ-МТ-КОРСАР/BR.

Ключевые слова: вариативные расчеты, система аварийного расхолаживания, система аварийного охлаждения активной зоны, водо-водяной реактор.

Введение

На современном этапе развития атомного машиностроения одной из важнейших задач является разработка и расчетное обоснование инновационных комплексов систем безопасности (КСБ), построенных на пассивных принципах действия, в части требуемого состава систем, алгоритмов их работы и режимных параметров. Составной частью работ по обоснованию КСБ и их отправной точкой при этом должно являться определение области технических параметров реакторной установки (РУ), при которых КСБ может быть реализован и выполнять свои функции. Далее данную область параметров будем называть пространством решений, имея в виду, что каждая точка данного пространства представляет собой комбинацию технических параметров КСБ, обеспечивающих решение задачи безопасности РУ. По своей сути пространство решений представляет собой все возможные варианты корректно (с точки зрения решаемых задач) спроектированного КСБ. В то же время очевидно, что не все эти варианты являются оптимальными с той или иной точки зрения (могут содержать излишние запасы сред, быть металлоемкими, дорогими в изготовлении, нереализуемыми с точки зрения компоновки и т.д.)

Для нахождения пространства решений необходимо определить, какие функции должен выполнять КСБ, что является «критерием(-ями) успеха», какие технические параметры реакторной установки (как относящиеся непосредственно к КСБ, так и к другим системам) влияют на функционирование комплекса, какие комбинации величин технических параметров, обеспечивают выполнение комплексом своих функций?

Получение пространства решений позволяет перейти к проведению технико-экономической оптимизации параметров реакторной установки для определения оптимальных конфигураций КСБ, явлений и технических решений, требующих экспериментальной проверки и обоснования (составление плана НИОКР) и проведению анализа чувствительности и неопределенности расчетов поведения реакторной установки в аварийных режимах; которые являются следующими шагами проектирования.

В рамках данной работы рассматриваются методические задачи, встающие при нахождении пространства решений, и заключающиеся в получении наборов технических параметров РУ, необходимых для выполнения вариантных расчетов, а также визуальном

представлении пространства решений, с учетом его многомерности, для выбора целесообразных конфигураций КСБ. Рассмотрение указанных задач производилось на примере поиска пространства решений для системы аварийного расхолаживания (САР) и системы охлаждения активной зоны (САОЗ), входящих в состав КСБ интегрального реактора. исходя из моделирования постулируемой аварии с потерей теплоносителя первого контура (Loss Of Coolant Accident, LOCA) с полным мгновенным разрывом трубы наибольшего поперечного сечения (реактор-компенсатор давления) с наложением дополнительных отказов.

Описание рассматриваемого КСБ

В качестве систем безопасности рассматривается применение двух возможных вариантов комбинированных систем разработки АО «ОКБМ Африкантов», изображенных на рис. 1. Обе указанных системы позволяют осуществлять аварийный теплоотвод, а также имеют возможность совмещения функций безопасности и нормальной эксплуатации (приемника тепла для планового расхолаживания-разогрева РУ). Теплоотвод осуществляется в двух режимах:

- при работе обоих теплообменников системы. Лимит времени работы в данном режиме ограничен запасами воды, испаряемой из цистерны (ЦАР) водяного теплообменника. Достижимая мощность теплоотвода при этом максимальна и рассчитывается, исходя из необходимой мощности теплоотвода на первом этапе аварии при высоких значениях остаточных тепловыделений и высоком давлении в 1 контуре в авариях LOCA;
- при работе только воздушного теплообменника. Системы переходят в данный режим автоматически после исчерпания запасов воды в ЦАР. Достижимая мощность теплоотвода при этом значительно ниже, чем при работе с двумя теплообменниками системы, однако при этом отсутствует лимит времени работы, т.к. тепло передается неограниченному по теплоемкости конечному поглотителю – атмосферному воздуху.

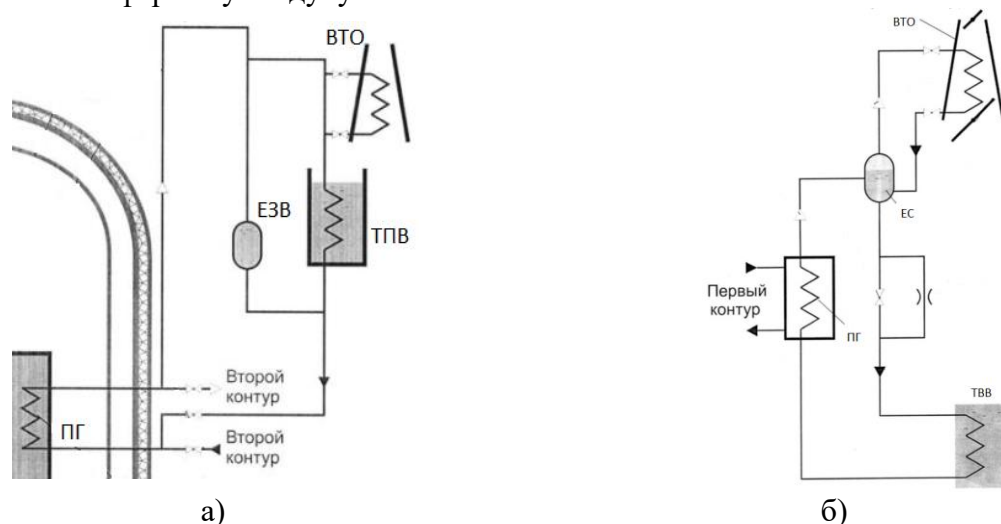


Рис. 1. Схемы вариантов систем аварийного расхолаживания:

- ПГ – парогенератор; ЕЗВ – емкость запаса воды; ВТО – воздушный теплообменник-конденсатор;
 ТПВ – теплообменник пар-вода; ТВВ – теплообменник вода-вода; ЕС – емкость-сепаратор
 а) комбинированная система с водяным и воздушным теплообменниками-конденсаторами [1];
 б) комбинированная система с воздушным теплообменником-конденсатором
 и низкорасположенным водяным теплообменником [2]

Системы имеют различные динамические характеристики (поведение в переходных процессах), преимущества и недостатки, определяющие целесообразность применения того или иного варианта для конкретного проекта. Предложенная САОЗ аналогична пассивному каналу САОЗ головной реакторной установки РУ РИТМ-200, примененной для атомного ледокола типа «Арктика». Схема системы представлена на рис. 2.

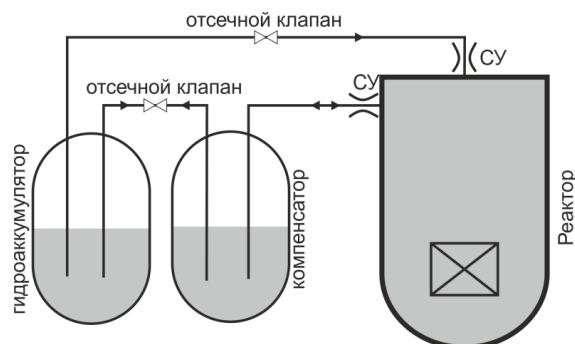


Рис. 2. Схема системы аварийного охлаждения активной зоны, совмещенной с системой компенсации давления

САОЗ состоит из гидроаккумулятора (ГА) и трассы «гидроаккумулятор-реактор» с отсечной арматурой и сужающим устройством между ними. В нормальной эксплуатации ГА выполняет функции компенсации давления, для чего гидроаккумулятор соединен с компенсатором давления (КД) по воде трассой с отсечной арматурой. При возникновении аварийного сигнала по падению давления первого контура закрывается отсечная арматура на трассе «КД-ГА» и открывается арматура на трассе «ГА-реактор». Конкретный алгоритм ввода системы в работу может меняться в проекте. При снижении давления в реакторе возникает превышение давления в ГА над давлением в реакторе и за счет перепада давлений возникает расход, компенсирующий истечение из реактора в разрыв. Тем самым, уровень в реакторе поддерживается необходимым для обеспечения однофазной циркуляции по 1 контуру (через верхние переливные окна парогенератора ПГ). Охлаждение активной зоны за счет работы САОЗ происходит за счет низкой температуры недогретой воды, приходящей из ГА в реактор. В реакторе вода может нагреваться до линии насыщения при давлении в 1 контуре и испаряться, осуществляя теплосъем от активной зоны и уходя в разрыв в виде пара. Таким образом, рассматриваемые системы имеют ряд параметров, варьируемых в широком диапазоне и оказывающих наибольшее воздействие на работоспособность данных систем, что обуславливает целесообразность применения изложенной далее методологии.

Методика вариантных расчетов

Генерацию точек K -мерного пространства параметров целесообразно производить в нормализованном виде $\overline{P}_i^k \in [0,1]$, где каждая размерность свернута в единичный отрезок. Таким образом облегчается визуализация и анализ распределений параметров, в то время как получение конкретной расчетной комбинации из нормализованного вида производится при помощи перенормировки на соответствующие диапазоны изменения параметров $P_i^k = \overline{P}_i^k \cdot (P_{\max}^k - P_{\min}^k) + P_{\min}^k$.

Наибольшее развитие методы вариантных расчетов получили в задачах инженерной многопараметрической оптимизации. По этой причине дальнейшее рассмотрение ведется в терминах задач оптимизации несмотря на то, что решаемая в рамках отчета задача поиска

пространства решений является лишь предшествующим для оптимизации шагом. Введем специфическую для данной задачи терминологию и обозначения.

D – K -мерное непрерывное пространство поиска;

x – набор (вектор) размерности K варьируемых параметров $x \in D \subset \mathfrak{R}^K$. Как правило каждый варьируемый параметр набора имеет свой физически обусловленный диапазон значений $x_i \in [x_i^0, x_i^1]$, который нормируется путем преобразования $\frac{x_i - x_i^0}{x_i^1 - x_i^0}$ в единичный

отрезок $[0,1]$ для удобства представления. Таким образом 0 соответствует нижней границе диапазона i -го параметра, а 1 – верхней границе.

$f(x)$ – целевая функция. Это некоторая величина, отвечающая конкретному набору (вектору) варьируемых параметров (примером может служить вес крыла самолета в зависимости от его параметров: размеров, грузоподъемности, скорости, мощности двигателей и т.д.).

Бюджет расчетов N – максимальное число вариантных расчетов, доступное инженеру для проведения расчетного анализа, который обусловлен различными факторами, главные из которых – доступное процессорное время и средняя вычислительная сложность одного расчета.

$X(1:N)$ – план вариации, представляющий собой некоторую совокупность векторов x в количестве N штук, сгенерированных для проведения вариантных расчетов. X является дискретным подмножеством D .

Генерация наборов параметров для вариантных расчетов может выполняться с использованием нескольких подходов.

Вариация задачи с K параметрами может быть выполнена в т.н. полнофакторном подходе. При этом, если диапазон каждого параметра представляется при помощи n значений, то полное число расчетных вариантов равняется $\prod_{i=1}^K n = n^K$. Полнофакторное

пространство поиска в случае $K=3$ может быть представлено (в нормированном виде) как единичная кубическая область с равномерным заполнением точками плана вариации (рис. 3).

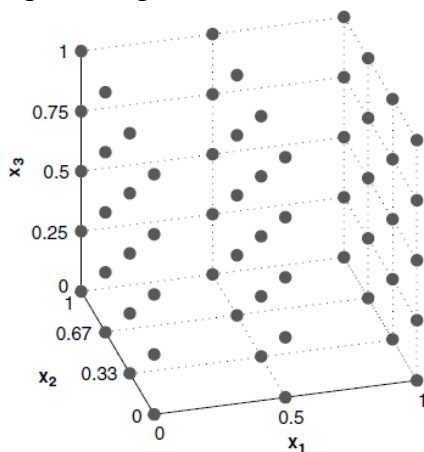


Рис. 3. Пространство поиска для $K=3$ параметров в полнофакторном подходе для 3, 4 и 5 вариаций соответственно

Естественно, что для многокритериальных задач число точек для исследования пространства поиска в полнофакторном подходе растет экспоненциально. Еще одним недостатком данного подхода является планов вариации строго определенного размера (например, нельзя «уложить» бюджет из доступных 17-ти расчетов в рамки данного подхода для K -параметрической задачи, т.к. простое число 17 не может быть получено перемножением K чисел больше 1 и меньше 17-ти). Преимуществом полнофакторного подхода является наилучшая «заполняемость» пространства поиска вариантными комбинациями, по-

сколькx план вариации полностью регулярен. Другим подходом является т.н. метод латинского гиперкуба (Latin Hypercube Sampling, LHS), при котором доступный бюджет из N расчетов распределяют по пространству поиска таким образом, чтобы получались однозначные и регулярные проекции из N точек на каждую его размерность (рис. 4).

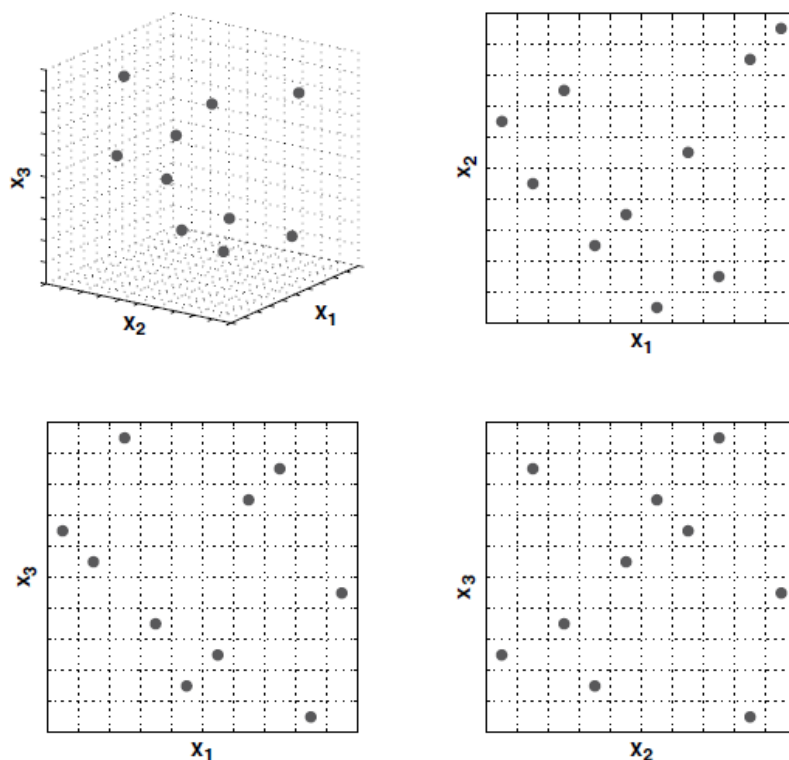


Рис. 4. Пространство поиска для $K=3$ параметров в подходе латинского гиперкуба (бюджет из $N=10$ вариантных расчетов, показан один из возможных вариантов)

Недостатком такого подхода является существование множества различных комбинаций (планов вариации), удовлетворяющих данному условию, причем их число резко растет вместе с ростом числа параметров и вариантных разбиений (например, в пространстве $K=2$ параметров для $N=4$ точек число возможных комбинаций равно 576, а уже для $N=8$ точек – 108 776 032 459 082 956 800, не говоря о задачах с большим числом параметров). Данный недостаток приобретает значимость в том свете, что в отличие от полнофакторного метода, «заполняемость» пространства методом латинского гиперкуба может быть недостаточной (так, например, для $K=2$ -мерной задачи требованиям разбиения удовлетворяет набор из вариантных расчетов, стоящих на любой диагонали квадрата, что, конечно, не оптимально с точки зрения заполнения области). Таким образом, для данного разбиения требуется:

а) генерация комбинаций параметров согласно требованиям латинского гиперкуба, что является отдельной задачей вследствие большого числа возможных комбинаций;

б) диагностика конкретных вариантов комбинаций на «заполняемость» пространства поиска, для чего существует ряд критериев (критерий максимина Джонсона [3] или тай-брейк Морриса и Митчела [4]). При неудовлетворительном заполнении необходимо подобрать другую комбинацию параметров. Как правило, вычислительная сложность подбора комбинации из N расчетов с приемлемым заполнением при помощи подхода латинского гиперкуба весьма велика, поэтому ограничиваются определенным количеством процессорного времени на поиск комбинаций и выбирают наилучшую из получившихся. Методы генерации плана вариации в данном подходе, а также метрика для их сравнения подробно описана в [5]. Существует также подход к составлению плана вариации при

помощи генератора случайных чисел [6] – в этом случае генерируемый план вариации оказывается максимально нерегулярным (как по отдельным проекциям, так и в целом по пространству). Такой подход оправдан при исследовании вероятностного распределения целевой функции, например при исследованиях робастности. Однако, как правило, для задач с небольшим бюджетом вычислений такой подход дает крайне неравномерную заполняемость пространства поиска, что негативно сказывается на показателности вариантных расчетов, в том числе – с точки зрения поиска пространства решений. В некоторых случаях, однако, строго регулярное распределение является нежелательным – например, при наличии гармонического отклика целевой функции на некоторые параметры.

В данной работе был выбран метод латинского гиперкуба, вследствие ограниченности бюджета вычислений (N порядка 100), достаточно большой ($K=4$) размерности пространства поиска и относительно высокой вычислительной сложности расчетов (один расчет занимает порядка 6,5 часов процессорного времени на ПК с Core i5-3450 8Gb ОЗУ в режиме загрузки 4 ядер).

Методология определения пространства решений для КСБ при аварийных ситуациях, связанных с LOCA

Задачей начального этапа ставилось определение критериев успеха при поиске пространства решений, под которыми в рамках данной работы подразумевается сохранение значения определенного численного параметра, характеризующего состояние РУ и/или систем, в указанном диапазоне в течении рассматриваемого промежутка времени. Выполнение критерия успеха для того или иного сочетания параметров означает принадлежность данного сочетания к пространству решений. В настоящем анализе критерием успеха принимается поддержание уровня над а.з. не ниже верхнего среза чехла кассет ПГ в течение расчетного (3 суток) интервала времени. Такой выбор обусловлен тем, что в авариях с потерей теплоносителя первого контура (LOCA) сохранение температуры топливной матрицы и оболочки ТВЭЛов в допустимых пределах гарантируется при сохранении уровня внутри реактора над верхним срезом активной зоны в течение необходимого времени.

На следующем этапе была определена номенклатура варьируемых параметров РУ, составляющих пространство поиска (табл. 1).

Таблица 1

Номенклатура и диапазоны варьируемых параметров применительно к поиску пространства решений для САР и САОЗ

| № | Наименование параметра | Обозначение |
|---|---|-------------|
| 1 | Относительная полная мощность САР при температуре 1 контура на выходе а.з. 300 °С и наличии однофазной циркуляции по 1 контуру в диапазоне 5-7% от расхода на номинальном уровне мощности | _kNSar |
| 2 | Запас воды в цистерне теплообменника вода-вода (ЦАР) | _mv0Tvv |
| 3 | Объем ГА САОЗ, совмещенных с системой КД | _vGa |
| 4 | Эквивалентный диаметр дроссельной шайбы, через который осуществляется проливка ГА в разрывной аварии | _dDrossGa |

Таким образом, поиск пространства решений осуществляется в $K = 4$ -мерном пространстве поиска. Для проведения вариантных расчетов использовалась итерационная расчетная модель в коде КОРСАР/BR [7], составленная по объектному принципу и состоящая из трех моделей: парогенерирующего блока, системы компенсации давления (включающей ГА САОЗ) и системы залива кессона реактора водой.

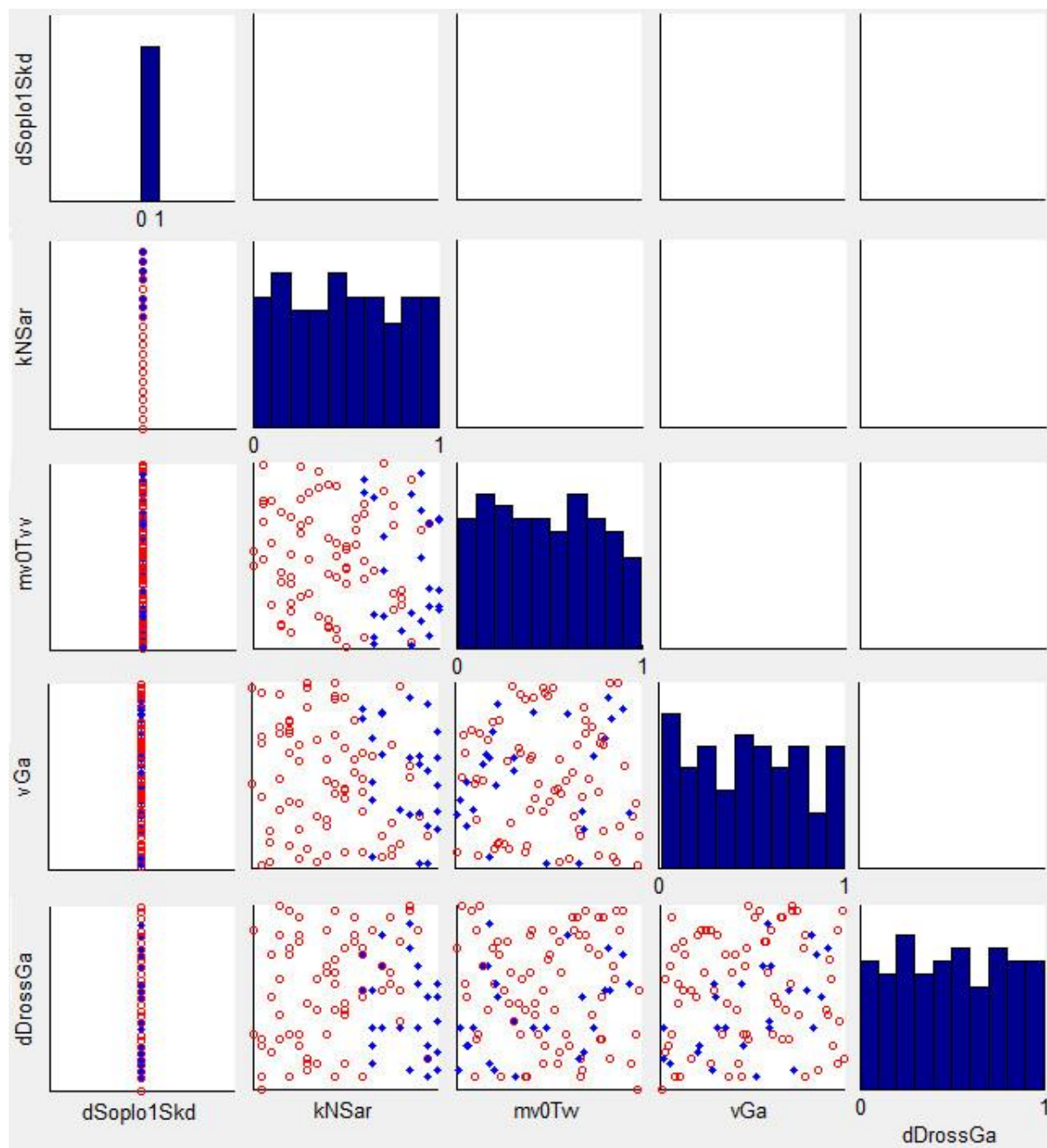


Рис. 5. $K=5$ параметрическое пространство поиска с вариацией 4-х параметров

Итерационная расчетная модель создана в следующих предпосылках:

- 4 петли 1 контура моделируются эквивалентно (предполагается симметрия параллельных внутриреакторных трактов). Распределение объема воды 1 контура, геометрические параметры, основные массы металлоконструкций приведены в соответствии с проектными значениями;
- мощность остаточных тепловыделений задавалась в виде объемного источника тепла в эквивалентной металлоконструкции а.з. и определялась по формуле Пологих [8] для первых 72 часов после сброса АЗ реактора с учетом предыстории его работы на номинальном уровне мощности.

Для выполнения вариантных расчетов в автоматизированном режиме в ходе работы была создана утилита Uq. Утилита Uq позволяет производить формирование необходимых

сочетаний варьируемых параметров, подготовку расчетной директории, пакетный запуск и обработку результатов расчетов на нескольких ядрах ПК. Утилита адаптирована для проведения вариантных расчетов при помощи связки кодов КУПОЛ-МТ-КОРСАР/BR с текстовой зоной задания. Генерация расчетных комбинаций в рамках данной работы осуществлялась по методу LHS с бюджетом в 100 расчетов.

Обработка результатов расчетов производилась при помощи пакетного запуска утилитой Uq программы-обработчика (получение временных реализаций расчетных параметров при помощи утилиты KUTIL2 кода КОРСАР/BR) и набора скриптов пакета Matlab (группировка и отбор реализаций по критериям успеха, визуализация пространства параметров и основных зависимостей). В качестве критериев успеха для данной серии расчетов было принято одновременное выполнение следующих условий:

- 1) расчет достиг конца интервала моделирования (72 часа = 259200 сек) аварии;
- 2) уровень в реакторе не опускался ниже 0,7 отн.ед. над а.з. за время моделирования.

Анализ результатов

Для визуального представления результатов проведенных вариантных расчетов было выбрано несколько форматов сводных диаграмм. На рис. 5 представлены двумерные проекции комбинаций параметров из полного пространства поиска и подмножества пространства решений (закрашенные точки), определенного в ходе вариантных расчетов. Визуализация результатов расчетов по достигнутому времени выполнения представлена на рис. 6.

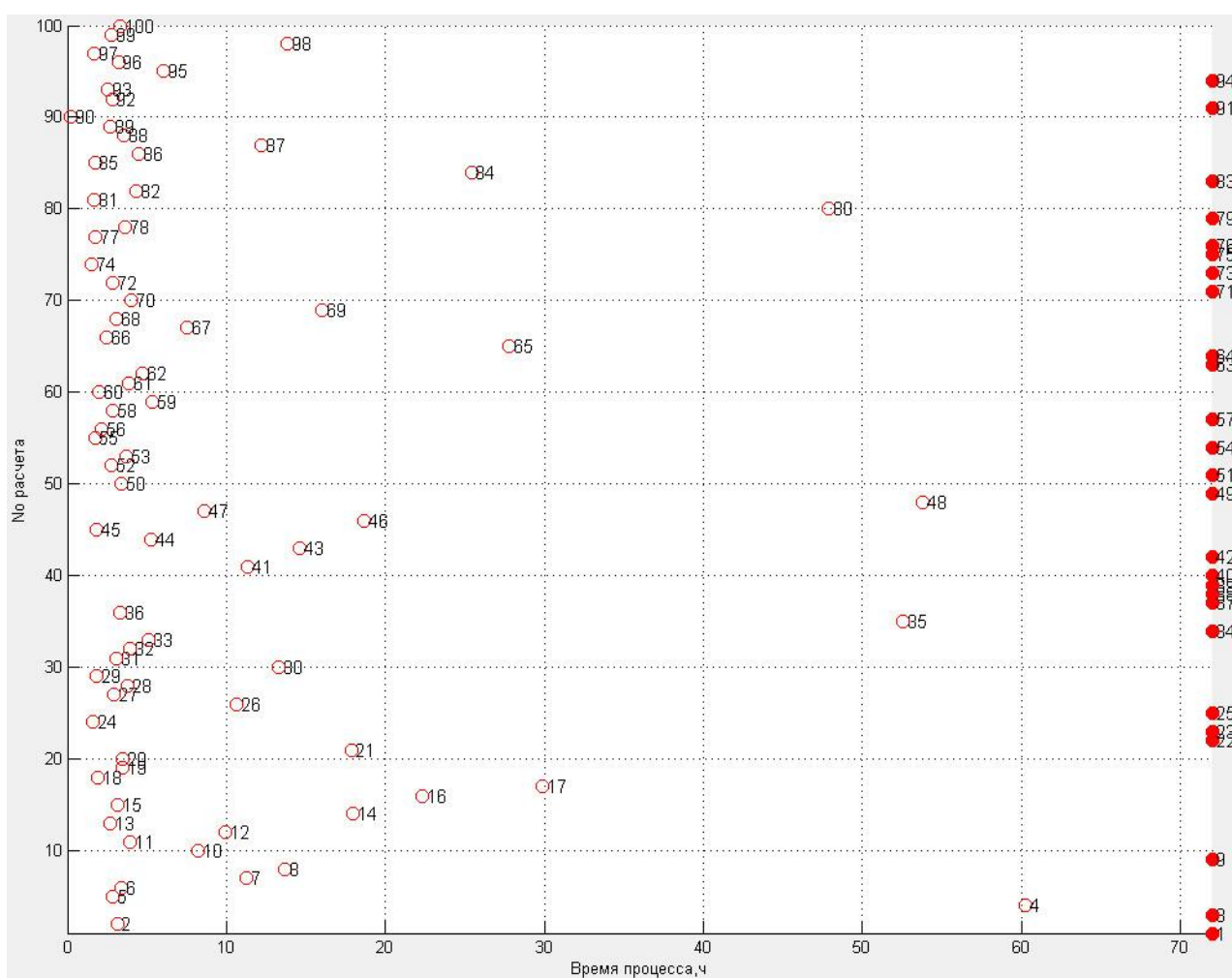


Рис. 6. Распределение расчетов по достигнутому времени выполнения

Отобранные по критерию успеха расчеты образуют подмножество из пространства решений (26 расчетов). Полученные результаты могут быть использованы как непосредственно (для обоснования того или иного сочетания параметров систем при проектировании), так и являться основой для дальнейшей технической или технико-экономической оптимизации. Для решения оптимизационной задачи необходимо сформулировать целевую функцию, максимизация или минимизация которой при существующих ограничениях на изменения параметров будет означать достижение оптимального решения. Естественно, что оптимальная точка (комбинация варьируемых параметров) принадлежит пространству решений. Наиболее простой пример оптимизации может быть проведен путем задания целевой функции согласно следующему выражению (1):

$$F(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^K x_k W_k, \quad (1)$$

где x_k – нормированное значение k -го параметра из комбинации ($x_k \in [0,1]$), W_k – вес k -го параметра в сумме (может быть как отрицательным так и положительным числом). Пользуясь, в качестве примера, данной целевой функцией при единичных весах параметров, можно найти минимальное ее значение на полученном множестве решений по трем параметрам: объем ГА, запас воды в ЦАР, суммарная мощность САР (что может быть интерпретировано как удорожание системы с ростом вышеперечисленных параметров, каждый из которых в равной мере оказывает влияние на ее стоимость). Таким образом, целевая функция оптимизации может принимать различный вид, состав и веса параметров в которой должны выбираться исходя из задач проектирования при помощи подходящего метода обобщения экспертных оценок.

Заключение

Была апробирована методология проведения вариантных расчетов по выбору параметров систем безопасности. Несмотря на поверочный характер каждого отдельного расчета (проверка критериев успеха той или иной комбинации технических параметров), данная методология является инструментом проектирования, который может быть использован для решения многопараметрических инженерных задач. Методология адаптирована для проведения расчетов по связке системных LP-кодов КОРСАР/BR-КУПОЛ-МТ.

Дальнейшая работа направлена на уточнение итерационной расчетной модели путем добавления в нее модели ЗО, а также проведения поверочных расчетов отдельных вариантов КСБ, принадлежащих пространству решений, по полной интегральной модели РУ повышенной вычислительной сложности, включающей реалистичные модели САР, активной зоны, ЗО, СЗКРВ и ряда других элементов.

Библиографический список

1. Патент РФ RU153272U1, 10.07.2015. Энергетическая установка // Патент России №153272 / Пахомов А.Н., Хизбуллин А.М., Соколов А.Н.
2. Патент РФ RU152416U1, 27.05.2015. Система аварийного отвода тепла // Патент России №152416 / Пахомов А.Н., Хизбуллин А.М., Соколов А.Н., Шмелев Д.И., Пейч Н.Н.
3. **Johnson, M.E.** Minimax and maximin distance designs / M. E. Johnson, L. M. Moore, D. Ylvisaker // Journal of Statistical Planning and Inference. – 1990. – No. 26. – P. 131-148.
4. **Morris, M.D.** Exploratory designs for computational experiments / M. D. Morris, T. J. Mitchell // Journal of Statistical Planning and Inference. – 1995. – No. 43. – P. 381-402.
5. **Forrester, A.I.J.** Engineering Design via Surrogate Modelling: A Practical Guide / A.I.J. Forrester, A. Sóbester, A.J. Keane // University of Southampton, UK, 2008.

6. **Santner, T.J.** The Design and Analysis of Computer Experiments, Springer-Verlag / T.J. Santner, B. Williams, W. Notz // Berlin. – 2003.
7. **Филин, Р.Д.** Программный комплекс КОРСАР/BR для расчетов в обоснование безопасности реакторов блочной и интегральной компоновки и реакторов типа ВВЭР / Филин Р.Д., Мигров Ю.А., Коротаяев В.Г., Артемов В.Г., Артемова Л.М., Бенедиктов Д.В., Пискарев А.В., Шемаев Ю.П., Гудошников А.Н. // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. – ФГУП «НИИТЭ им. А. П. Александрова» – 2015. – № 2 (2). – С. 6-14.
8. **Грибин А.А.** Остаточное энерговыделение продуктов деления U235 тепловыми нейтронами / А.А. Грибин, Б.Г. Пологих // Атомная энергия. – 1981. – Т. 51. – №1. с. 16-19.

*Дата поступления
в редакцию: 08.10.2020*

A.N. Sokolov,¹ A.A. Barinov¹, A.E. Khrobostov², I.A. Konovalov², A.A. Chesnokov²

METHODOLOGY OF VARIANT CALCULATIONS FOR RATIONALE OF SAFETY SYSTEMS PARAMETERS OF PWR

¹Afrikantov OKB Mechanical Engineering

²Nizhniy Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev

Purpose: Authors present the methodology of finding and visualization the results of variant calculations

Method of work: A theoretical framework is integrating simplified design models of PWR systems and algorithms of generating variable technical parameters sets of these systems

Findings: Conducted variant calculations using emergency cooling system and emergency core cooling system as examples. Combinations of search space parameters, as well as the distribution of calculations by the achieved execution time are displayed graphically in the form of diagrams

Conclusions: The presented methodology is a design tool that can be used to solve multi-parameter engineering problems. The methodology has been adapted to carry out calculations for a bunch of system LP-codes KORSAR/BR – KUPOL-MT. A series of calculations were performed to determine the solution space for the emergency cooling system and emergency core cooling system included in the complex of safety systems/

Key words: variable calculations, emergency cooling system, emergency core cooling system, pressurized water reactor.

УДК 621.181

DOI: 10.46960/1810-210X_2020_4_81

А.В. Шилов¹, М.И. Ершова²

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИМИЗИРОВАННОГО
ТЕПЛООБМЕННОГО ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ ВОДО-ВОДЯНЫХ РЕАКТОРНЫХ
УСТАНОВОК АЭС МАЛОЙ МОЩНОСТИ**

¹Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова

²Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Исследуется оптимизированный вариант конструктивного исполнения теплообменного элемента с двусторонним обогревом с целью получения в проектируемых реакторных установках заданных параметров теплоносителей при минимально возможном гидравлическом сопротивлении теплообменного оборудования. Оптимизация конструкции теплообменного элемента заключается в уменьшении толщины стенки теплообменных трубок и увеличении шага их взаимного расположения в кожухе парогенератора за счет увеличения высоты ребер наружной трубы. Проведен расчетный анализ стандартного и оптимизированного теплообменного элемента, дана оценка эффективности предлагаемой конструкции. С целью экспериментального исследования теплогидравлических характеристик конструкции в АО «ОКБМ Африкантов» была разработана и испытана экспериментальная модель оптимизированного теплообменного элемента. Выполнен анализ результатов расчетно-экспериментальных исследований теплогидравлических характеристик рассматриваемой конструкции. Сделана оценка возможности использования нового теплообменного элемента в парогенераторах перспективных водо-водяных реакторных установках наземного исполнения для АЭС малой мощности.

Ключевые слова: теплообменный элемент, парогенератор, реакторная установка, теплогидравлические характеристики, АЭС малой мощности.

Введение

В настоящее время в атомном машиностроении активно используется многолетний опыт проектирования реакторных установок с интегральным парогенерирующим блоком при создании реакторных установок для атомных станций малой мощности наземного исполнения. Данный процесс непосредственно связан с проблемой совершенствования используемого в составе реакторной установки теплообменного оборудования, а именно парогенераторов, при помощи внедрения эффективных способов интенсификации теплообмена. Исследованию данного вопроса посвящен ряд известных изданий [1-4]. Однако интенсификация теплообмена в парогенераторах, как правило, связана с ростом их гидравлического сопротивления и, как следствие – с ростом гидравлического сопротивления контура теплоносителя. Для установок с естественной циркуляцией теплоносителя это ограничивает максимальную мощность, для установок с принудительной циркуляцией теплоносителя – приводит к увеличению габаритов и мощности насосов, что противоречит требованиям создания атомных станций малой мощности наземного исполнения [5]. Следовательно, актуальным направлением оптимизации параметров реакторной установки является снижение гидравлического сопротивления парогенераторов при обеспечении необходимой тепловой эффективности.

В настоящее время наиболее перспективным способом интенсификации теплообмена считается двусторонний обогрев с закруткой греющей и нагреваемой среды. Примером теплообменного аппарата с двусторонним обогревом и закруткой потока является теплообменник, элементы которого выполнены в виде каналов типа «труба в трубе» с внутренней трубой в виде змеевика, имеющего радиусгиба меньше половины наружного диаметра внутренней трубы. Наружная труба теплообменного элемента выполнена ребристой с 4 ребрами по винтовой линии. Данный способ интенсификации теплообмена (патент на изобретение

№2125695 от 04.07.1996 [6]) получил широкое применение в парогенераторах водо-водяных реакторных установках (рис .1).

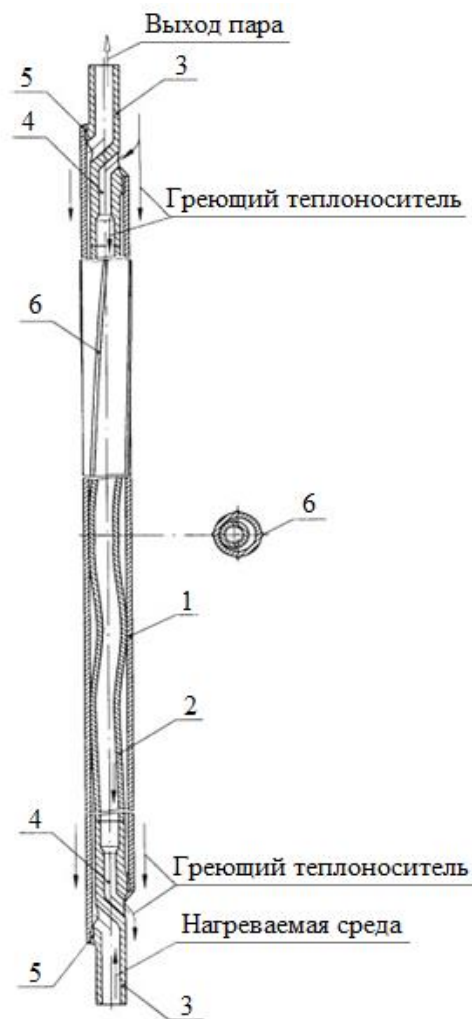


Рис. 1. Теплообменный элемент

1 – наружная труба; 2 – внутренняя труба; 3 – переходник двухканальный;
4 – канал с меньшим диаметром; 5 – сварной шов; 6 – ребро

Процесс теплообмена осуществляется по противоточной схеме циркуляции сред. Греющий теплоноситель, двигаясь сверху вниз, омывает внешнюю поверхность наружной трубы и внутреннюю поверхность внутренней трубы. Нагреваемая среда подается в нижнюю часть теплообменного элемента, поступает в кольцевую полость между наружной трубой и внутренней трубой и, двигаясь вверх по кольцевой полости, нагревается, испаряется и в виде перегретого пара отводится в коллектор [6].

Цель исследования – проведение расчетной оценки эффективности предлагаемой конструкции теплообменного элемента и осуществление сравнительного анализа результатов экспериментального и расчетного исследования теплогидравлических характеристик рассматриваемой конструкции. Для использования в перспективных малогабаритных установках наземного назначения конструкция стандартного теплообменного элемента, рассмотренная в патенте [6], была оптимизирована с целью получения в проектируемых реакторных установках заданных параметров теплоносителей при минимально возможном гидравлическом сопротивлении оборудования.

Конструктивными отличиями предлагаемого оптимизированного варианта теплообменного элемента являются уменьшенная толщина стенки внутренней теплообменной трубки на 20 %, уменьшенная толщина стенки наружной теплообменной трубки на 7 % и увели-

чение шага их взаимного расположения в кожухе парогенератора за счет увеличения высоты ребер наружной трубы на 50 % по сравнению со стандартным применяемым теплообменным элементом. Конструкция оптимизированного варианта теплообменного элемента удовлетворяет предъявляемым к ней требованиям прочности. Парогенерирующая ячейка с оптимизированной конструкцией теплообменного элемента представлена на рис. 2.

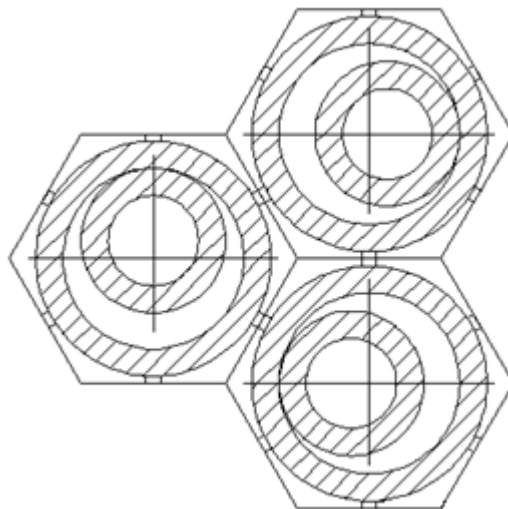


Рис. 2. Парогенерирующая ячейка с оптимизированной конструкцией теплообменного элемента

Сравнительный расчетный анализ эффективности стандартного и оптимизированного теплообменного элемента

При проведении расчетного анализа стандартного и оптимизированного теплообменного элемента были приняты значения параметров греющей и нагреваемой сред, соответствующие номинальному режиму работы, проектируемой реакторной установки. Расчеты проводились при условии одинакового расхода теплоносителя на один теплообменный элемент. Полученные результаты расчетов коэффициента теплопередачи стандартного и оптимизированного теплообменного элемента представлены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициент теплопередачи стандартного и оптимизированного теплообменного элемента

| Участок парогенератора | Коэффициент теплопередачи для наружной полости 1 контура, Вт/(м ² ·К) | |
|------------------------|--|--|
| | Стандартный теплообменный элемент (наружная/внутренняя полость) | Оптимизированный теплообменный элемент (наружная/внутренняя полость) |
| Экономайзерный | 1749/2605 | 1418/2310 |
| Испарительный | 3357/5053 | 3309/4943 |
| Перегревательный | 946/1753 | 882/1500 |

Уменьшение термического сопротивления теплообменных трубок, вследствие уменьшения их толщины, оказывает положительное влияние на величину коэффициента теплопередачи. Но, вследствие уменьшения скорости и соответственно чисел Re, наблюдается снижение коэффициентов теплоотдачи теплоносителя, которое перекрывает положительный эффект от изменения толщины. Таким образом, изменение коэффициента теплопередачи на наружной и внутренней полости элемента соответственно составляет: на экономайзерном участке -19 % / -11 %; на испарительном участке -1 % / -2 %; на перегревательном участке –

7 % / -14 %. Полученные результаты расчетов логарифмического температурного напора стандартного и оптимизированного теплообменного элемента представлены в табл. 2.

Таблица 2

Логарифмический температурный напор стандартного и оптимизированного теплообменного элемента

| Участок парогенератора | Логарифмический температурный напор, °С | |
|------------------------|--|---|
| | Стандартный теплообменный элемент (наружная/внутренняя полость) | Оптимизированный теплообменный элемент (наружная/внутренняя полость) |
| Экономайзерный | 46,77/47,03 | 46,86/47,03 |
| Испарительный | 51,10/59,41 | 52,92/57,98 |
| Перегревательный | 91,18/107,87 | 94,66/104,84 |

Полученные результаты расчетов длины экономайзерных, испарительных и перегревательных участков парогенератора со стандартным и оптимизированным теплообменным элементом представлены в табл. 3.

Таблица 3

Относительные длины участков парогенератора со стандартным и оптимизированным теплообменным элементом

| Участок парогенератора | Длина участка, % | |
|------------------------|-----------------------------------|--|
| | Стандартный теплообменный элемент | Оптимизированный теплообменный элемент |
| Экономайзерный | 29,0 | 29,7 |
| Испарительный | 51,2 | 49,2 |
| Перегревательный | 19,8 | 21,1 |

Анализ результатов расчетов приводит к следующим выводам: несмотря на снижение коэффициента теплопередачи, перераспределение расходов по полостям теплообменного элемента приводит к увеличению длины перегревательного участка и увеличению логарифмического напора на наружной полости перегревательного участка. Так как наружная полость вносит более существенный вклад в теплообмен, чем внутренняя, то увеличение поверхности теплообмена в результате изменения конструкции позволяет получить пар на выходе из активной части предлагаемого теплообменного элемента с параметрами идентичными параметрам пара на выходе из активной части стандартного теплообменного элемента.

Несмотря на различную площадь поверхности теплообмена рассматриваемых элементов, результатом теплового расчета являются одинаковые температуры среды (пара) на выходе из теплообменного элемента стандартной и оптимизированной конструкции. При этом гидравлическое сопротивление по контуру греющей среды активной части теплообменного элемента оптимизированной конструкции примерно в два раза меньше, что оказывает существенное влияние на гидравлические характеристики всего первого контура реакторной установки. В связи с этим имеется возможность уменьшения мощности и габаритов насосов первого контура. Гидравлическое сопротивление по контуру нагреваемой среды нового теплообменного элемента на 24 % ниже, чем стандартного теплообменного элемента. Однако основной вклад в сопротивление парогенератора по второму контуру вносят дроссели.

По результатам сравнительного расчётного анализа, при идентичных исходных данных, влияние на тепловую эффективность оказывают следующие конструктивные особенности нового элемента:

- увеличение поверхности теплообмена;

- уменьшение толщины стенок внутренней и наружной трубы, которое приводит к уменьшению их термического сопротивления;
- увеличение проходного сечения полостей первого и второго контуров, приводящее к снижению скоростей теплоносителей, перераспределению расхода первого контура по полостям теплообменного элемента, изменению логарифмических температурных напоров и смещению границ экономайзерного, испарительного и перегревательного участков.

Таким образом, проведенный расчетный анализ подтверждает целесообразность использования в теплообменном оборудовании перспективных реакторных установок оптимизированного теплообменного элемента, который позволяет существенно уменьшить гидравлическое сопротивление парогенератора при сохранении его тепловой эффективности.

Экспериментальные исследования оптимизированного теплообменного элемента

В соответствии с указанной целью для исследования теплогидравлических характеристик оптимизированного теплообменного элемента была создана экспериментальная модель и комплекс экспериментальных исследований. Исследования выполнялись на стенде, разработанном в АО «ОКБМ Африкантов». Схема стенда представлена на рис. 3.

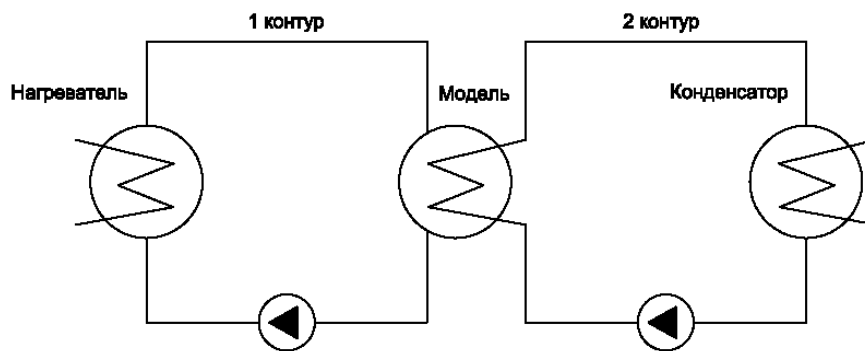


Рис. 3. Упрощенная гидравлическая схема экспериментального стенда

Стенд предназначен для проведения испытаний по исследованию теплогидравлических и гидродинамических характеристик парогенераторов. Для обеспечения испытаний на стенде предусмотрены система высокого давления (первый контур) и система среднего давления (второй контур). Система высокого давления служит для транспортирования теплоносителя заданных параметров (температура, давление, расход) от нагревательных колонок к испытуемой модели по замкнутому контуру. Система высокого давления включает в себя: нагревательные колонки (4 шт.); два циркуляционных электронасоса с системой трубопроводов, соединяющих их с нагревательными колонками стенда; трубопроводы с арматурой, соединяющие нагревательные колонки с трубопроводами системы высокого давления; систему компенсации объема и подпитки стенда. Подпитка системы высокого давления осуществляется электронасосом.

Нагревательные колонки на выходе греющего теплоносителя объединены попарно трубопроводами. Объединенные пары соединяются трубопроводом, и по нему теплоноситель поступает к трубопроводам высокого давления. Пройдя по трубопроводам высокого давления, теплоноситель поступает в модель парогенератора. Из модели парогенератора охлажденный теплоноситель по трубопроводу поступает в теплообменник. Из теплообменника теплоноситель возвращается на «всас» насоса. Циркуляционным насосом вода подается на подогрев к нагревательным колонкам.

Система среднего давления служит для подачи в модель парогенератора питательной воды заданных параметров (температура, давление, расход) и отвода образующегося пара

(пароводяной смеси) из модели парогенератора в конденсационную установку. Второй контур включает: систему охлаждения (оборотный контур); систему дренажа и аварийного слива; систему воздухоотведения; измерительную систему и другое оборудование. Циркуляция воды в контурах осуществляется при помощи электронасосов. Влияние отличий в элементах конструкции модели и штатного парогенератора, обусловленных масштабным фактором, учитывается при помощи расчетных методик, разработанных на основании многолетнего опыта проведения подобных испытаний, что позволяет в конечном итоге получить представительные результаты.

Анализ результатов расчетно-экспериментальных исследований

По результатам теплотехнических испытаний определена температура нагреваемого теплоносителя на выходе из модели парогенератора, а также гидравлическое сопротивление модели по контуру греющей среды в диапазоне изменения паропроизводительности от 60 до 100 % номинальной мощности, характерном для АЭС.

На рис. 4 представлены зависимости изменения температуры нагреваемой среды в оптимизированном теплообменном элементе (в % от номинального экспериментального значения) от уровня тепловой мощности согласно результатам расчета и эксперимента.

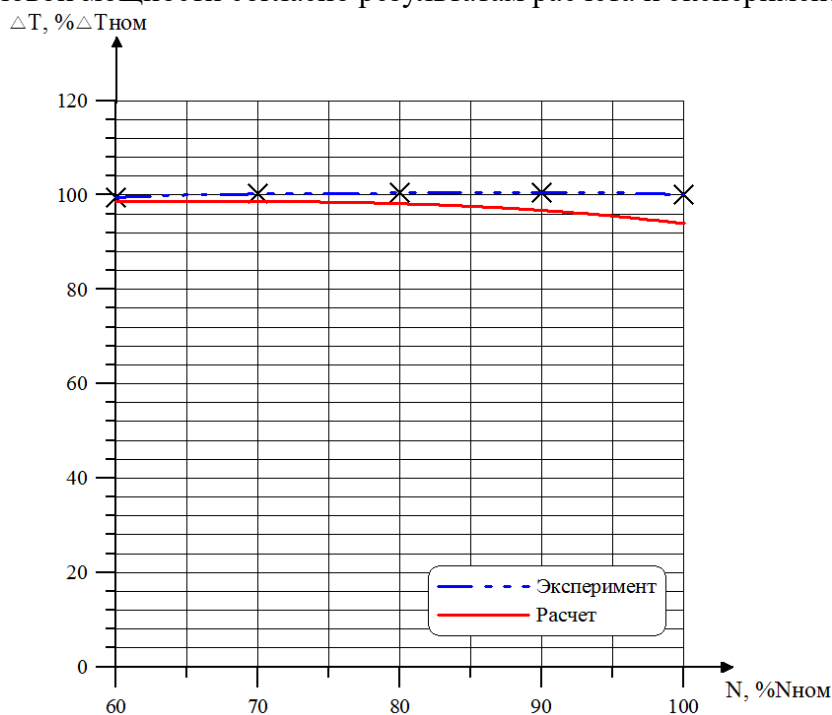


Рис. 4. Сравнение экспериментальной и расчетной зависимостей изменения температуры нагреваемой среды в оптимизированном теплообменном элементе от уровня тепловой мощности

Как видно из графика, представленного на рис. 4, по результатам эксперимента увеличение температуры нагреваемой среды в оптимизированном теплообменном элементе для режима, соответствующего номинальной мощности реакторной установки, превышает расчетное значение на ~ 6 %. Следовательно, характеристики исследуемой модели отвечают предъявляемым требованиям.

На рис. 5 показана зависимость гидравлического сопротивления экспериментальной модели по контуру греющей среды от уровня тепловой мощности согласно результатам расчета и эксперимента.

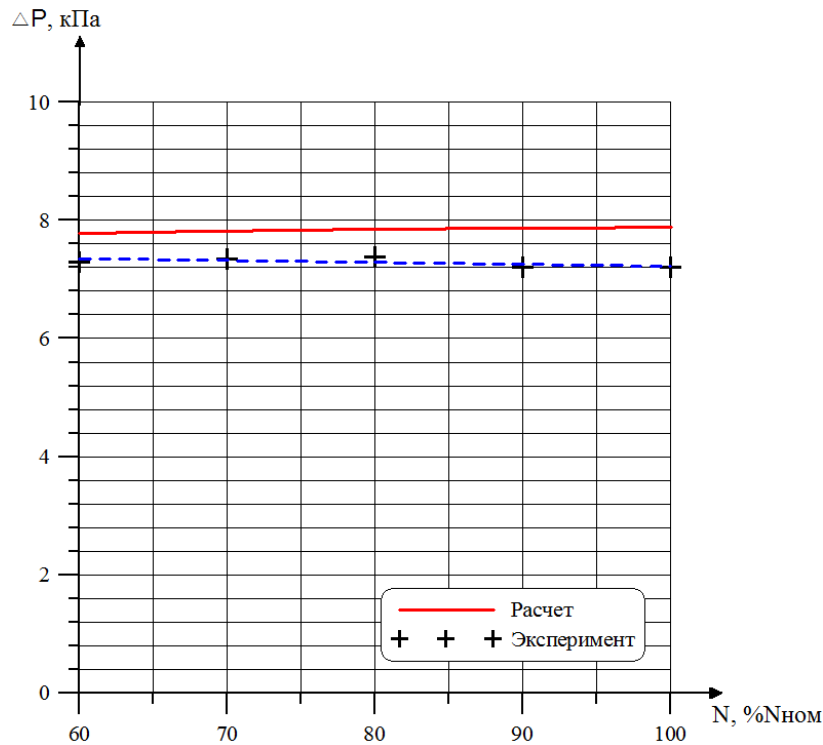


Рис. 5. Сравнение экспериментальной и расчетной зависимостей гидравлического сопротивления экспериментальной модели по контуру греющей среды от уровня тепловой мощности

Как видно из графика, представленного на рис. 5, по результатам эксперимента гидравлическое сопротивление модели по контуру греющей среды для всего исследуемого диапазона мощности не превышает расчетных значений. Таким образом, подтверждается возможность обеспечения заданных параметров теплоносителя в оптимизированном теплообменном элементе в рабочем диапазоне изменения паропроизводительности от 60 до 100 % номинальной мощности, характерном для АЭС.

Заключение

Выполнен сравнительный расчетный анализ тепловой эффективности и гидравлического сопротивления теплообменного элемента стандартной и оптимизированной конструкции. Проведен комплекс экспериментов, по результатам которых выполнен анализ теплогидравлических характеристик оптимизированного теплообменного элемента. Получены следующие результаты:

- гидравлическое сопротивление по контуру греющей среды активной части теплообменного элемента оптимизированной конструкции приблизительно в два раза меньше, чем у стандартной конструкции, что оказывает существенное влияние на гидродинамические характеристики всего первого контура реакторной установки;
- гидравлическое сопротивление по контуру нагреваемой среды нового теплообменного элемента на 24 % ниже, чем стандартного теплообменного элемента;
- увеличение проходного сечения полостей первого и второго контуров в оптимизированной конструкции теплообменного элемента, привело к снижению скоростей теплоносителя, перераспределению расхода первого контура по полостям теплообменного элемента, изменению логарифмических температурных

напоров и смещению границ экономайзерного, испарительного и перегревательного участков.

- по результатам экспериментального исследования увеличение температуры нагреваемой среды в оптимизированном теплообменном элементе для режима, соответствующего номинальной мощности реакторной установки, превышает расчетное значение на ~ 6 %. Следовательно, характеристики исследуемой модели отвечают предъявляемым требованиям.
- по результатам экспериментального исследования гидравлическое сопротивление модели по контуру греющей среды для всего исследуемого диапазона мощности не превышает расчетных значений.

Сравнительный расчетный анализ подтвердил целесообразность использования в теплообменном оборудовании перспективных реакторных установках оптимизированного теплообменного элемента. Предлагаемый теплообменный элемент позволяет существенно уменьшить гидравлическое сопротивление парогенератора при сохранении его тепловой эффективности.

По результатам проведенного анализа расчетных и экспериментальных исследований подтверждена возможность обеспечения заданных параметров теплоносителя в рабочем диапазоне перспективных водо-водяных реакторных установок для АЭС малой мощности при использовании в составе теплообменного оборудования теплообменного элемента оптимизированной конструкции.

Библиографический список

1. **Гортышев, Ю.Ф.** Теплогидравлический расчет и проектирование оборудования с интенсифицированным теплообменом / Ю.Ф. Гортышев, В.В. Олимпиев, Б.Е. Байгалиев – Казань: Изд. Казанского государственного технического университета, 2004. – 432 с.
2. **Dreiser, G.A.** Intensification of heat exchange equipment/ A.S. Myakotchin, A.A. Neverov, V.V. Ermakov, S.L. Lapaev // Proceedings of International Conference «Heat Exchangers for Sustainable Development». 15-18 June 1998. Lisbon, Portugal. P.395-404.
3. **Будов, В.М.** Форсированные теплообменники ЯЭУ/ В.М. Будов, С.М. Дмитриев – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 176 с.
4. **Manglik, R. M.** Heat transfer enhancement and pressure drop in viscous liquid flows in isothermal tubes with twisted-tape inserts/ R. M. Manglik, A. E. Bergles // Wärme-und Stoffübertragung. –1992. – No.27. – P. 249-257.
5. **Фадеев, Ю.П.** Плавающие и блочно-транспортабельные атомные станции малой мощности / Ю.П. Фадеев, А.Н. Пахомов, В.И. Полуничев, А.Ю. Турусов // Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева. – 2018. – №4 (123). – С. 172-177.
6. Пат. 2125695 Российская Федерация, F28D 7/10. Теплообменный элемент / Каменский В.Г., Камашев Б.М., Рулев В.М.; заявитель и патентообладатель Опытное конструкторское бюро машиностроения (RU). – № 96113250/06; заявл. 04.07.1996; опубл. 27.01.1999.

*Дата поступления
в редакцию: 08.10.2020*

A.V. Shilov¹, M.I. Ershova²

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THERMAL-HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF THE OPTIMIZED HEAT EXCHANGER ELEMENT FOR A PRESSURIZED-WATER REACTOR PLANTS NUCLEAR POWER PLANT SMALL POWER

¹Afrikantov OKB Mechanical Engineering

²Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: estimate the effectiveness of the proposed design of the heat exchange element and the implementation of comparative analysis of results of experimental and numerical studies of thermal-hydraulic characteristics of the considered structures.

Methodology: the authors performed a computational analysis of the standard and optimized heat exchange element, and evaluated the effectiveness of the proposed design of the heat exchange element. An experimental model of an optimized heat exchange element was developed and tested in JSC «Afrikantov OKBM» in order to experimental study the thermal-hydraulic characteristics of the structure under consideration. The paper analyzes the results of computational and experimental studies of the thermal-hydraulic characteristics of the structure under consideration.

Results: a comparative calculation analysis confirmed the feasibility of using an optimized heat exchange element in the heat exchange equipment of promising reactor plant. The proposed heat exchange element can significantly reduce the hydraulic resistance of the steam generator while maintaining its thermal efficiency.

Conclusions: based on the results of the analysis of calculated and experimental studies, the possibility of providing the specified parameters of the coolant in the operating range of promising water-water power plants for low-power nuclear power plants when using an optimized heat exchange element as part of the heat exchange equipment confirmed.

Key words: heat exchange element, steam generator, reactor plant, thermal-hydraulic characteristics, small nuclear power plant.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 629.33

DOI: 10.46960/1810-210X_2020_4_90

И.В. Басманов¹, Н.С. Вольская¹, А.Ю. Захаров¹, И.В. Чичекин¹, К.А. Чутков²

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ДОВОДОЧНЫХ ДОРОЖНО-ГРУНТОВЫХ ИСПЫТАНИЙ МАЛОГАБАРИТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана¹
Военный учебно-научный центр Сухопутных войск²

Рассмотрена возможность решения проблемы совмещения организации и проведения научно обоснованных доводочных испытаний малогабаритных транспортных средств. Предложен принцип практического решения задачи «грунтовой эксперимент в условиях испытательного полигона – выбор измерителей динамической нагрузки в трансмиссии и ходовой части малогабаритного транспортного средства, проведение экспериментов». Приведены результаты апробации работы мобильной автономной информационно-измерительной системы. По результатам исследования предложены решения двух задач: 1) разработка план-проекта испытательного грунтового автополигона заданной площади с целью экспериментальной оценки нагрузочных режимов элементов конструкции транспортных средств; 2) выбор вида и технических характеристик элементов измерительной аппаратуры для базового мобильного объекта испытаний (транспортного средства).

Ключевые слова: грунтовой полигон, информационно-измерительная система, доводочные испытания, научные исследования, малогабаритное транспортное средство.

Введение

В настоящее время существует необходимость разработки информационно-измерительного комплекса, включающего грунтовой полигон и автономную мобильную информационно-измерительную систему (ИИС). Целью его создания является разработка и метрологическое обеспечение системы доводочных испытаний малогабаритных транспортных средств в условиях грунтового полигона.

Задачи исследования:

- 1) разработка архитектуры измерительного комплекса, позволяющего в условиях дорожных испытаний определять динамику нагружения трансмиссии и ходовой части на примере малогабаритного транспортного средства;
- 2) определение набора измерителей, необходимых для экспериментальной оценки кинематики и силовой нагруженности трансмиссии и ходовой части ТС;
- 3) выбор мест установочных баз измерительного оборудования;
- 4) обеспечение возможности проведения ходовых испытаний на разных типах грунтов при контроле их физико-механического состояния.

Предварительно проведены на местности дорожно-грунтовые испытания снегоболотохода, оборудованного информационно-измерительной системой (ИИС) [1-3]. Результаты замера нагруженности рассматриваемых элементов трансмиссии и ходовой части снегоболотохода оказались положительными. Представлена оценка перспективности использования результатов измерений проведенных испытаний.

Проект архитектуры измерительного комплекса

Для проведения доводочных испытаний ТС, предназначенных для движения вне дорог с усовершенствованным покрытием, возможны три пути практического решения: испытания на центральном автополигоне (НИЦИАМТ ФГУП И ГНЦ НАМИ), на заводском полигоне предприятия изготовителя ТС и на специальном грунтовом полигоне [4, 5].

Рассмотрим третий вариант – план-проект небольшого грунтового полигона. Его трассы и лабораторный комплекс предназначены для совместного научно-исследовательского и экспериментального решения конкретных конструкторских задач при проектировании и доводке ТС. Определим структуру и принципы формирования мобильной ИИС, установленной на малогабаритном ТС (снегоболотоходе) [4]. На рис. 1 представлен проект грунтового полигона площадью 1,8 Га. Прямолинейные и криволинейные участки трасс полигона имеют в качестве опорной поверхности разные по типу грунты [6-11]. В условиях дорожных испытаний с помощью системы автономной регистрации определяется и исследуется влияние динамического нагружения на элементы трансмиссии и ходовой части малогабаритного ТС. В качестве такого ТС выбран снегоболотоход РМ-650. При проведении ходовых испытаний предлагается учитывать влияние неоднородности и механического состояния типов грунтов пересеченной местности на трассах (в условиях смены климатической температуры и влажности опорной поверхности в течение календарного года) на показатели опорно-тяговой проходимости ТС [5].

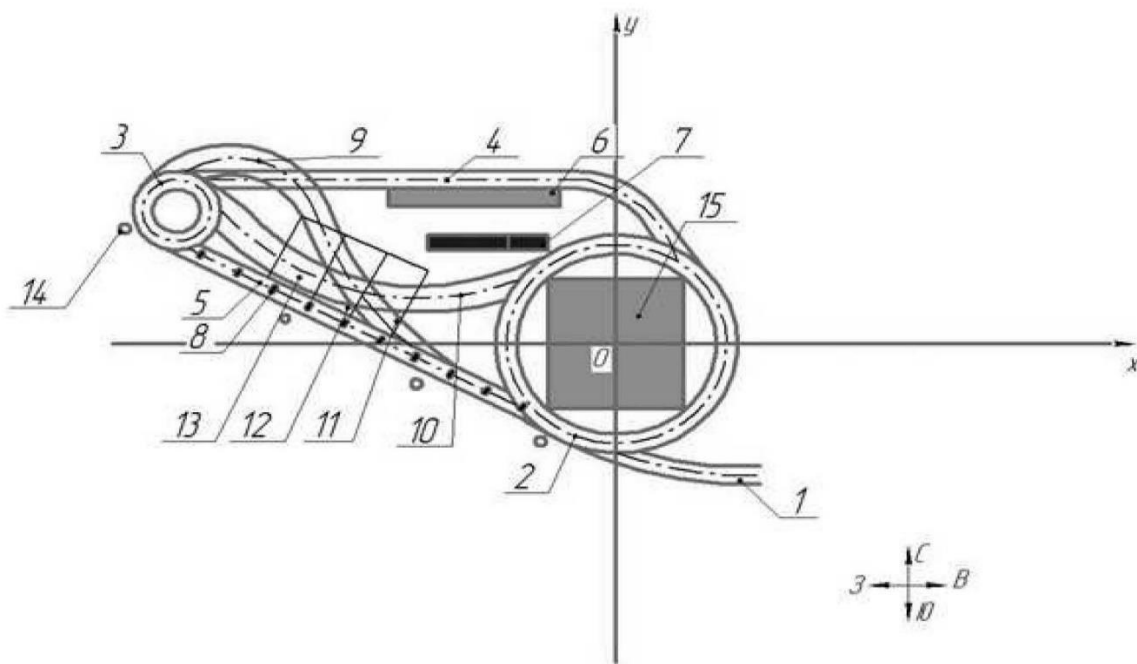


Рис. 1. План-проект грунтового полигона

На рис. 1 показаны: 1 – въезд на полигон; 2, 3 – кольцевые участки дороги с постоянными радиусами (6 м, 25 м); 4 5, 6 – прямолинейные участки кольцевой дороги; 7 – бассейн; 8 – съемные пирамидальные выступы; 9 – участок с постоянным радиусом $R = 20$ м; 10 – грунтовые криволинейные участки заданных радиусов (глина, луговина, песок); 11 – участок поверхности – суглинок; 12 – участок поверхности – луговина; 13 – участок поверхности – песок; 14 – фонарные столбы (для освещения территории); 15 – специальные грунтовые каналы.

Система автономной регистрации режимов движения транспортного средства

Информационно-измерительная система размещена на снегоболотоходе РМ – 650. На рис. 2 представлен внешний вид ТС. Его технические характеристики приведены в табл. 1. Передний багажник снегоболотохода загружен массой 40 кг, задний багажник загружен массой 160 кг (80 кг – имитация нагрузки перевозимого груза, 80 кг – имитация веса пассажира).



Рис. 2. Снегоболотоход РМ 650

Таблица 1

Технические характеристики РМ 650

| Тип двигателя | Четырехтактный ДВС |
|---|--|
| Рабочий объем, см ³ | 622 |
| Максимальная мощность, л.с. | 42,5 |
| Топливо | АИ92 |
| Объем топливного бака, л | 24 |
| Скорость, км/ч | 85 |
| Коробка передач | Механическая с вариатором |
| Привод | 2/4WD, электрическая блокировка дифференциала |
| Колесная формула | 4x4 |
| Подвеска | Независимая двухрычажная поперечная с гидравлическими амортизаторами |
| Ход подвески, передняя/задняя, мм | 170/195 |
| Колея передних/задних колес, мм | 965/914 |
| Минимальный дорожный просвет, мм | 290 |
| Количество мест | 2 |
| Габаритные размеры: Д/Ш/В, мм | 2320/1245/1255 |
| Сухая* масса, кг | 375 |
| Шины размер передние/задние | 26x8-14/26x10-14 |
| Макс. нагрузка на передний багажник, кг | 40 |
| Макс. нагрузка на задний багажник, кг | 80 |
| Макс. масса буксируемого груза, кг | 250 |

В табл. 2 перечислены установленные на снегоболотоходе РМ 650 средства измерения кинематических и силовых параметров движения ТС фирмы ZET LAB.

Таблица 2

Список регистрируемых параметров

| № | Тип преобразователя | Первичный датчик | Физическая величина |
|----|---------------------|---|--|
| 1 | ZET 210 | Датчик Холла в двигателе | Обороты двигателя |
| 2 | ZET 210 | Датчик Холла заднего редуктора | Обороты редуктора заднего моста |
| 3 | ZET 7180-V | Датчик Холла, установленный на раме в зоне передней левой подвески ВБУ-М08-48У-2122-3 | Обороты левого переднего колеса |
| 4 | ZET 7180-V | Датчик Холла, установленный на раме в зоне передней правой подвески ВБУ-М08-48У-2122-3 | Обороты правого переднего колеса |
| 5 | ZET 7111 | Тензорезисторы ВА200-5АА-А150(11)-ВХ, установленные на амортизатор и подключенные по мостовой схеме | Нагрузка переднего левого амортизатора |
| 6 | ZET 7111 | Тензорезисторы ВА200-5АА-А150(11)-ВХ, установленные на амортизатор и подключенные по мостовой схеме | Нагрузка переднего правого амортизатора |
| 7 | ZET 7111 | Тензорезисторы ВА200-5АА-А150(11)-ВХ, установленные на амортизатор и подключенные по мостовой схеме | Нагрузка заднего левого амортизатора |
| 8 | ZET 7111 | Тензорезисторы ВА200-5АА-А150(11)-ВХ, установленные на амортизатор и подключенные по мостовой схеме | Нагрузка заднего правого амортизатора |
| 9 | ZET 7111 | Тензорезисторы 2ФКП-5-400, установленные на рулевой вал и подключенные по мостовой схеме | Нагрузка рулевого вала на кручение |
| 10 | ZET 7180-V | Переключатель | Кнопка определения испытания во времени |
| 11 | ZET 7180-V | Акселерометр ВС 201 S/N 1277 | Вертикальные ускорения в зоне крепления переднего левого амортизатора |
| 12 | ZET 7180-V | Акселерометр ВС 201 S/N 1268 | Вертикальные ускорения в зоне крепления переднего правого амортизатора |
| 13 | ZET 7180-V | Акселерометр ВС 201 S/N 1273 | Вертикальные ускорения в зоне крепления заднего правого амортизатора |
| 14 | ZET 7180-V | Акселерометр ВС 201 S/N 1267 | Вертикальные ускорения в зоне крепления заднего левого амортизатора |
| 15 | ZET 7152-N | Цифровой акселерометр ZET 7152-N VER.1 | Ускорения центра масс |
| 16 | ZET 7160-E | Инкрементный угловой преобразователь ЛИР-158АТ 1000-05-ПИ | Ход передней левой подвески |
| 17 | ZET 7160-E | Инкрементный угловой преобразователь ЛИР-158АТ 1000-05-ПИ | Ход передней правой подвески |

Окончание табл. 2

| | | | |
|----|------------|---|-----------------------------|
| 18 | ZET 7160-E | Инкрементный угловой преобразователь ЛИР-158АТ 1000-05-ПИ | Ход задней левой подвески |
| 19 | ZET 7160-E | Инкрементный угловой преобразователь ЛИР-158АТ 1000-05-ПИ | Ход задней правой подвески |
| 20 | ZET 7160-E | Инкрементный угловой преобразователь ЛИР-158АТ 1000-05-ПИ | Угол поворота рукоятки газа |
| 21 | ZET 7160-E | Инкрементный угловой преобразователь BOURNS ENS1J-B28-L00256L 1720M-MFX | Угол поворота рулевого вала |

Во время движения фиксируются 20 параметров, характеризующих работу двигателя, заднего моста, движителя, подвески и системы управления ТС [4, 5, 8, 10, 12]. Информация от первичных датчиков преобразуется с помощью АЦП. Преобразованные данные параметров сохраняются на компьютере, установленном на снегоболотоходе. В системе автономной регистрации режимов движения используются следующие типы первичных преобразователей.

Тензорезисторы ВА200-5АА-А150(11)-ВХ – измеритель напряжения на поверхности материалов. Датчики подключены по мостовой схеме (два тензорезистора – измерительные, два резистора – термокомпенсирующие). Используются для определения величины усилий, возникающих в амортизаторах при движении.

Тензорезисторы 2ФКП-5-400 – измеритель напряжения на поверхности материалов. Датчики подключены по мостовой схеме (все резисторы – измерительные). Используются для определения величины крутящего момента на рулевом валу при движении снегоболотохода.

Акселерометры ВС 201 – измерители линейных ускорений. Используется для определения вертикальных ускорений в четырех точках крепления амортизаторов к раме ТС.

Акселерометр ZET 7152-N – трехкомпонентный датчик ускорений, измерение производится по трем осям. Используется для определения ускорений в центре масс снегоболотохода.

Инкрементный угловой преобразователь ЛИР-158АТ 1000-05-ПИ – оптоэлектронный преобразователь угловых перемещений. Используется для определения углового хода нижних рычагов подвески и угла поворота рычага газа. Согласованность угла перемещения рычага и вала датчика обеспечивается использованием системы рычажков, образующих трапецию.

Инкрементный угловой преобразователь BOURNS ENS1J-B28-L00256L 1720M-MFX – оптоэлектронный преобразователь угловых перемещений. Используется для определения угла поворота рулевого вала.

Датчик Холла ВБУ-М08-48У-2122-3 – индуктивный датчик оборотов, основанный на принципе Холла. Используется для определения частоты вращения передних колес ТС.

Данные, полученные с первичных преобразователей, переводятся из аналогового сигнала в цифровой с помощью цифровых преобразователей (табл. 2):

1) АЦП ЦАП ZET 210 – датчика оборотов заднего редуктора и датчика оборотов двигателя;

2) ZET 7111 – используется для работы совместно с тензорезисторами (тензомостами) для определения нагрузок с амортизаторов и рулевого вала;

3) ZET 7180-V – используется для преобразования сигнала с датчиков ускорений ВС 210 и датчиков Холла ВБУ-М08-48У-2122-3;

4) ZET 7160-E – цифровой энкодер преобразует аналоговые сигналы от угловых преобразователей и высчитывает угол поворота вала датчика. Используется для преобразования

сигнала от ЛИР-158АТ 1000-05-ПИ и от BOURNS ENS1J-B28-L00256L 1720M-MFX в значения угла поворота вала датчика;

5) ZET 7152-N – трехкомпонентный датчик ускорений, измерение по трем осям; используется для определения ускорений в центре масс снегоболотохода;

6) ZET 7176 – преобразователь интерфейса передает цифровые сообщения по шине, к которой подключены цифровые преобразователи на компьютер. Интерфейс подключения Ethernet RJ-45. В результате, элементы мобильной измерительной системы собраны в защищенные от воздействия случайных факторов блоки и установлены на ТС (рис. 3).



Рис. 3. Мобильная автономная система на базе снегоболотохода

Представим примеры результатов испытаний, которые проводились с целью апробации и отладки разработанного измерительного комплекса. При этом используемые датчики были разделены на несколько групп:

1) с помощью инерционных датчиков - измерялись ускорения (рис. 4);

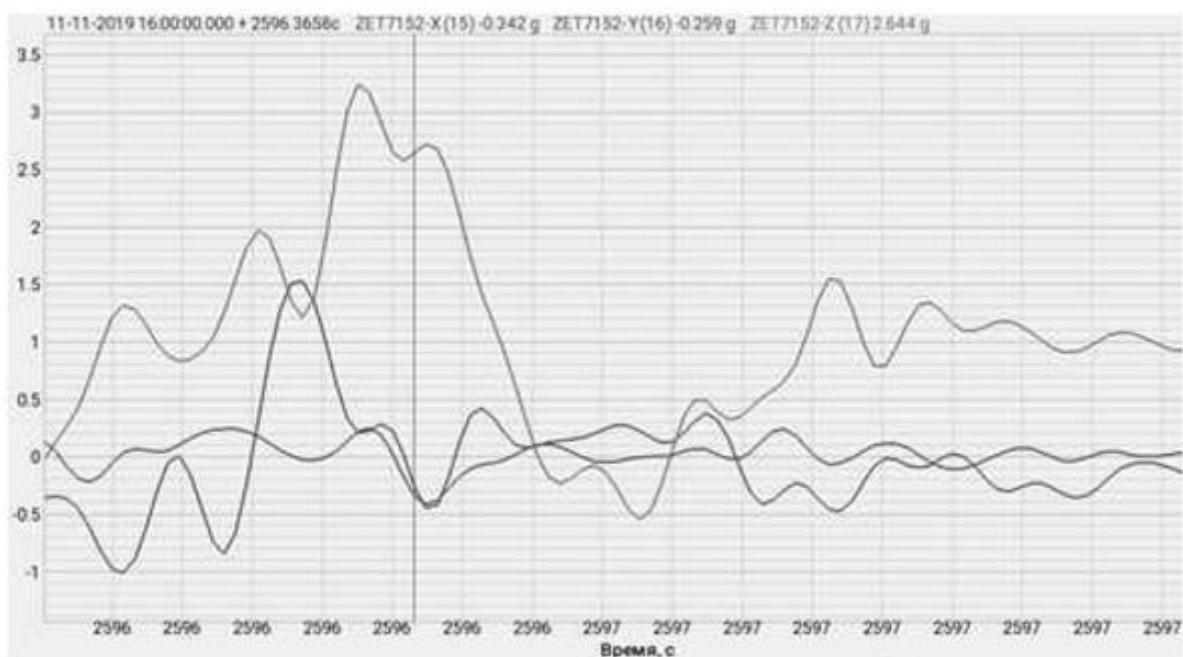


Рис. 4. Графики ускорений центра масс

2) с помощью угловых датчиков перемещений – проводилась фиксация угловых перемещений рычагов подвески и ручки газа, угла поворота рулевого вала (на рис. 5 приведен график угловых перемещений переднего левого рычага при прыжке с трамплина);

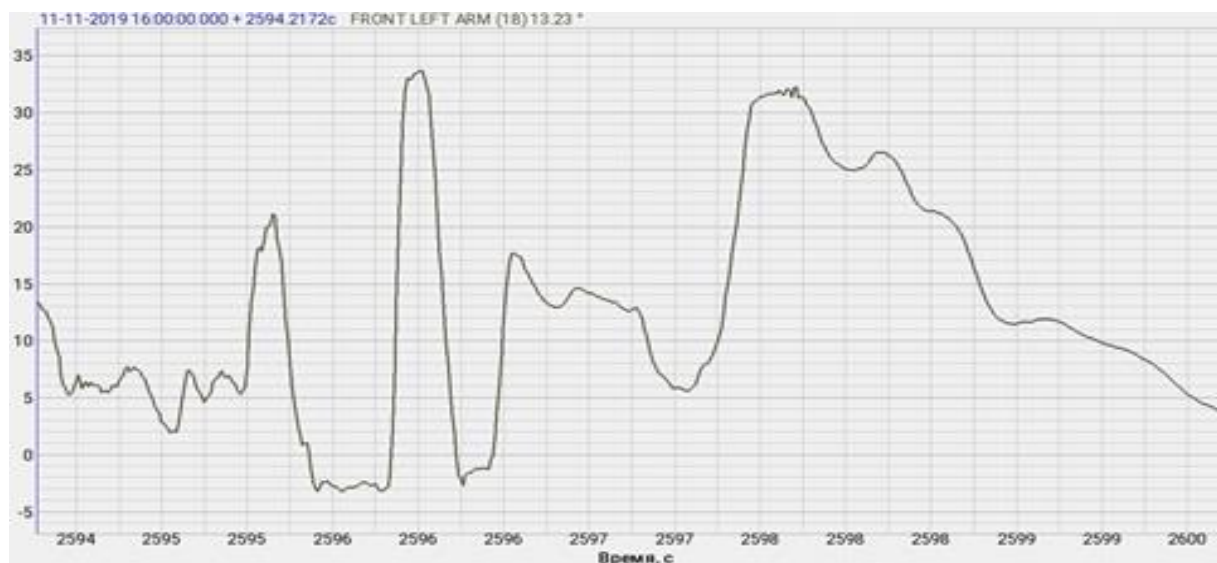


Рис. 5. График положения рычага подвески

3) индуктивные датчики – для фиксации углов поворота колес и валов (рис. 6), возможно подключение штатных индуктивных датчиков;

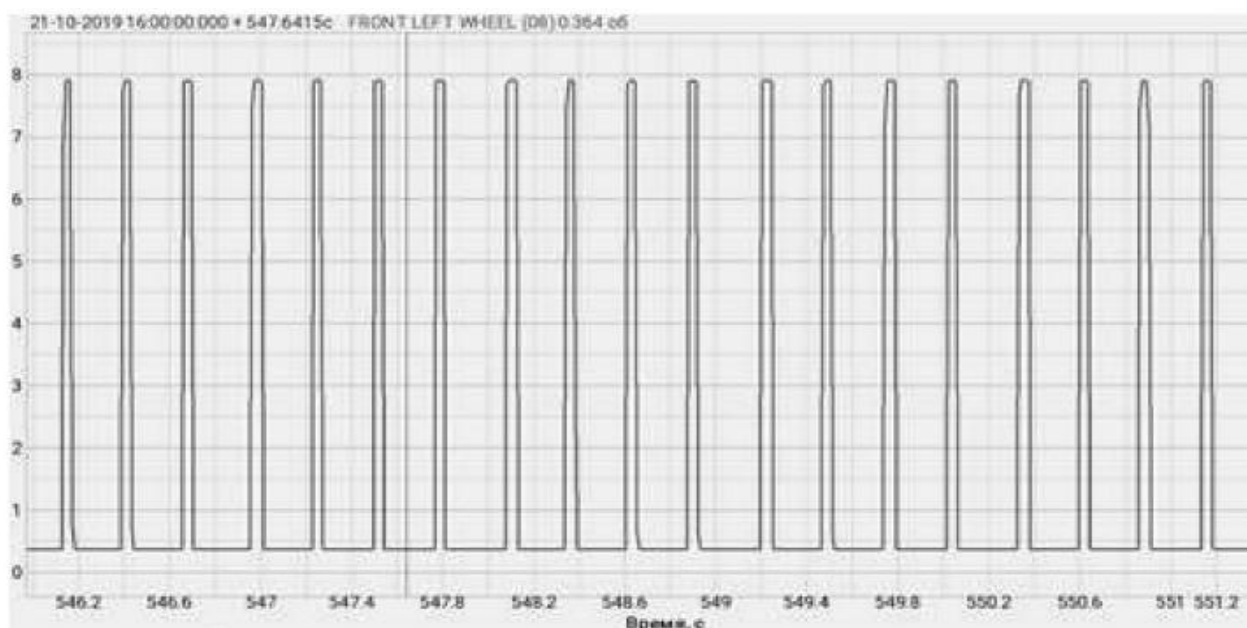


Рис. 6. График импульсов индуктивного датчика

4) датчики нагрузки – использование в качестве датчиков нагрузки на амортизаторах и рулевом валу, полученные значения возможно перевести в напряжения и микродеформации. Возможна установка датчиков на приводные валы, что позволяет определять подводимый к колесу крутящий момент. На рис. 7 изображено применение тензометрии на приводном валу автомобиля МЗКТ посредством радиоканала и график изменения нагрузки (рис. 8).



Рис. 7. Применение тензометрии на приводном валу

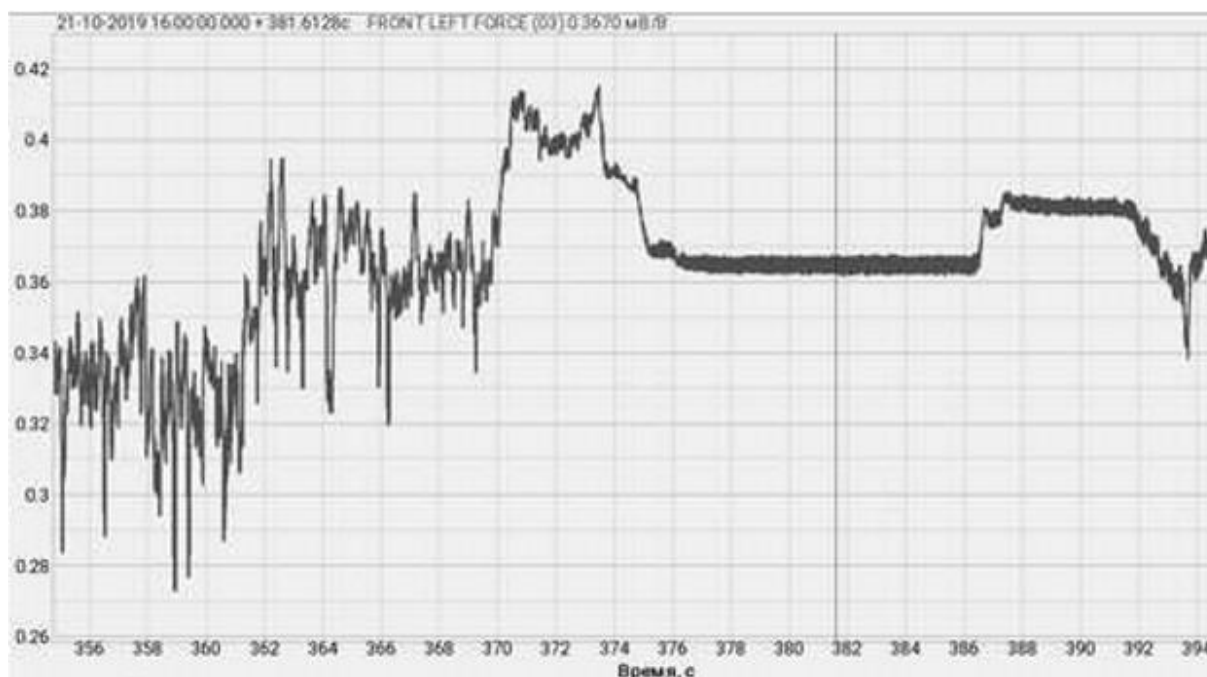


Рис. 8. График изменения нагрузки

Преимущества системы автономной регистрации режимов

Одним из преимуществ рассматриваемой автономной системы является возможность проведения измерений без разрушения и изменения самих узлов ТС. Это позволяет проводить динамические испытания отдельных узлов и агрегатов. Определять возникающие нагрузки и напряжения, сохраняя конструкцию, что положительно сказывается на достоверность получаемой оценки результатов испытаний. К этой же системе относятся датчики созданные на основе тензометрии. Такими являются датчики нагрузки на амортизаторах и датчик крутящего момента на рулевом валу.

При необходимости возможна установка датчиков микродеформаций (тензорезисторов) на другие элементы подвески, несущей системы, элементы трансмиссии. Также возможна установка датчиков крутящего момента на приводных валах посредством радиоканалов. Получаемые значения после тарирования могут быть пересчитаны как нагрузка и напряжения.

Второе преимущество системы – возможность проведения измерений в критических узлах; проведение оценки не только кинематических параметров, но и прочностных. Третьим преимуществом системы является ее мобильность. В кратчайшие сроки возможна установка системы на другое ТС. Примером этого преимущества является временная установка системы на снегоход РМ Vector 1000 (рис. 9).



Рис. 9. Пример разработанной установки ИИС на снегоход РМ Vector 1000

Таким образом, существуют широкие возможности использования данной системы на любых других транспортных средствах.

Электропитание

Рассмотрим работу систему электроснабжения ИИС. В процессе ее использования были выявлены некоторые особенности и недостатки.

Основным требованием системы является необходимость обеспечения ее стабильного питания. Компоненты системы снабжены собственными стабилизаторами и преобразователями напряжения, питающимися переменным током напряжением 220 В. Сами компоненты системы работают на постоянном токе, но при разных напряжениях. Также для работы системы необходим переменный ток напряжением 220 В для подключения монитора. Таким образом, существует необходимость обеспечения переменным током с напряжением 220 В для работы всей системы. Эта возможность достигнута за счет подключения инвертора к бортовой системе ТС. В процессе эксплуатации было выявлено, что данная схема подключения не обеспечивает надежного питания системы. Большие перепады напряжения бортовой системы и наводки системы зажигания приводят к сильным шумам некоторых датчиков. Также бортовая система снегоболотохода не обеспечивает потребной мощности системы.

Эта проблема была решена путем подключения инвертора к тяговому гелиевому аккумулятору. Полностью заряженного аккумулятора объемом 100 А•ч и напряжением 12 В хватает на обеспечение трех часов непрерывной и стабильной работы системы.

Такой тип подключения накладывает ограничения на время автономной работы, но позволяет устанавливать систему на различные ТС без переделки системы питания. Поэтому, систему возможно установить на транспортные средства, не снабженные бортовой сетью (оснащенные магнето), что делает систему универсальной.

Выводы

1. Разработан план-проект грунтового полигона, где в течение года можно проводить натурные эксперименты по оценке нагруженности основных узлов и агрегатов малогабаритного ТС.

2. На полигоне обеспечивается возможность определения измерителей опорно-тяговой проходимости ТС при движении по грунтам с фиксированием и оценкой их физико-механического состояния.

3. Разработана мобильная автономная информационно-измерительная система, которую можно установить на испытываемое колесное транспортное средство. Эта измерительная система позволяет оценивать динамику нагружения основных элементов трансмиссии и ходовой части. Одним из преимуществ данной системы является возможность проведения измерений без разрушения и изменения узлов транспортного средства.

4. Разработанная архитектура испытательного дорожного комплекса позволяет объединить цели и задачи научных исследований с процессом дорожных и грунтовых испытаний. Это повысит эффективность доводочных испытаний новых конструкций малогабаритных транспортных средств.

Библиографический список

1. ГОСТ 32571-2013 Снегоболотоходы колесные малогабаритные. Требования безопасности и методы испытаний.
2. ГОСТ Р ИСО 15622-2017 Интеллектуальные транспортные системы. СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО КРУИЗ-КОНТРОЛЯ. Требования к эксплуатационным характеристикам и методы испытания.
3. **Кравец, В.Н.** Измерители эксплуатационных свойств автотранспортных средств: учеб. пособие Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева / В.Н. Кравец. – 2-е изд., перераб. и доп. – Н. Новгород, 2014. – 157 с.
4. **Клубничкин, В.Е.** Экспериментальная оценка скоростных и тормозных свойств снегоходов отечественного производства / В.Е. Клубничкин, А.С. Дьяков, Е.Е. Клубничкин, А.Ю. Захаров, А.Б. Карташов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. – 8 с.
5. **Клубничкин, В.Е.** Экспериментальная оценка скорости и тормозных свойств квадроциклов отечественного и зарубежного производства / В.Е. Клубничкин, А.С. Дьяков, Е.Е. Клубничкин, А.Ю. Захаров, У.Ш. Вахидов, А.С. Сученина, И.В. Басманов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. – 7 с.
6. **Ларин, В.В.** Теория движения полноприводных колёсных машин: учебник / В.В. Ларин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 391 с.
7. **Volskaya, N.S.** Mathematical model of rolling an elastic wheel over deformable support base / N.S. Volskaya, M.M. Zhileykin, A.Y. Zakharov // IASF-2017. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 315 (2018) 012028 doi: 10.1088/1757-899X/315/1/012028
8. **Макаров, В.С.** Влияние бульдозерных эффектов, возникающих при криволинейном движении колесных машин на нагруженность элементов трансмиссии / В.С. Макаров, К.О. Гончаров, А.Н. Блохин, В.В. Беляков // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – №9. – 2008. – С. 47-51.

9. **Барахтанов, Л.В.** Моделирование взаимодействия колесной машины с грунтом / Л.В. Барахтанов, В.И. Котляренко, С.Е. Манянин, И.А. Соколов // Журнал автомобильных инженеров. – №2(67). – 2011. – С. 26-28.
10. **Алипов, А.А.** Распределений давлений в контакте шины с дорогой / А.А. Алипов, В.В. Беляков, А.Н. Блохин, Д.В. Зезюлин // Вестник ИжГТУ. – 2011. – №1(49). – С. 15-18.
11. **Shoop, S.A.** Overview of cold regions mobility modeling at CRREL / S.A. Shoop, P.W. Richmond, J. Lacombe // Journal of Terramechanics. – 2006. –Vol. 43. – Issue 1. – P. 1-26.
12. **Левенков, Я.Ю.** Определение параметров модели рессоры для анализа нагрузок и оценки прочности элементов подвески в системе расчёта динамики твёрдых тел / Я.Ю. Левенков, И.В. Чичекин // Инженерный вестник. – 2016. – № 12. – С. 4.

*Дата поступления
в редакцию: 03.10.2020*

I.V. Basmanov¹, N.S. Volskaya¹, A. J. Zakharov¹, I.V. Chichekin¹, K.A. Chutkov²

INFORMATION AND MEASUREMENT COMPLEX FOR CARRYING OUT ROAD AND GROUND TESTING OF SMALL-SIZED VEHICLES

Bauman Moscow State Technical University¹

Military educational and scientific center of the Ground Forces²

Combined Arms Academy of the Armed Forces of the Russian Federation (Moscow)

Considered the possibility of solving the problem – combining the organization and conduct of scientifically-based finishing tests of ATV. The principle of practical solution of the problem «ground experiment in the conditions of a test site selection of dynamic load meters in the transmission and running gear of ATV, conducting experiments» is proposed. The results of testing the operation of a mobile Autonomous information and measurement system are presented. The results of the study suggested two problems: 1) development plan project testing ground testing ground given area with the aim of the experimental assessment of modes of elements of construction vehicles; 2) the practical solution of the problem of the choice of the type and technical characteristics of the elements of the measuring equipment for basic cell of the test object (vehicle).

Key words: ground polygon, information and measurement system, finishing tests, scientific research, ATV.

УДК 629. 336

DOI: 10.46960/1810-210X_2020_4_101

А.А. Колин, С.Э. Силантьев, П.С. Рогов, С.А. Сергиевский

ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ И ТОПЛИВНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АВТОМОБИЛЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведены результаты использования разработанной имитационной модели, позволяющей определить динамические и топливно-экономические свойства легкого коммерческого транспорта. Выполнено моделирование следующих режимов испытаний: разгон до 60 и 100 км/ч, разгон на 400 и 1000 м, разгон на высшей передаче со скорости 40 км/ч до 100 км/ч, 120 км/ч, выбег со скорости 50 км/ч. Проведена верификация разработанной модели путем анализа ее отклика на незначительное изменение исходных данных. Получены процентные значения влияния основных параметров (КПД трансмиссии, силы сопротивления воздуха, коэффициента качения колеса, массы) легкого коммерческого автомобиля на его динамические свойства. Выполнена расчетная оценка расхода топлива легким коммерческим автомобилем на постоянных скоростях движения. Проведено сравнение результатов натуральных испытаний (характеристики для оценки динамических характеристик автомобиля и для определения расхода топлива на постоянные скорости) и компьютерного моделирования. В дальнейших исследованиях предполагается использование верифицированной математической модели с целью анализа влияния значений передаточных чисел трансмиссии на расход топлива и выбросы вредных веществ легким коммерческим автомобилем в стандартизированных циклах движения.

Ключевые слова: режимы движения, расход топлива на постоянных скоростях, легкий коммерческий автомобиль, имитационная модель.

Введение

Учитывая постоянный рост стоимости топлива, большое значение приобретает оценка показателей топливной экономичности (ТЭ). Топливная экономичность – это совокупность свойств, определяющих расходы топлива при выполнении автомобилем транспортной работы в различных условиях эксплуатации. Она оценивается по путевому расходу топлива – расходу топлива (л/100км) на 100 км пути, проходимого автомобилем [1]. Затраты на топливо могут достигать более 30 % от стоимости затрат на эксплуатацию автомобиля. Поэтому показатель эксплуатационного расхода топлива является важнейшим для потребителей. Оценка расхода топлива становится основной задачей при проектировании или модернизации автомобиля. На стадии проектирования имеется возможность рассмотреть различные силовые установки, параметры трансмиссии и др. в зависимости от требуемых эксплуатационных качеств. Успешное решение данной задачи позволит существенно снизить материальные и финансовые затраты на стадии проектирования, а также повысить конкурентоспособность и поможет снизить стоимость владения транспортным средством.

Цель работы – разработка имитационной модели для определения расхода топлива, оценка возможности ее применения путем сравнения результатов моделирования с результатами натуральных испытаний.

Проведенные ранее исследования [3-6] указывают на основные методы повышения топливной экономичности автомобиля. Это снижение аэродинамического сопротивления и сопротивления качению шин; оптимизация характеристик трансмиссии. Разработанная модель обязательно должна учитывать влияние выше изложенных параметров.

Методы расчета

Для моделирования движения автомобиля при постоянной скорости и при его разгоне использовались следующие подходы к математическому описанию движения.

Разгон автомобиля в режимах 0-60 км/ч, 0-100 км/ч, согласно [2] выполняется со 100 % подачей топлива и поэтому зависимость крутящего момента ДВС от его оборотов однозначно определяется этим условием. Неизвестным в данном случае является ускорение автомобиля. Для его определения используется следующее выражение, известное из теории автомобиля [1] (1):

$$a_a = \frac{(F_m - F_f - F_w)}{\delta m_a}, \quad (1)$$

где a_a – ускорение автомобиля, F_t – тяговая сила на ведущих колесах, F_f – сила сопротивления качению, F_w – сила сопротивления воздуха, δ – коэффициент учета вращающихся масс, m_a – масса автомобиля.

Тяговая сила определяется по формуле (2):

$$F_m = \frac{T_e u_{TP} \eta_{TP}}{r_k}, \quad (2)$$

где T_e – крутящий момент ДВС, u_{TP} – передаточное число трансмиссии, η_{TP} – КПД трансмиссии, r_k – радиус качения.

T_e в общем случае является функцией, зависящей от положения педали акселератора и скорости ДВС, или $T_e = f(d, \omega_e)$. В математической модели T_e представляет массив данных $T_{e,ij}$ $i, j = 1 \dots 17, j = 1 \dots 11$.

Сила сопротивления качению определяется как (3):

$$F_f = f m_a g, \quad (3)$$

где f – коэффициент сопротивления качению; g – ускорение свободного падения.

Сила сопротивления воздуха определяется следующим образом (4):

$$F_w = 0,5 \cdot C_x \cdot \rho_v \cdot A_v \cdot V^2, \quad (4)$$

где C_x – коэффициент аэродинамического сопротивления, ρ_v – плотность воздуха, A_v – площадь поперечной проекции автомобиля, V – скорость автомобиля.

Коэффициент учета вращающихся масс определяется как (5):

$$\delta = 1 + \frac{I_e u_{TP}^2 \eta_{TP}}{m_a r_k^2} + \frac{I_{кп} u_{ГП}^2 \eta_{ГП}}{m_a r_k^2} + \frac{\sum I_k}{m_a r_k^2}, \quad (5)$$

где I_e – момент инерции ДВС, $I_{кп}$ – момент инерции карданной передачи, $u_{ГП}$ – передаточное число главной передачи, $\eta_{ГП}$ – КПД главной передачи, I_k – момент инерции колеса с полуосью (при наличии).

Поскольку $a_a = \frac{dV}{dt}$, определение времени разгона проводится путем интегрирования уравнения (1) по времени. При этом переключение передач выполняется при достижении номинальной скорости вращения ДВС. В процессе переключения передачи автомобиль сохраняет ранее набранную скорость. Это допустимо для принимаемого значения времени переключения. Определение начальной частоты вращения ДВС после переключения передачи проводится с учетом взаимосвязи скорости автомобиля и частоты вращения ДВС (6):

$$V = \frac{\omega_e r_k}{u_{mp}}, \quad (6)$$

Моделирование режима «выбег 50 – 0 км/ч» выполнялось с использованием уравнения (1) без тяговой силы на ведущих колесах и при измененном значении δ . Так как передача крутящего момента ДВС на колеса автомобиля при выбеге отсутствует, то при определении δ не учитывалось слагаемое, содержащее момент инерции ДВС.

При разгоне автомобиля в режиме движения с постоянной скоростью ускорение отсутствует. Неизвестным является крутящий момент ДВС и мгновенный расход топлива. Для определения неизвестных, выражение (1) приводится к следующему виду (7):

$$F_m = F_f + F_w + \delta m_a a_a, \quad (7)$$

Крутящий момент ДВС – T_e определялся с учетом (2) и текущей включенной передачи трансмиссии, определяемой с учетом (6). Удельный расход топлива в модели представляется с помощью массива данных g_{ej} и является функцией крутящего момента и частоты вращения ДВС $g_e = f(T_e, \omega_e)$. Поэтому для определения текущего удельного расхода топлива использовались полученные с учетом (2), (6), (7) значения T_e и ω_e . Далее, для определения суммарного расхода топлива, удельные значения расхода умножаются на время действия актуальных значений T_e и ω_e и далее суммируются.

Проверка модели

Объектом исследования в данной работе выступает продукция Группы ГАЗ. Основные параметры, задаваемые в модели, либо взяты из конструкторской документации, либо определены с помощью дополнительных расчетов. Созданную имитационную модель требовалось проверить. Основной целью проверки являлась проверка отклика программы на небольшие изменения ее параметров. Проверка заключалась в проведении серии расчетов с варьированием параметров модели в определенном небольшом диапазоне. В случае получения непропорционально сильного отклика на изменение исходных данных необходимым действием было бы дальнейшее совершенствование и корректировка модели. Перечень верификационных расчетов включал в себя разгон до 60 км/ч, разгон до 100 км/ч, разгон от 40 до 120 км/ч на 5 передаче трансмиссии, выбег 50-0 км/ч. Результаты проведенной предварительной верификации сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты предварительной верификации разработанной имитационной модели

| Режим движения | Изменяемый параметр | Значение | Изменение, % | Результат модели | Изменение результата, % |
|------------------|---|----------------------|--------------|------------------|-------------------------|
| Разгон 0-60 км/ч | Время переключения передач | 0,5 с | 0 | 8,68 с | 0 |
| | | 0,3 с | -40 | 8,08 с | - 6,9 |
| | | 0,7 с | +40 | 9,21 с | 6,1 |
| | Коэффициент аэродинамического сопротивления | 0,41 | 0 | 8,68 с | 0 |
| | | 0,45 | 10 | 8,74 с | 0,69 |
| | | 0,37 | -10 | 8,61 с | -0,81 |
| | Площадь поперечной проекции автомобиля | 5,72 м ² | 0 | 8,68 с | 0 |
| | | 6,292 м ² | 10 | 8,74 с | 0,69 |
| | | 5,148 м ² | -10 | 8,61 с | -0,81 |
| | КПД карданной передачи | 1 | 0 | 8,68 с | 0 |
| | | 0,98 | -2 | 8,88 с | 2,3 |
| | | 0,97 | -3 | 8,94 с | 3 |
| | КПД главной передачи | 1 | 0 | 8,68 с | 0 |
| | | 0,98 | -2 | 8,88 с | 2,3 |
| | Переключение передачи | 3800 об/мин | 0 | 8,68 с | 0 |
| 4000 об/мин | | 5,26 | 8,61 с | -0,8 | |
| 3600 об/мин | | -5,26 | 9,01 с | 3,8 | |

Продолжение табл. 1

| Режим движения | Изменяемый параметр | Значение | Изменение, % | Результат модели | Изменение результата, % |
|---|---|----------------------------|--------------|------------------|-------------------------|
| Разгон 0-60 км/ч | Масса автомобиля | 3065 кг | 0 | 8,68 с | 0 |
| | | 3500 кг | 14,2 | 9,54 с | 9,91 |
| | Коэффициент сопротивления качению | 0,011 | 0 | 8,68 с | 0 |
| | | 0,007 | -36 | 8,54 с | -1,61 |
| | | 0,015 | 36 | 8,81 с | 1,5 |
| | Разгон 0-100 км/ч | Время переключения передач | 0,5 с | 0 | 23,7 с |
| 0,3 с | | | -40 | 22,73 с | -4 |
| 0,7 с | | | +40 | 24,62 с | 3,9 |
| Коэффициент аэродинамического сопротивления | | 0,41 | 0 | 23,7 с | 0 |
| | | 0,45 | 10 | 24,24 с | 2,28 |
| | | 0,37 | -10 | 23,2 с | -2,11 |
| Площадь поперечной проекции автомобиля | | 5,72 м ² | 0 | 23,7 с | 0 |
| | | 6,292 м ² | 10 | 24,26 с | 2,36 |
| | | 5,148 м ² | -10 | 23,19 с | -2,15 |
| КПД карданной передачи | | 1 | 0 | 23,7 с | 0 |
| | | 0,98 | -2 | 24,5 с | 3,46 |
| | | 0,97 | -3 | 24,8 с | 4,81 |
| КПД главной передачи | | 1 | 0 | 23,7 с | 0 |
| | | 0,98 | -2 | 24,5 с | 3,46 |
| Переключение передачи | | 3800 об/мин | 0 | 23,7 с | 0 |
| | | 4000 об/мин | 5,26 | 24 с | 1,22 |
| | | 3600 об/мин | -5,26 | 25,8 с | 8,95 |
| Масса автомобиля | | 3065 кг | 0 | 23,7 с | 0 |
| | | 3500 кг | 14,2 | 26,05 с | 9,92 |
| Коэффициент сопротивления качению | | 0,011 | 0 | 23,7 с | 0 |
| | | 0,007 | -36 | 23 с | -3,04 |
| | 0,015 | 36 | 24,9 с | 5 | |
| Разгон 40-120 км/ч | Коэффициент аэродинамического сопротивления | 0,41 | 0 | 47,18 с | 0 |
| | | 0,45 | 10 | 51,4 с | 8,94 |
| | | 0,37 | -10 | 43,2 с | -8,44 |
| | Площадь поперечной проекции автомобиля | 5,72 м ² | 0 | 47,18 с | 0 |
| | | 6,292 м ² | 10 | 51,4 с | 8,94 |
| | | 5,148 м ² | -10 | 43,2 с | -8,44 |
| | КПД карданной передачи | 1 | 0 | 47,18 с | 0 |
| | | 0,98 | -2 | 49,19 с | 4,26 |
| | | 0,97 | -3 | 50,28 с | 6,57 |

Окончание табл. 1

| Режим движения | Изменяемый параметр | Значение | Изменение, % | Результат модели | Изменение результата, % |
|--------------------|---|----------------------|--------------|------------------|-------------------------|
| Разгон 40-120 км/ч | КПД главной передачи | 1 | 0 | 47,18 с | 0 |
| | | 0,99 | -1 | 48,16 с | 2,08 |
| Выбег 50-0 км/ч | Коэффициент аэродинамического сопротивления | 0,41 | 0 | 756 м | 0 |
| | | 0,45 | 10 | 739 м | -2,23 |
| | | 0,37 | -10 | 773 м | 2,23 |
| | Площадь поперечной проекции автомобиля | 5,72 м ² | 0 | 756 м | 0 |
| | | 6,292 м ² | 10 | 739 м | -2,23 |
| | | 5,148 м ² | -10 | 773 м | 2,23 |
| | Коэффициент сопротивления качению | 0,011 | 0 | 756 м | 0 |
| | | 0,007 | -36 | 1057 м | 39,7 |
| | | 0,015 | 36 | 591 | -21,7 |
| | Масса автомобиля | 3065 кг | 0 | 756 м | 0 |
| | | 3500 кг | 14,2 | 767 м | 1,46 |
| | | 4000 кг | 30,5 | 777 м | 2,78 |

Полученные результаты показывают, что при небольшом изменении исходных данных наблюдается пропорциональный отклик модели. Снижению коэффициента аэродинамического сопротивления и площади поперечной проекции соответствует снижение времени разгона и наоборот. То же самое наблюдается при вариации КПД трансмиссии, времени переключения передач и коэффициента сопротивления качению. Влияние на результаты, компонент силы аэродинамического сопротивления становится более заметным при повышении скорости движения. Самое значительное влияние на результаты расчета при вариации коэффициента сопротивления качению наблюдается для режима движения «Выбег 50-0 км/ч». Одинаковое снижение значений КПД карданной передачи и КПД главной передачи вызывает одинаковое повышение времени разгона. При повышении массы автомобиля выбег и время разгона увеличиваются. Все перечисленные закономерности указывают на то, что разработанная имитационная модель адекватно реагирует на изменение исходных данных. Модель позволяет правильно исследовать качественные изменения объекта исследования.

Сравнение результатов расчетов и экспериментов

С целью проверки разработанной имитационной модели, уточнения количественных значений ее результатов и уточнения некоторых исходных данных выполнялось сравнение результатов расчетов и натурных дорожных испытаний транспортных средств. Экспериментальные данные были получены на основании доступной информации по ранее проведенным дорожным испытаниям легкого коммерческого транспорта Группы ГАЗ, они не являются предметом настоящего исследования и подробно не приводятся.

В первую очередь, было выполнено сравнение и анализ результатов для режимов движения, позволяющих уточнить (в пределах 10 %) параметры, определяющие величину силы сопротивления движению. Это режимы «разгон до 60 км/ч», «разгон до 100 км/ч» «разгон на 400 м», «разгон на 1000 м», «разгон 40-100 км/ч» на 5 передаче трансмиссии, «разгон 40-120 км/ч» на 5 передаче трансмиссии, «выбег 50-0 км/ч». Режим «выбег 50-0 км/ч» использовался для уточнения коэффициента сопротивления качению и дополнительного контроля составляющих силы сопротивления воздуха. Режимы «разгон 40-120 км/ч» и «разгон

40-100 км/ч» использовались для уточнения коэффициента аэродинамического сопротивления. Режимы «разгон до 60 км/ч» и «разгон до 100 км/ч» позволили уточнить время переключения передач трансмиссии. После получения достоверных значений перечисленных выше параметров данные по всем режимам использовались для уточнения величины КПД агрегатов трансмиссии. Результаты сравнения расчетов и испытаний после уточнения исходных данных показаны в табл. 2.

Таблица 2

**Сравнение результатов расчетов и испытаний
для режимов движения, характеризующих динамику транспортного средства**

| <i>Режим движения</i> | <i>Результат моделирования</i> | <i>Результат испытаний</i> | <i>Разница результатов (%)</i> |
|------------------------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| Разгон 0 – 60 км/ч | 8,61 с | 9,1 с | 5,38 |
| Разгон 0 – 100 км/ч | 21,81 | 21,2 | -3,11 |
| Разгон 40 – 100 км/ч на 5 передаче | 25,66 | 27 | 4,96 |
| Разгон 40 – 120 км/ч на 5 передаче | 38,71 | 38,6 | -0,28 |
| Разгон на 400 м | 22,06 | 22,5 | 1,96 |
| Разгон на 1000 м | 41,01 | 41,1 | 0,22 |
| Выбег 50 – 0 км/ч | 650 | 648 | -0,31 |

Полученные результаты демонстрируют хорошее согласование расчета и эксперимента, а также подтверждают достоверность уточненных исходных данных. На окончательном этапе проверки модели выполнялось сравнение значений расходов топлива на постоянных скоростях движения. Сравнение результатов расчетов и эксперимента показано в табл. 3. Движение на всех скоростях выполнялось на 5-ой передаче трансмиссии.

Таблица 3

**Сравнение результатов расчетов и испытаний
по расходу топлива на постоянных скоростях движения**

| <i>Скорость, км/ч</i> | <i>Результат испытаний л/100км</i> | <i>Результат моделирования, л/100км</i> | <i>Абсолютная разница результатов, л/100км</i> | <i>Разница результатов, %</i> |
|-----------------------|------------------------------------|---|--|-------------------------------|
| 40 | 5,80 | 5,79 | 0,01 | 0,17 |
| 50 | 6,60 | 6,61 | -0,01 | -0,15 |
| 60 | 7,70 | 7,70 | 0,00 | 0,00 |
| 70 | 8,90 | 8,82 | 0,08 | 0,90 |
| 80 | 10,20 | 10,15 | 0,05 | 0,49 |
| 90 | 11,80 | 11,80 | 0,00 | 0,00 |
| 100 | 13,60 | 13,54 | 0,06 | 0,44 |
| 110 | 15,60 | 15,62 | -0,02 | -0,13 |
| 120 | 17,70 | 17,76 | -0,06 | -0,34 |

Относительная разница результатов расчетов и экспериментов не превышает 1 %. Это означает, что разработанная модель может быть использована для дальнейшей проработки мер по снижению расхода топлива на перспективных моделях легких коммерческих автомобилей.

Выводы

При небольшом изменении исходных данных наблюдается пропорциональный отклик модели. Качественное изменение результатов модели соответствует качественному изменению входных параметров. Снижению коэффициента аэродинамического сопротивления и площади поперечной проекции соответствует снижение времени разгона и наоборот. Аналогичная ситуация наблюдается при вариации КПД трансмиссии, времени переключения передач и коэффициента сопротивления качению. Влияние на результаты, компонент силы аэродинамического сопротивления становится более заметным при повышении скорости движения. Самое значительное влияние на результаты расчета при вариации коэффициента сопротивления качению наблюдается для режима движения «Выбег 50-0 км/ч».

Одинаковое снижение значений КПД карданной передачи и КПД главной передачи вызывает одинаковое повышение времени разгона. При повышении массы автомобиля выбег и время разгона увеличивается. Модель позволяет правильно исследовать качественные изменения объекта исследования. Полученные результаты (табл. 2) демонстрируют хорошее согласование расчета и эксперимента, а также подтверждают достоверность уточненных исходных данных. Относительная разница результатов расчетов и экспериментов не превышает 1 % (табл. 3). Это означает, что разработанная модель может быть использована для дальнейшей проработки мер по снижению расхода топлива на перспективных моделях легких коммерческих автомобилей.

В дальнейшем предстоит продолжить использовать разработанную имитационную модель для анализа влияния значений передаточных чисел трансмиссии на показатель топливной экономичности автомобиля.

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

Библиографический список

1. **Кравец, В.Н.** Теория автомобиля / В.Н. Кравец. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2013. – 413 с.
2. ГОСТ Р 54810–2011. Автомобильные транспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытаний. Москва, ФГУП Стандартинформ, 2012. 23 с.
3. **Огороднов, С.М.**, Оценка возможности использования аналитических методов при исследовании топливной экономичности автомобилей / С.М. Огороднов, А.Н. Тихомиров, С.И. Малеев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2015. – С. 10.
4. **Огороднов, С.М.**, Разработка расчетно-экспериментальной методики оценки расхода топлива при движении автомобиля по заданному маршруту / С.М. Огороднов, Д.В. Зезюлин, В.С. Макаров, С.И. Малеев. – 11 с.
5. **Блохин, А.Н.** Разработка методики поиска рациональных передаточных чисел трансмиссии с учетом эксплуатационных свойств и назначения автомобиля: дис. ...канд. тех. наук. Нижний Новгород, 2006. – 256 с.
6. **Валеев, Д.Х.**, Пути снижения расхода топлива грузовых автомобилей / Д.Х. Валеев, В.С. Карабцев // Механика машин, механизмов и материалов, 2014. – 7 с.

*Дата поступления
в редакцию: 23.09.2020*

A.A. Kolin, S.E. Silantjev, P.S. Rogov, S. A. Sergievsky

**APPLICATION OF A SIMULATION MODEL TO DETERMINE THE DYNAMIC
AND FUEL-ECONOMIC PROPERTIES OF THE CAR**

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

Purpose: Development of a simulation model for determining fuel consumption, evaluation of its application by comparing the simulation results with the results of field tests.

Design/methodology/approach: Development of a simulation model of light commercial vehicle traffic in various driving modes that are typical for determining the dynamic and fuel-economic properties of the vehicle under study. In addition, the calculated and experimental data were compared.

Findings: A good agreement was achieved between the obtained computer simulation data and the test results. This gives confidence in the developed simulation model.

Research limitations/implications: Lack of a detailed description of the mathematical model, test conditions, measurement methods, and processing of test results, which slightly reduces the value of research results.

Originality/value: Moreover, the percentage values of the influence of the main parameters such as transmission efficiency, air resistance, wheel rolling coefficient and weight of a light commercial vehicle on its dynamic properties were obtained.

Key words: driving modes, fuel consumption at constant speeds, light commercial vehicle, simulation model.

УДК 629.33

DOI: 10.46960/1810-210X_2020_4_109

Б.Б. Косицын

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАШИНЫ В СОСТАВЕ ИЗНОСОСТОЙКОЙ ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЫ НА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЫСОКОПОДВИЖНЫХ КОЛЕСНЫХ МАШИН

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Повышение энергоэффективности высокоподвижных колесных машин достигнуто путем применения электромашины и бортового накопителя электрической энергии в составе износостойкой тормозной системы. Оценка энергоэффективности проводится с применением комплекса натурно-математического моделирования по результатам виртуальных заездов по совокупности вероятных дорожно-грунтовых условий, имитирующих движение машин в режиме «реального» времени под управлением водителей-операторов. Критерием служит снижение механической энергии, затрачиваемой ДВС в тяговом режиме при движении по трассе, для случаев наличия или отсутствия электромашины в составе износостойкой системы замедления.

Предлагаемый метод позволяет на этапе проектирования оценить эффективность применения электромашины и бортового накопителя электрической энергии в составе износостойкой тормозной системы высокоподвижных колесных машин в условиях, приближенных к реальной эксплуатации. Доказана рациональность применения электромашины и бортового накопителя электрической энергии в износостойкой тормозной системе современных высокоподвижных транспортных средств.

Ключевые слова: энергоэффективность, электромашина, износостойкая тормозная система, комплекс натурно-математического моделирования, колесная машина.

Введение

В настоящее время одними из основных требований, предъявляемых к транспортным машинам, являются низкие затраты энергии на движение и высокая быстроходность. Перспективным подходом для улучшения указанных свойств, помимо увеличения удельной мощности машин, автоматизации трансмиссии, совершенствования системы поддрессоривания и применения систем активной безопасности, выступает увеличение эффективности торможения. Указанный подход связывается не с повышением интенсивности снижения скорости, а с сохранением работоспособности системы торможения при частом служебном замедлении. Таким образом, для современных высокоподвижных транспортных машин актуально применение износостойкой тормозной системы (ИТС), позволяющей снизить нагрузку рабочих тормозных механизмов [1-3]. Кроме того, для повышения энергоэффективности высокоподвижных колесных машин (ВКМ) в составе ИТС рационально применять электромашину, позволяющую рекуперировать часть энергии торможения в бортовой накопитель электрической энергии, которую можно затратить при последующем разгоне [3]. Очевидно, что оценка эффективности применения электромашины и бортового накопителя электрической энергии в составе ИТС ВКМ невозможна без применения имитационного моделирования. Для решения данной задачи применяется разработанный в МГТУ им. Н.Э. Баумана комплекс натурно-математического моделирования [4], позволяющий имитировать движение машины в виртуальном пространстве в режиме «реального» времени под управлением водителя-оператора. Для проведения исследования рассматриваемый комплекс дополняется математической моделью движения ВКМ.

Имитационная модель движения колесной машины

Представленная имитационная модель описывает совместную динамику корпуса, силовой установки и ходовой части ВКМ, а также позволяет исследовать криволинейное дви-

жение машины в комплексе натурно-математического моделирования (рис. 1). Так, в рамках модели ВКМ представляется твердым телом, совершающим плоское движение в горизонтальной плоскости (система уравнений (1), [5-8]). Движение по уклону или косогору моделируется путем введения проекций силы тяжести на продольную и поперечную оси машины.

Для определения величин нормальных реакций, действующих на колеса машины в процессе движения, используется принцип возможных перемещений. Взаимодействие колесного движителя с опорной поверхностью (ОП) описывается согласно подходу, основанному на понятии «эллипса трения» [9]: касательная составляющая реакции в контакте колеса с грунтом направлена противоположно скорости скольжения.

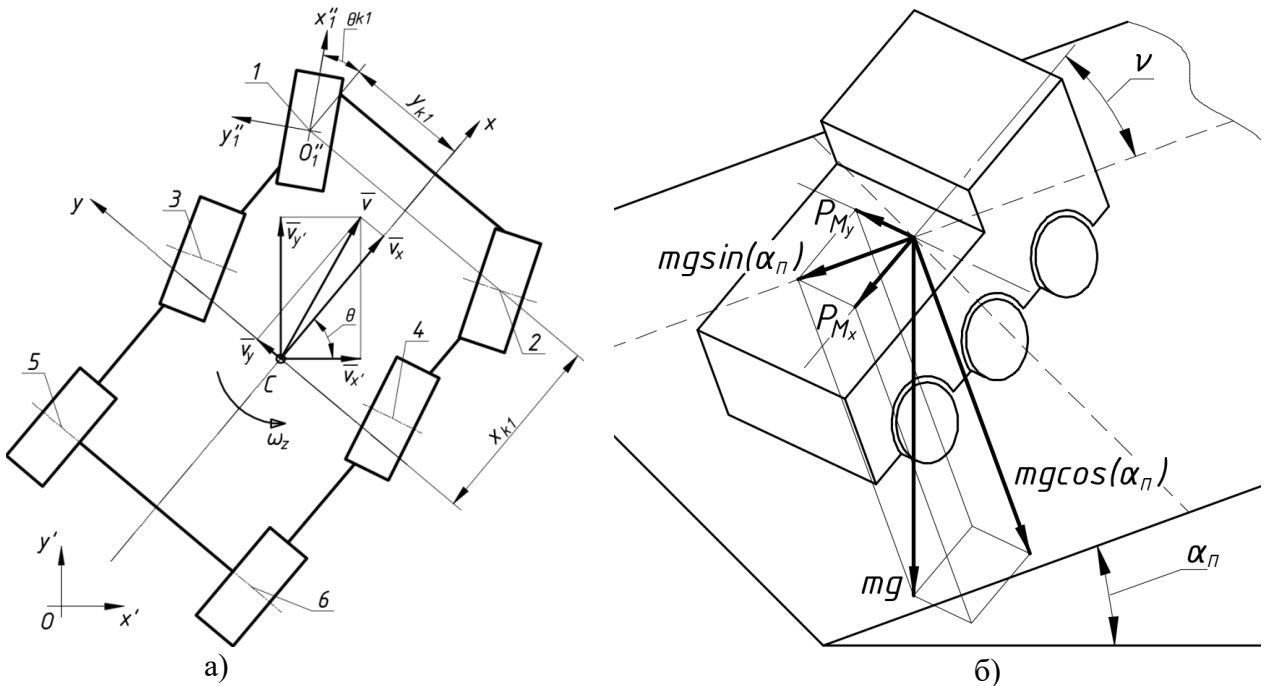


Рис. 1. Расчетная схема движения ВКМ:
а) в горизонтальной плоскости; б) на уклоне/косогоре

$$\begin{cases} a_x = \frac{dv_x}{dt} - \omega_z v_y = \left(\sum_{i=1}^n R_{x_i} - P_w - P_{Mx} \right) / m \\ a_y = \frac{dv_y}{dt} + \omega_z v_x = \left(\sum_{i=1}^n R_{y_i} - P_{My} \right) / m \\ J_z \frac{d\omega_z}{dt} = \sum_{i=1}^n M(R_{y_i}) - \sum_{i=1}^n M(R_{x_i}) - \sum_{i=1}^n M_{сп_i} \end{cases}, \quad (1)$$

где: m – масса машины;

J_z, ω_z – момент инерции и угловая скорость поворота машины относительно оси z (вертикальная ось, проходящая через центр масс ВКМ);

a_x, a_y, v_x, v_y – проекции векторов ускорения и скорости центра масс машины на оси системы координат $x - y$;

$dv_x/dt, dv_y/dt$ – относительная производная вектора скорости центра масс машины в проекциях на оси системы координат $x - y$;

R_{x_i}, R_{y_i} – продольная и поперечная составляющие касательной силы взаимодействия, действующей в пятне контакта i -ого колеса с ОП;

P_w – проекция вектора суммарной аэродинамической силы на продольную ось машины;

$M_{сп_i}$ – момент сопротивления повороту i -ого колеса, обусловленный проскальзыванием элементов пятна контакта при его вращении;

P_{Mx}, P_{My} – проекция силы тяжести ВКМ на продольную и поперечную оси машины;
 n – число колес.

Принципиальная схема трансмиссии ВКМ, дополненная электромашинной (позволяющей рекуперировать часть кинетической энергии движения при торможении) и гидродинамическим ретардером, представлена на рис. 2. Приняты следующие обозначения: ДВС – двигатель внутреннего сгорания; ЭМ – электромашинная; КП – коробка передач; РЕТ – гидродинамический ретардер; ГП – главная передача.

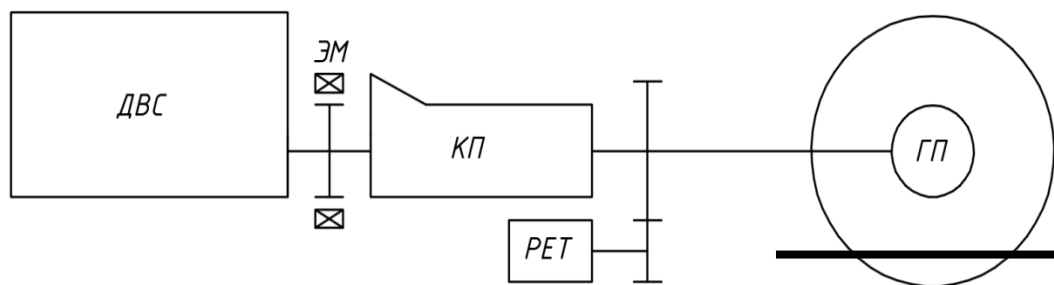


Рис. 2. Принципиальная схема трансмиссии машины

Для оценки эффективности применения электромашинной и бортового накопителя электрической энергии в составе износостойкой тормозной системы ВКМ, представленная имитационная модель динамики машины дополнена математическим описанием ряда агрегатов и систем:

- двигатель внутреннего сгорания с возможностью работы, как в тяговом, так и тормозном режимах;
- электромашинная;
- бортовой накопитель электрической энергии;
- рабочие тормозные механизмы;
- гидродинамический ретардер;
- система охлаждения ДВС и ретардера;
- рулевое управление;
- система управления распределением тяговых/тормозных усилий по элементам трансмиссии машины.

Математическое описание ДВС, электромашинной и гидродинамического ретардера представляет собой связь крутящего момента, частоты вращения и параметра управления каждого узла согласно их механическим характеристикам. Бортовой накопитель электрической энергии описывается как источник постоянного напряжения неограниченной мощности, обладающий конечным запасом энергии. В рамках модели принимается, что тепловая мощность, выделяемая гидродинамическим ретардером в процессе торможения, передается в охлаждающую жидкость (ОЖ) двигателя и рассеивается в радиаторе. Соответственно, математическая модель системы охлаждения ДВС и ретардера предназначена для оценки температуры ОЖ, которая необходима для управления ограничением ретардера по тормозной мощности в случае ее приближения (температуры ОЖ) критическому значению.

Для описания рулевого управления (обеспечения связи углов поворота управляемых колес с поворотом рулевого колеса) применяется традиционный подход – согласно «геометрии» рулевой трапеции. При описании связи между степенью управления, задаваемой водителем (нажатие на педали «газа» или «тормоза»), и степенями управления каждого из агрегатов используется следующая стратегия. В первую очередь, реализация тяговых/тормозных усилий на ведущих колесах обеспечивается за счет электромашинной. В случае недостатка тяговой/тормозной мощности дополнительное усилие на колесах обеспечивается за счет ДВС. Если суммарной тормозной мощности электромашинной и ДВС недостаточно, ее увеличение

достигается за счет включения гидродинамического ретардера. В случае экстренного замедления в дополнение к износостойкой тормозной системе активируются рабочие тормозные механизмы (рис. 3).

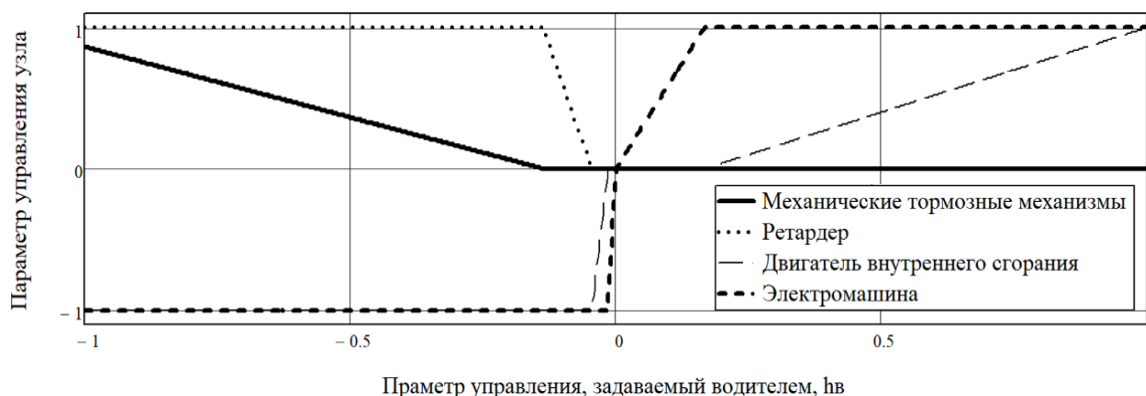


Рис. 3. Срез поверхностей отклика системы распределения тяговых/тормозных усилий

Комплекс натурно-математического моделирования

Используемый в данной работе комплекс натурно-математического моделирования [4] включает следующую аппаратную часть:

- ЭВМ для имитации движения ВКМ в режиме «реального времени», определения траектории движения машины, а также вычисления ее текущих скоростей, ускорений и действующих внешних сил;
- органы управления для обеспечения связи между управляющими воздействиями оператора и системой управления имитационной модели;
- экран для обеспечения зрительной связи водителя с заданной трассой посредством графического интерфейса, позволяющий оператору косвенно оценивать условия движения машины, а также получать информацию о текущих параметрах движения ВКМ.

Общий вид рассматриваемого комплекса представлен на рис. 4 (рабочее место водителя-оператора).



Рис. 4. Общий вид комплекса натурно-математического моделирования (экран и органы управления)

Оценка влияния электромашин и бортового накопителя электрической энергии в ИТС на энергоэффективность ВКМ проводится с применением указанного комплекса натур-

но-математического моделирования путем выполнения многократных виртуальных заездов по статистически заданным трассам. Создание таких трасс происходит методом неканонических представлений по известным корреляционным функциям внешних возмущений, оказывающих влияние на движение машины: кривизна пути, коэффициенты сцепления и сопротивления качению, а также угол наклона опорной поверхности [10]. Общий вид «разыгранной» трассы представлен на рис. 5.

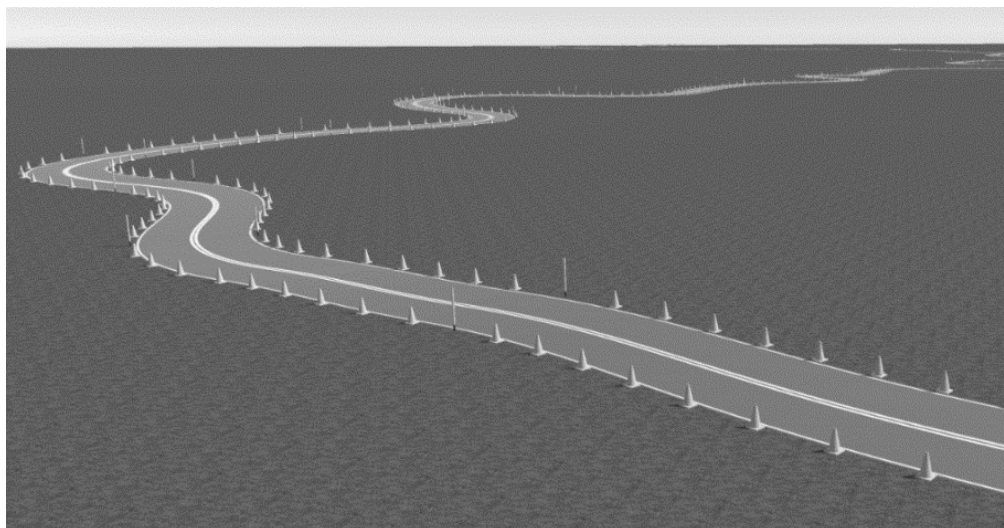


Рис. 5. Общий вид «разыгранной» трассы

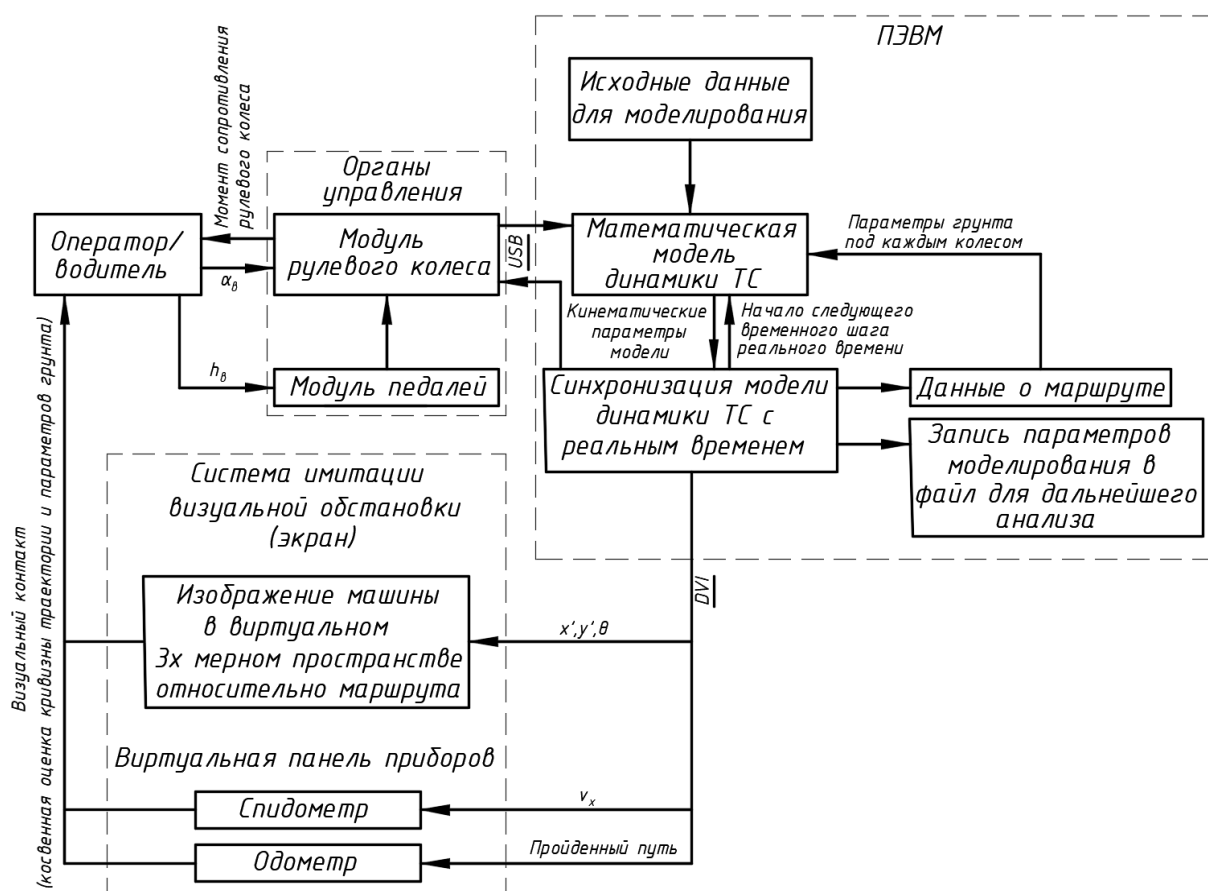


Рис. 6. Структурная схема комплекса натурно-математического моделирования [4]

При создании типового маршрута считается, что ширина дорожного полотна соответствует двухполосной дороге и составляет 7 м. Обочиной служит опорная поверхность типа «дернистый грунт». Структурная схема комплекса натурно-математического моделирования, отражающая связь между его составными элементами и оператором, представлена на рис. 6.

Объекты исследования

Для примера, в качестве объектов исследования используются следующие транспортные средства (рис. 7, 8) с удельной мощностью: ВКМ 6х6 – 12,5 кВт/т, ВКМ 8х8 – 16,5 кВт/т.

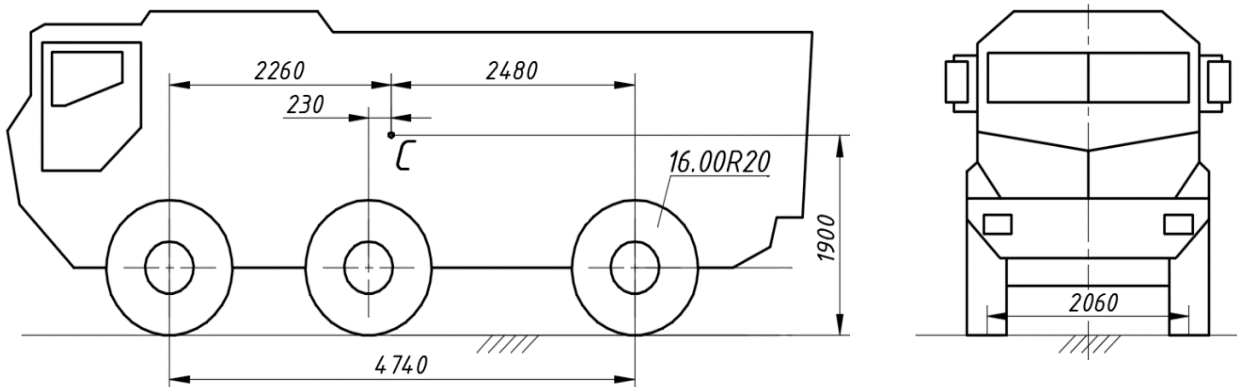


Рис. 7. Геометрические параметры ВКМ 6х6

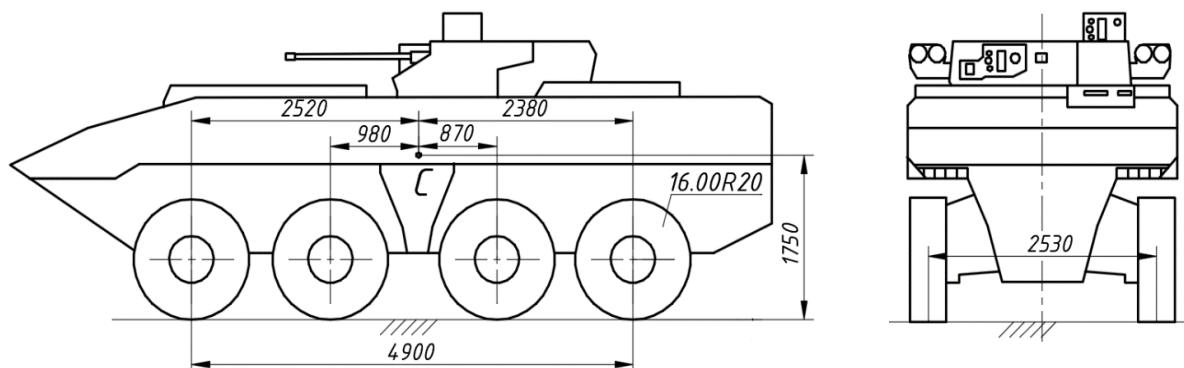


Рис. 8. Геометрические параметры ВКМ 8х8

В рамках виртуального эксперимента в динамической модели используются механические характеристики агрегатов ВКМ (электромашина, гидродинамический ретардер, накопитель электрической энергии), полученные согласно методике [1-3] (табл. 1).

Таблица 1

Требуемые характеристики агрегатов ИТС ВКМ

| ВКМ | Мощность электромашин, кВт | Емкость накопителя энергии, кВт·ч | Коэффициент момента гидротормоза |
|----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| ВКМ 6х6 (без электромашин) | - | - | 0,176 |
| ВКМ 6х6 | 75 | 0,31 | 0,0575 |
| ВКМ 8х8 (без электромашин) | - | - | 0,0774 |
| ВКМ 8х8 | 100 | 0,4 | 0,0366 |

Результаты виртуальных заездов

Оценка энергоэффективности применения электромашины и бортового накопителя электрической энергии в ИТС при движении по совокупности наиболее вероятных дорожно-грунтовых условий (ДГУ) проводится по результатам виртуальных заездов, имитирующих движение машин по типовым трассам в режиме «реального» времени под управлением водителей-операторов с применением комплекса натурно-математического моделирования.

Критерием оценки энергоэффективности применения электромашины служит снижение механической энергии, затрачиваемой ДВС в тяговом режиме при движении по трассе, при наличии или отсутствии электромашины в ИТС. На рис. 9 представлены зависимости механической энергии, затраченной ДВС для обоих составов ИТС ВКМ (представлены результаты заездов по опорной поверхности типа «дорога с твердым покрытием» в случае «равнинного» типа рельефа: максимальный коэффициент взаимодействия с ОП 0,7...0,8, коэффициент сопротивления качению 0,012...0,02). По полученным данным можно сделать вывод, что в рассматриваемом случае применение электромашины в ИТС позволяет снизить энергозатраты ДВС ВКМ 6х6 до 10,9 %, а ВКМ 8х8 до 6,4 %.

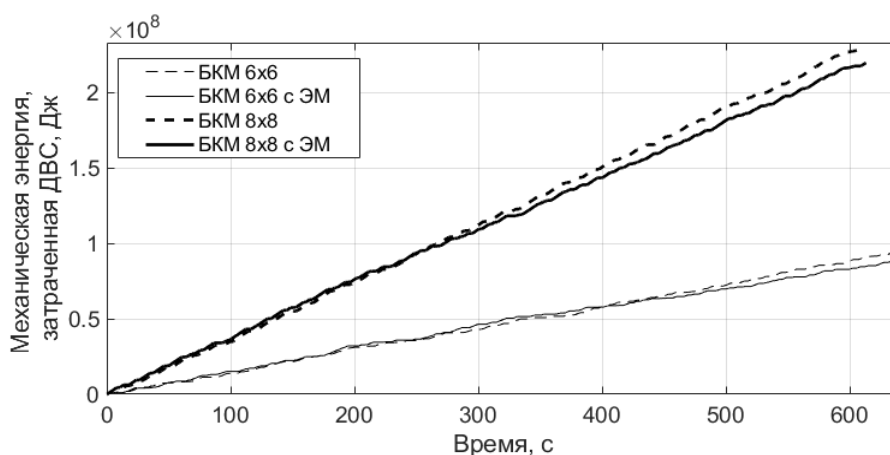


Рис. 9. Сравнение энергии, затраченной ДВС ВКМ во время виртуального заезда при наличии и отсутствии электромашины в ИТС

Полученные величины не достигают расчетных 30 % [3] в связи с тем, что при движении по трассе водитель-оператор стремился обеспечить высокую среднюю скорость ВКМ, при этом прибегая к экстренному торможению и выполняя маневры поворота с боковыми ускорениями близкими к предельным по заносу / опрокидыванию (рис. 10, 11, в качестве примера представлены результаты заезда ВКМ 6х6).

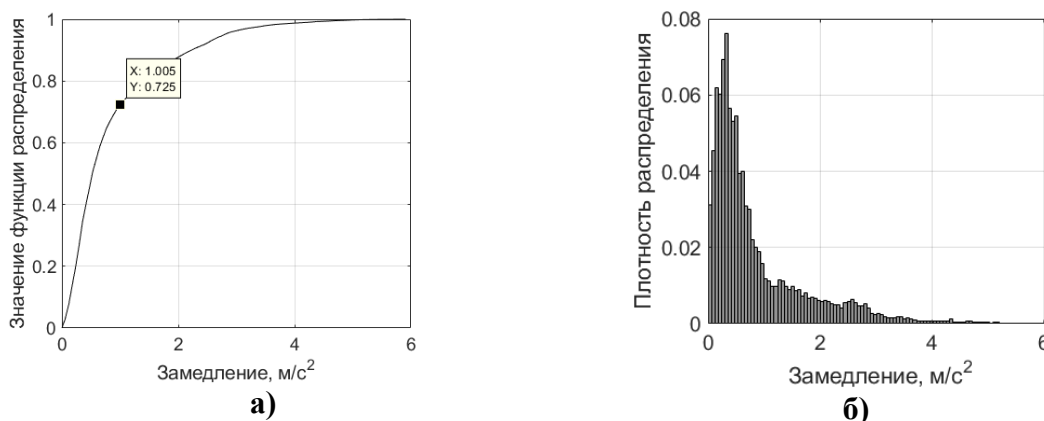
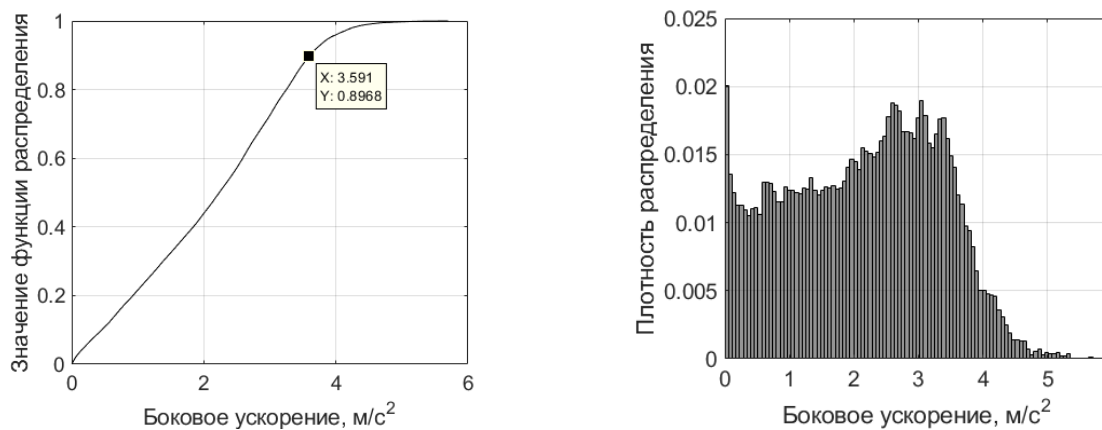


Рис. 10. Функция (а) и плотность (б) распределения замедления ВКМ 6х6



а)

б)

Рис. 11. Функция (а) и плотность (б) распределения бокового ускорения ВКМ 6х6 при движении по трассе

Для оценки адекватности определения емкости бортового накопителя энергии, полученной с применением методики [3], рассмотрим зависимость его уровня заряда (процент энергии, запасенной в накопителе от максимально возможного уровня) в процессе движения по трассе (рис. 12, для примера показаны результаты заезда ВКМ 6х6).

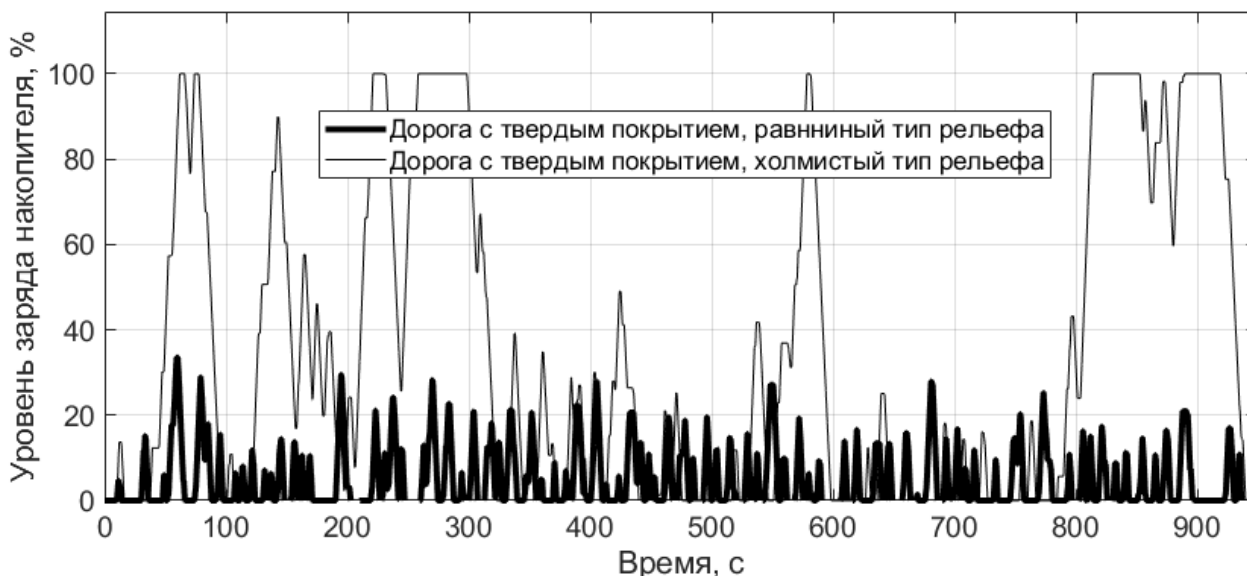


Рис. 12. Изменение уровня заряда накопителя ВКМ 6х6 при движении по трассе

Видно, что при движении по «равнинному» типу рельефа степень заряда накопителя не превышает 30-40 %, а в случае «холмистого» типа рельефа уровень заряда достигает максимальной величины в ~5 % случаев. Можно заключить, что бортового накопителя электрической энергии с выбранной емкостью достаточно для обеспечения энергоэффективного движения рассматриваемой ВКМ по совокупности ДГУ. Результаты виртуальных заездов по оценке снижения энергозатрат для различных дорожных условий и типов рельефа в случае ВКМ 6х6 и ВКМ 8х8 представлены в табл. 2. Тип дорожно-грунтовых условий обозначается как А / В, где А – тип ОП (1 – «дорога с твердым покрытием»; 2 – «булыжная / гравийная / щебеночная дорога»; 3 – «грунтовая дорога в удовлетворительном состоянии»), В – тип рельефа (1 – «равнинный»; 2 – «холмистый»).

Таблица 2

Снижение затрат механической энергии ДВС

| ДГУ | Снижение затрат энергии ДВС, % | |
|-----|--------------------------------|---------|
| | ВКМ 6x6 | ВКМ 8x8 |
| 1/1 | 8,6 | 6,4 |
| 2/1 | 14,6 | 5 |
| 3/1 | 13,7 | 11,2 |
| 1/2 | 12,7 | 4 |
| 2/2 | 4,1 | 4,5 |
| 3/2 | 5 | 4,2 |

Заключение

В случае интенсивного режима движения применение электромашины в ИТС позволит снизить энергозатраты ДВС: в случае ВКМ 6x6 до 14,6 %, в случае ВКМ 8x8 до 11,2 %. При этом представленные величины согласуются с результатами, полученными в рамках использования квазистационарной модели ВКМ [3]. Указанное обстоятельство подтверждает состоятельность выводов, полученных в работе [3], и актуальность применения электромашины и бортового накопителя электрической энергии в составе ИТС современных высокоподвижных транспортных средств. Методика [3] позволяет определить рациональную емкость бортового накопителя электроэнергии, обеспечивающую энергоэффективное движение машины по совокупности ДГУ.

Библиографический список

1. **Котиев, Г.О.** Определение потребного уровня замедления высокоподвижных колесных машин при использовании износостойкой тормозной системы / Г.О. Котиев, И.Ф. Гумеров, А.А. Стадухин, Б.Б. Косицын // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2019. – №4 (127). – С. 146-157.
2. **Котиев, Г.О.** Определение механических характеристик узлов износостойкой тормозной системы высокоподвижных колесных машин / Г.О. Котиев, И.Ф. Гумеров, А.А. Стадухин, Б.Б. Косицын // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2020. – №1 (128). – С. 131-141.
3. **Котиев, Г.О.** Выбор емкости бортового накопителя энергии при использовании электромашины в износостойкой тормозной системе высокоподвижных колесных машин / Г.О. Котиев, И.Ф. Гумеров, А.А. Стадухин, Б.Б. Косицын // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2020. – №2 (129). – С. 126-133.
4. **Косицын, Б.Б.** Определение характеристик трансмиссий колёсных и гусеничных машин с индивидуальным электроприводом ведущих колес / Б.Б. Косицын, Г.О. Котиев, А.В. Мирошниченко, Б.В. Падалкин, А.А. Стадухин // Труды НАМИ. – 2019. – № 3 (278). – С. 22-35.
5. **Котиев, Г.О.** Математическая модель криволинейного движения автомобиля с колесной формулой 8x8 при различных способах управления поворотом / Г.О. Котиев, Н.В. Чернышев, В.А. Горелов // Журнал автомобильных инженеров. – 2009. – №2. – С. 34-39.
6. **Kotiev, G.** Selection of the combat vehicle individual wheel drive operation modes under required mobility criteria / G. Kotiev, V. Padalkin, A. Miroshnichenko, A. Stadukhin, V. Kositsyn // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 820 (2020), IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 820 (2020), Moscow; Russian Federation doi:10.1088/1757-899X/820/1/012006
7. **Котиев, Г.О.** Разработка закона управления индивидуальным приводом движителей многоосной колесной машины / Г.О. Котиев, В.А. Горелов, А.В. Мирошниченко // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2012. – № 1. – С. 49-59.
8. **Котиев, Г.О.** Математическая модель движения вездеходного транспортного средства / Г.О. Котиев, В.А. Горелов, А.А. Бекетов // Журнал автомобильных инженеров. – 2008. – №1. – С. 50-54.
9. **Рождественский, Ю.Л.** О формировании реакций при качении упругого колеса по недеформируемому основанию / Ю.Л. Рождественский, К.Ю. Машков // Труды МВТУ. – 1982. – № 390. – С. 56-64.

10. **Косицын, Б.Б.** Моделирование реализаций случайных функций характеристик дорожно-грунтовых условий при исследовании динамики колесных и гусеничных машин на этапе проектирования / Б.Б. Косицын, А.В. Мирошниченко, А.А. Стадухин // Известия МГТУ «МАМИ». – М., 2019. Вып. №3 (41). – С. 36-46 DOI: 10.31992/2074-0530-2019-41-3-36-46

*Дата поступления
в редакцию: 21.09.2020*

B.B. Kositsyn

**ASSESSMENT OF THE IMPACT OF AN ELECTRIC MOTOR AS PART
OF AN AUXILIARY BRAKE SYSTEM ON THE ENERGY EFFICIENCY
OF HIGH-MOBILITY WHEELED VEHICLES**

Bauman Moscow State Technical University

Introduction. In the modern world, one of the main requirements for transport vehicles is low energy consumption and high speed. To improve these properties, a promising approach is to increase the braking efficiency. Moreover, in this case, we are talking about maintaining the performance of the braking system with frequent service deceleration in various road conditions. Thus, for modern high-mobility transport vehicles, it is reasonable to use an auxiliary wear-resistant brake system, which would reduce the load on the service brake gear and prevent its failure in heavy operation modes. At the same time, to improve the energy efficiency of the vehicles under consideration, it is rational to use an electric motor as a part of the auxiliary brake system, which recovers a portion of the braking energy and stores it in the on-board electric energy storage device.

Subject of research. The purpose of this study is to increase the energy efficiency of high-mobility wheeled vehicles by using an electric motor and an on-board electric energy storage device as part of an auxiliary wear-resistant brake system.

Methodology and methods. To assess the effectiveness of an electric motor and an on-board electric energy storage device as a part of the wear-resistant auxiliary brake system of modern high-mobility vehicles, a real-time driving simulator is used. Thus, the energy efficiency assessment is based on the results of real time virtual driving along a set of routes with stochastic road and ground conditions under the control of driver operators. The criterion for evaluating energy efficiency is a reduction in the mechanical energy consumed by the internal combustion engine in traction mode on the route, with and without an electric motor as a part of the wear-resistant auxiliary brake system.

Results and scientific novelty. The method presented in this paper allows evaluating the effectiveness of an electric motor and an on-board electric energy storage device as a part of the auxiliary brake system for high-mobility wheeled vehicles in the conditions close to real operation ones at the design stage.

Practical significance. As a part of the work, the efficiency of using an electric motor and an on-board electric energy storage device in the auxiliary brake system of modern high-mobility vehicles has been proved.

Key words: energy efficiency, electric motor, auxiliary brake system, real-time driving simulator, wheeled vehicle.

УДК 629. 336

DOI: 10.46960/1810-210X_2020_4_119

Д.М. Порубов, А.А. Гладышев, Д.Ю. Тюгин, П.О. Береснев, В.И. Филатов, А.В. Пинчин

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПОЛОСЫ ДВИЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Способ повышения безопасности движения автотранспортных средств за счет применения систем ADAS успешно зарекомендовал себя на практике. Применение в составе автомобилей систем ADAS является обязательным во многих странах мира и закреплено на государственном уровне. Одной из наиболее применяемых систем ADAS является система предупреждения о непреднамеренном сходе с полосы движения (LDWS). Приведено описание принципов работы существующих систем LDWS в сегменте легких коммерческих транспортных средств (LCV). Представлены алгоритм и структура разрабатываемой системы LDWS для автомобиля ГАЗель Next. Дано описание и анализ алгоритмов распознавания дорожной разметки. Приведены результаты и сравнительный анализ виртуальных испытаний системы LDWS. Даны выводы о работе системы и алгоритме распознавания дорожной разметки.

Ключевые слова: система помощи водителю, выход из полосы движения, система удержания в полосе движения, легкие коммерческие автомобили.

Введение

Применение в составе автомобилей систем ADAS является обязательным во многих странах мира и закреплено на государственном уровне. Одной из наиболее применяемых систем ADAS является система предупреждения о непреднамеренном сходе с полосы движения (LDWS). Система LDWS занимает широкую нишу в сегменте легкового транспорта за исключением бюджетных моделей, а также, частично сегмент легкого коммерческого транспорта. Как правило, такие системы предлагаются в качестве дополнительного оборудования и являются доступными у многих крупных автопроизводителей.

Система помощи водителю о непреднамеренном выходе из полосы движения (LDWS) – это функционал ТС, предназначенный для предупреждения водителя о том, что транспортное средство начинает выезжать с полосы движения (если в этом направлении не включен сигнал поворота) на автомагистралях и магистральных дорогах, чтобы водитель смог принять необходимые корректирующие меры. Такие системы предназначены для минимизации аварий за счет устранения основных причин столкновений: ошибок водителя, отвлекающих факторов и сонливости. Исследованию алгоритмов работы таких систем и посвящена данная статья.

Краткий обзор систем LDWS

В настоящее время на рынке представлен ряд систем, большинство из которых используют ориентированную вперед, установленную за ветровым стеклом, видеокамеру. В редких случаях системы используют инфракрасные датчики или технологии лазерного сканирования. Современные системы используют различные типы предупреждений: визуальные, звуковые или тактильные, или их комбинацию.

Функционирование системы LDWS на базе видеокамеры осуществляется путем оценки текущего положения и направления транспортного средства в пределах полосы движения, с помощью определения линий дорожной разметки, разграничивающих полосу движения,

из входящего видеопотока или изображений участков дороги, снятых камерой, установленной на переднем ветровом стекле транспортного средства [1-5].

Ниже представлена сводная таблица с некоторыми системами LDWS от различных автопроизводителей в сегменте легкого коммерческого транспорта.

Таблица 1

**Системы LDWS различных автопроизводителей
для легких коммерческих автомобилей**

| <i>Производитель</i> | <i>Модель ТС</i> | <i>Название</i> |
|----------------------|------------------|--|
| Fiat [6] | Ducato | Lane Departure Warning System |
| Ford [7] | Transit | Lane keeping system |
| Mercedes-Benz [8] | Sprinter | Active lane keeping assist |
| Volkswagen [9] | Crafter | Lane keeping assist system |
| Citroen [10] | Jumper | Alerte de franchissement involontaire de ligne(AFIL) |
| Peugeot [11] | Boxer | Alerte de franchissement involontaire de ligne(AFIL) |
| Renault [12] | Master | Lane Departure Warning |

В основе работы всех этих систем лежат два последовательных этапа.

1. Обработка изображения с камеры, расположенной на лобовом стекле автомобиля, с целью поиска линий разметки.

2. Процесс принятия решения о том, необходимо ли подать водителю предупреждающий сигнал о непреднамеренном выходе из полосы движения.

Этап детектирования дорожной разметки также может включать в себя несколько последовательных шагов.

1. Предварительная фильтрация изображения для подавления возможных шумов.

2. Детектирование самой разметки с помощью методов технического зрения и/или нейронных сетей.

3. Постобработка найденных линий для отсека ложных или некорректных срабатываний.

Известны основные ситуации, которые могут приводить к некорректной работе. Некоторые из них описаны в работе [13]:

- нечеткие линии дорожной разметки (перекрытие линий, истертость линий, загрязненность линий, линии слабо контрастируют с дорожным полотном);
- сильная нагрузка задней оси ТС;
- резкая смена освещения (въезд/выезд из тоннеля);
- наличие нескольких полос движения;
- быстрое изменение ограничительных линий разметки;
- перекрытие линий дорожной разметки другими ТС;
- крутые повороты;
- повреждение или загрязнение ветрового стекла в непосредственной близости к сенсору.

Разработка системы LDWS

Группой исследователей из НГТУ разрабатывается собственная система LDWS для применения в сегменте легкого коммерческого транспорта, в частности, на автомобиле Газель Next. За основу подхода были использованы алгоритмы технического зрения. Выбор в пользу данного подхода был определен рядом преимуществ.

1. Простота и прозрачность решения: алгоритмы [14-21], в данном подходе, уже давно разработаны и неоднократно протестированы.

2. Производительность – в общем случае, производительность алгоритмических методов выше, чем у нейронных сетей. Это является немаловажным преимуществом, так как

дает возможность удешевления стоимости всей системы за счет выбора менее производительного вычислительного блока, что сделает ее более доступной.

3. Адаптивность – все решение представляет из себя набор последовательных блоков. Каждый из последовательных блоков является зависимым от предыдущего в плане входных/выходных данных, но содержание отдельно взятого блока можно изменить. Например, алгоритмический блок поиска дорожной разметки в будущем может быть заменен на блок, который использует в себе нейронные сети. Тогда для сохранения работоспособности всей системы в целом будет достаточно того, чтобы его выходные данные были такими же, как и у алгоритмического.

Схематично основной цикл работы системы можно представить следующим образом (рис. 1):

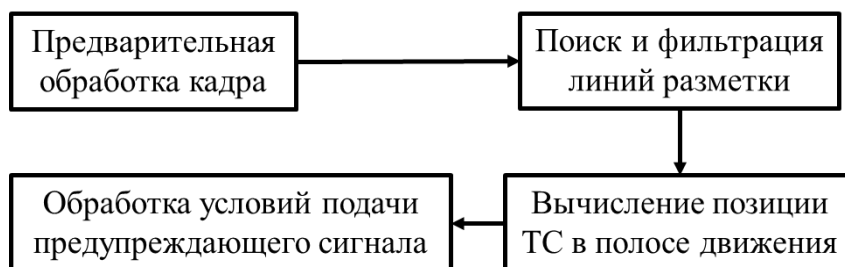


Рис. 1. Основной цикл работы LDWS

Приведенный выше цикл работы состоит из следующих ключевых методов.

1. Оператор Кэнни [14] для выделения границ.

Применение данной операции к полутоновому изображению позволяет выделить на нем границы, которые соответствуют перепадам в цветах. В данном случае это решение оправдано тем, что разметка имеет отличный от асфальта цвет, т.е. имеет явную разницу в цветах.

2. Дилатация [15] (расширение) найденных границ.

Найденные на предыдущем шаге границы проходят процедуру дилатации. Это подготовительный шаг для последующих этапов. Его суть заключается в том, чтобы расширить найденные на изображении границы.

3. Выделение целевых цветов на изображении.

Как уже говорилось ранее, выделение границ с помощью оператора Кэнни находит все перепады (градиенты) цветов, однако, они могут относиться не только к дорожной разметке. Они также могут быть найдены на бордюрах, установленных вдоль дороги, или при особом расположении теней от объектов на дороге.

Для того, чтобы отсечь ненужные границы, производится дополнительная операция по выделению нужных (целевых) цветов на изображении (белых и желтых). Выделение цветов происходит с помощью пороговых отсечений значений пикселей изображения.

Перед применением порогового отсечения стоит также применить метод выравнивания гистограммы распределения цветов, который улучшает контрастность изображения.

4. Побитовое пересечение бинарных изображений.

Оператор Кэнни, к сожалению, может выделять не только интересующие нас линии дорожной разметки, но и побочные границы. Выделение целевых цветов на изображении с помощью пороговых значений, зачастую, является зашумленным, т.к. пороги приходится занижать для того, чтобы они работали в различных условиях. Поэтому для компенсации недостатков двух этих подходов происходит их побитовое пересечение.

На вход данной операции поступают изображение из пункта 2 (дилатация) и изображение из пункта 3 (выделение целевых цветов). Результирующее изображение получается путем наложения входных изображений друг на друга и «включением» только тех пикселей, в которых на обоих изображениях было значение, отличное от нулевого.

5. Преобразование Хафа [16, 17] для поиска прямых линий.

Бинарное изображение, полученное на предыдущем пункте, отправляется на вход преобразования Хафа. Оно позволяет подобрать параметры прямых линий, которые могли бы находиться на подготовленном бинарном изображении.

6. Первоначальная фильтрация линий по углу наклона.

После того, как параметры возможных линий разметки были найдены, происходит их первоначальная фильтрация по углу наклона. Этот этап нужен, чтобы сразу отсеять горизонтальные и вертикальные линии, которые заведомо не могут быть интересующей нас разметкой. Попутно с этим происходит разделение линий на левые и правые прямые по углу наклона.

7. Объединение близких линий в группы (кластера).

Отфильтрованные линии необходимо кластеризовать. Это связано с тем, что на одну и ту же линию разметки может быть подобрано несколько параметров прямых. Кластеризация нужна для того, чтобы усреднить все эти параметры и получить одну линию. В качестве метода кластеризации был выбран алгоритм DBSCAN[18].

8. Усреднение параметров прямых по кластерам.

После того, как кластеризация была проделана, производится усреднение прямых в этих кластерах, чтобы для каждой линии разметки была только одна прямая.

9. Перевод линий в bird's eye view формат [19].

На данном этапе линии переводятся из исходного изображения в bird's eye view формат. Это делает линии более отделимыми друг от друга, и позволяет накладывать на них осмысленные физические ограничения. Например, что расстояние между двумя соседними линиями разметки не может быть меньше, чем один метр.

10. Многообъектный фильтр частиц [20], [21].

После того, как прямые были преобразованы в bird's eye view, они отправляются на обработку в многообъектный фильтр частиц. Это позволяет скомпенсировать шум, который может присутствовать при подборе параметров прямых. Также за счет этого происходит снижение влияния выбросов, которые случаются из-за различных внешних условий среды. В дополнение этот процесс позволяет еще некоторое время (параметризуемое значение) восстанавливать линии, которые перестали детектироваться.

11. Алгоритм принятия решения.

После того, как линии разметки были найдены и отфильтрованы, на их основе рассчитывается относительное положение ТС внутри полосы движения. Далее, в зависимости от выполнения условий, может подаваться или не подаваться предупреждающий сигнал.

После завершения этапа разработки системы была проведена серия испытаний для того, чтобы протестировать разработанные модули и оценить работоспособность системы LDWS в виртуальных и дорожных условиях.

Испытания

Испытания системы проводились согласно двум основным нормативным документам для системы LDWS:

- Правила ЕЭК ООН 130 [22];
- Стандарт ISO 17361 [23].

Все подготовленные и проведенные тесты были направлены на проверку следующих пунктов:

- работа логической составляющей системы (включение, активация, смена режимов и т.д.);
- способность системы распознавать разметку;
- способность системы позиционировать ТС внутри полосы движения;

- способность системы подавать предупреждающий сигнал в нужное время.

Тестирование проводилось в виртуальной среде симулятора Carla [24, 25]. Одним из важных преимуществ тестирования системы на симуляторе является возможность оценивать работоспособность системы не только качественно, но и количественно. Это означает, что можно, например, сравнивать расстояние до линий разметки, которое выдает система, с тем, которое выдает симулятор. За счет этого можно получить количественную оценку точности позиционирования системы в полосе движения. Ниже приведена демонстрация данной оценки (рис. 2).

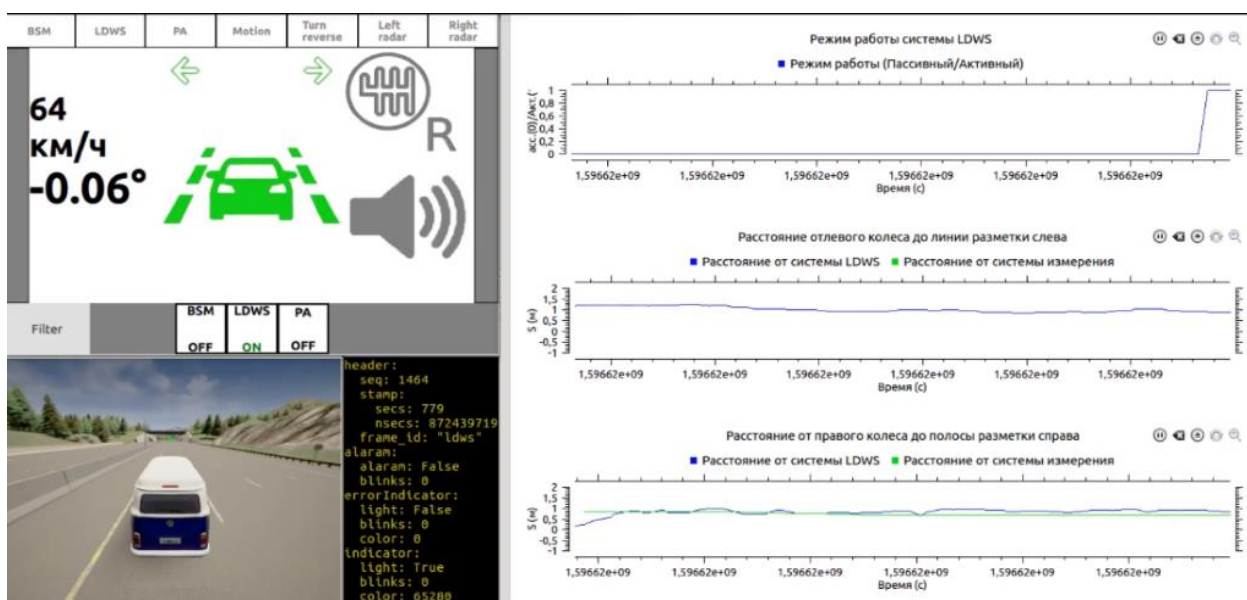


Рис. 2. Сравнение расстояний до линий дорожной разметки, которые выдает система и симулятор

Тестирование системы на симуляторе позволило отметить ряд ошибок во время разработки (в том числе и неудобства с точки зрения использования) еще на этапе разработки и до сборки реального прототипа. В качестве примера приведем тест, который является целевым с точки зрения применения системы: непреднамеренный выход из полосы движения.

Условия теста:

- ТС движется прямолинейно внутри полосы движения со скоростью 65 км/ч;
- начиная с некоторого момента ТС начинает выход из полосы движения;
- указатели поворота отключены;
- скорость выхода достигает 0.1 м/с;
- расстояние подачи предупреждающего сигнала: 0.75 м от соответствующей линии разметки внутрь полосы движения, 0.3 м от линии разметки за пределы полосы движения.

Ниже приведены графики, описывающий часть внутреннего состояния системы, на основе которых она принимает решение и возможном предупреждении водителя ТС о непреднамеренном выходе из полосы движения (рис. 3).

В данном примере ТС совершает выход из полосы движения в правую сторону:

- первый график показывает расстояние от правого колеса ТС до правой линии разметки;
- второй сверху график отражает факт пересечения транспортным средством WarningZone;
- видно, что значения графика соответствуют описанным выше условиям;

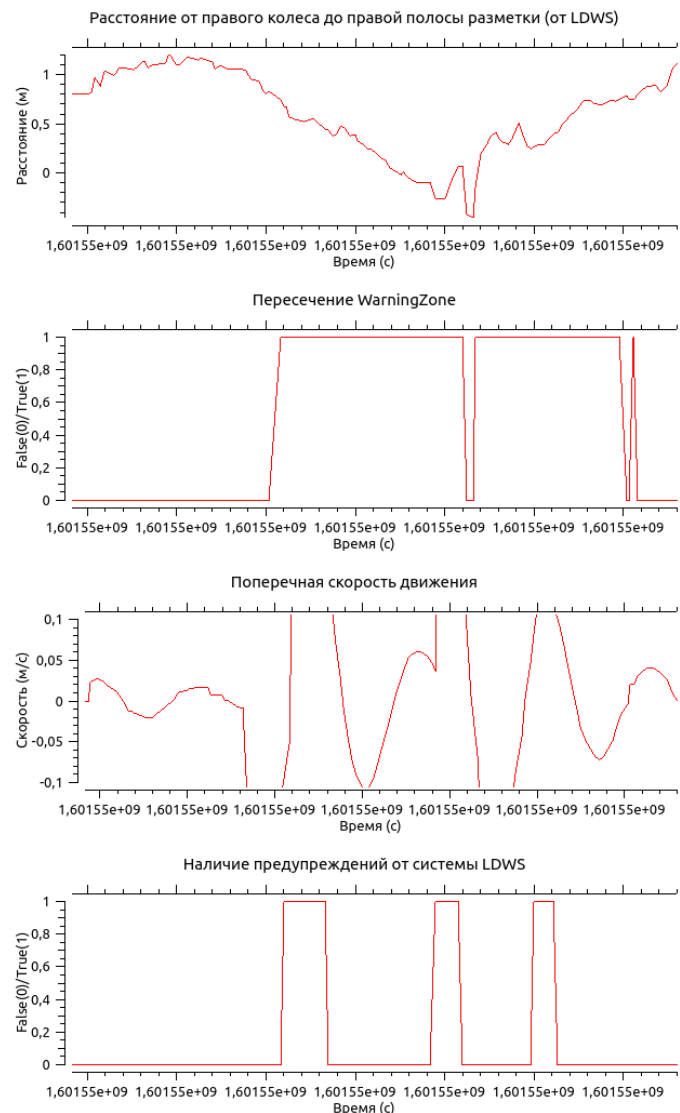


Рис. 3. Испытание работы системы при выходе ТС из полосы движения (компьютерное моделирование с помощью симулятора)

- третий сверху график показывает поперечную скорость ТС (скорость выхода из полосы движения). Положительные значения скорости означают, что ТС движется вправо, отрицательные – влево;
- четвертый график отражает факт наличия предупреждающего сигнала от системы. Видно, что сигнал подается только в тех случаях, когда ТС находится в WarningZone, поперечная скорость вышеописанного ранее порога, а также направление поперечной скорости соответствует стороне выхода.

Проведение испытаний позволило отработать все аспекты поведения системы в виртуальной среде. Были выявлены и устранены все обнаруженные недочеты, допущенные в процессе разработки.

Выводы

Рассмотрены способы повышения безопасности дорожного движения с помощью систем активной помощи водителю на примере системы LDWS. Приведены примеры существующих и применяемых на серийных автомобилях систем LDWS. Представлен алгоритм и структура разрабатываемой системы LDWS для автомобиля ГАЗель Next, состоящий из предварительной обработки видеокadra, поиска и фильтрации линий разметки, вычисления

позиции ТС в полосе движения и обработки условий подачи предупреждающего сигнала. Для данного решения были проведены испытания при помощи симулятора Carla. На основе результатов, полученных в процессе проведенных испытаний разрабатываемого алгоритма можно выделить основные преимущества и недостатки.

Преимущества:

- понятность и простота реализации;
- высокая производительность работы всей системы;
- низкие требования к вычислительным мощностям.

Недостатки ([13]):

- чувствительность алгоритма к цветам на кадре, а именно к желтым цветам на закате;
- сбои при резких перепадах освещения;
- сбои при наличии бликующих поверхностей в солнечную погоду.

Таким образом, алгоритмические методы технического зрения, применяемые для распознавания дорожной разметки и реализации функции LDWS, являются стабильно работающими в хороших условиях, но в них возможны ложные срабатывания. Основной причиной срабатываний является чувствительность данной технологии к условиям внешнего освещения. В дальнейшем планируется проведение натурных испытаний на специально подготовленном полигоне, а также проведение работ по настройке системы, модернизации работы алгоритмов и интерфейса.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках проекта "Создание высокотехнологичного производства модельного ряда автомобилей ГАЗель Next с новой электронной архитектурой электронных систем" по Соглашению № 075-11-2019-027 от 29.11.2019 (постановление Правительства Российской Федерации от 09 апреля 2010 года №218).

Библиографический список

1. **Neumann-Cosel, K.** Preadjustment of a Vision-Based Lane Tracker-Using Virtual Test drive within a Hardware in the Loop Simulator / K. Neumann-Cosel et al.//Proceedings of the Driving Simulation Conference Monaco, 2009.
2. **Amditis, A.** A situation-adaptive lane-keeping support system: Overview of the safelane approach / A. Amditis et al. // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2010. – Т. 11. – №. 3. – С. 617-629.
3. **Deusch, H.** A random finite set approach to multiple lane detection / H. Deusch et al. // 2012 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. – IEEE, 2012. – С. 270-275.
4. Ambarak J.M. A neural network for predicting unintentional lane departures / J.M. Ambarak et al. // 2017 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). – IEEE, 2017. – С. 492-497.
5. **Hamid, U.Z.A.** Current collision mitigation technologies for advanced driver assistance systems—a survey / U.Z.A. Hamid et al. // Perintis eJournal. – 2016. – Т. 6. – №. 2.
6. FIAT [Электронный ресурс]: [офиц. сайт]. – Электрон. дан. Режим доступа: <https://www.fiatprofessional.ru/>, свободный.
7. FORD [Электронный ресурс]: [офиц. сайт]. – Электрон. дан. Режим доступа: <http://www.ford.ru/Commercialvehicles>, свободный.
8. MERCEDES-BENZ [Электронный ресурс]: [офиц. сайт]. – Электрон. дан. Режим доступа: http://www.mercedes-benz.ru/content/russia/mpc/mpc_russia_website/ru/home_mpc/van.html, свободный.
9. VOLKSWAGEN [Электронный ресурс]: [офиц. сайт]. – Электрон. дан. Режим доступа: <https://www.volkswagen-commercial.ru/ru.html>, свободный.
10. CITROEN [Электронный ресурс]: [офиц. сайт]. – Электрон. дан. Режим доступа: <http://www.citroen.ru/index.html>, свободный.

11. PEUGEOT [Электронный ресурс]: [официальный сайт]. – Электрон. дан. Режим доступа: <http://www.peugeot.ru/index.html>, свободный.
12. RENAULT [Электронный ресурс]: [официальный сайт]. – Электрон. дан. Режим доступа: <https://www.renault.ru/vans/>, свободный.
13. **Nixon, M.** Feature extraction and image processing for computer vision / M. Nixon, A. Aguado. – Academic press, 2019.
14. **Canny, J.** A Computational Approach To Edge Detection / J. Canny // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8(6):679–698, 1986.
15. **Serra, J.** Image analysis and mathematical morphology / J. Serra. – Academic Press, Inc., 1983.
16. **Hough, P.V.C.** Method and means for recognizing complex patterns : пат. 3069654 США / P.V.C. Hough, 1962.
17. **Duda, R.O.** Use of the Hough transforms to detect lines and curves in pictures / R.O. Duda // Commun. ACM. – 1992. – Т. 15. – №. 1. – С. 327-336.
18. **Ester, M.** A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise / M. Ester et al. // Kdd. – 1996. – Т. 96. – №. 34. – С. 226-231.
19. **Carlsson, I.** Planar geometric projections and viewing transformations / I. Carlsson, J. Paciorek // ACM Computing Surveys (CSUR). – 1978. – Т. 10. – №. 4. – С. 465-502.
20. **Thrun, S.** Probabilistic / S. Thrun, W. Burgard, D. Fox // Robotics (Intelligent Robotics and Autonomous Agents), 2005.
21. Правила ЕЭК ООН №130-2013. Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения механических транспортных средств в отношении системы предупреждения о выходе из полосы движения (СПВП).
22. ISO 17361 -2017. Intelligent transport systems – Lane departure warning systems – Performance requirements and test procedures.
23. **Mahler, R.P.S.** Statistical multisource-multitarget information fusion / R.P.S. Mahler. – Artech House, Inc., 2007.
24. **Dosovitskiy, Alexey** CARLA: An Open Urban Driving Simulator / Alexey Dosovitskiy, German Ros, Felipe Codevilla, Antonio Lopez, Vladlen Koltun // In Proceedings of the 1st Annual Conference on Robot Learning (pp. 1-16).2017.
25. CARLA Open-source simulator for autonomous driving research. // <http://carla.org/>

*Дата поступления
в редакцию: 20.09.2020*

D.M. Porubov, A.A. Gladyshev, D.Yu. Tyugin, P.O. Beresnev, V.I. Filatov, A.V. Pinchin

DEVELOPMENT OF LANE DEPARTURE WARNING SYSTEM BASED ON TECHNICAL VISION

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

Purpose: The paper is devoted to the description of the development of a lane departure warning system.

Design / methodology / approach: A market survey of existing systems in the field of lane departure warning systems from various car manufacturers has been carried out.

Findings: Based on the conclusions made after analyzing the results of the review, an algorithm for the functioning of the system is proposed, and methods for the road markings recognition and interpretation are described. Virtual tests of the system were carried out in the CARLA simulator.

Research limitations/implications: Limitations of the developed system are described.

Originality/value: The developed system is specially designed to be used in GAZ Group's light commercial vehicles.

Key words: advanced driver assistance system, driver assistance, lane departure, lane keeping system, light commercial vehicles.

УДК 630*377:504.03

DOI: 10.46960/1810-210X_2020_4_127

А.А. Стадухин

ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАНИЦ ПРИМЕНИМОСТИ КЛАССИЧЕСКОГО ТЯГОВОГО РАСЧЕТА ПОВОРОТА ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ И МЕТОД ЕГО УТОЧНЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Установлено, что применение классических аналитических зависимостей тягового расчета поворота гусеничных машин ограничивается низкой точностью определения коэффициента сопротивления повороту и взаимосвязи фактического и теоретического радиусов поворота. Представлен сравнительный анализ результатов, получаемых по классической методике, и результатов, получаемых с помощью более сложной стационарной модели поворота гусеничной машины. Проведено исследование по определению параметров гусеничной машины и условий движения в наибольшей степени влияющие на указанные параметры. Сложная зависимость коэффициента сопротивления повороту и отношения фактического и теоретического радиусов поворота от параметров поворота гусеничной машины аппроксимирована нейронной сетью, которую возможно использовать для уточненных расчетов. Обосновано применение выбранной архитектуры нейронной сети.

Для выбранного режима движения гусеничной машины выполнено определение потребных сил тяги, скоростей перемотки гусеницы и необходимой мощности. Таким образом, подтверждена эффективность применения аппроксимации нейронной сетью выбранной архитектуры в сравнении с математической моделью стационарного поворота ГМ и классическим подходом к тяговому расчету.

Ключевые слова: гусеничная машина, поворота, моделирование, тяговый расчет, нейронная сеть.

Введение

При криволинейном движении на гусеничную машину (ГМ) действует значительный по величине момент сопротивления повороту. Он образуется из-за сил трения в пятне контакта с опорным основанием и нагребания грунтового вала торцами гусениц. Классический подход к определению момента сопротивления повороту заключается в использовании коэффициента μ [1]. Точность используемого в настоящее время метода определения потребных сил тяги гусеничных машин в повороте (тягового расчета) во многом основана на корректности определения μ . Наиболее распространенной в литературе [1-5] является зависимость, полученная профессором А.О. Никитиным в 1950-х гг. в результате серии экспериментов (следует отметить, что и в настоящее время проводятся подобные эксперименты по определению коэффициента сопротивления повороту [6]). Эта формула хорошо описывает зависимость момента сопротивления повороту от радиуса поворота для ряда машин, характерных для того времени, однако применение ее для современных высокоподвижных гусеничных машин является не вполне обоснованным.

По мере приближения скорости движения ГМ к критической по заносу, существующие аналитические выражения, применяемые в ходе тягового расчета, перестают быть адекватными. В связи с этим, для исследования режимов нагружения трансмиссии при движении ГМ на околозаносной скорости необходимо использовать достаточно сложные компьютерные имитационные модели, позволяющие полноценно описывать взаимодействие каждого активного участка гусеницы с опорной поверхностью как в нормальном, так и касательном направлениях. Подобный подход [7-9] был взят за основу при создании математической модели, предназначенной для исследования гусеничных машин в широком диапазоне изменения параметров ходовой части и условий движения. С помощью данной модели был выполнен ряд вычислительных экспериментов с целью определения коэффициента сопротивления повороту ГМ μ , а также установления параметров, которые влияют на него в наибольшей

степени. Вместе с тем, масштабные расчеты, например, по получению статистических данных режимов нагружения трансмиссий в условиях, приближенных к реальной эксплуатации (то есть при движении по заданному маршруту), удобно выполнять, используя аналитические зависимости тягового расчета, которые необходимо уточнить для случая движения ГМ на высокой скорости. Уточнение можно производить, используя современные математические методы, например, применяя нейронные сети.

Основные зависимости, применяемые при проектировочном тяговом расчете поворота

В рамках классического проектировочного тягового расчета поворота потребные силы тяги на забегающей P_2 и отстающей P_1 гусеницах определяются следующим образом [1] (1):

$$\begin{aligned} P_2 &= R_2 + \frac{M_c}{B} + \frac{C_x}{2} + \frac{P_w}{2}; \\ P_1 &= R_1 - \frac{M_c}{B} + \frac{C_x}{2} + \frac{P_w}{2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где R_2, R_1 – силы сопротивления прямолинейному движению забегающего и отстающего бортов соответственно; M_c – момент сопротивления повороту гусеничной машины; C_x – проекция центробежной силы на продольную ось гусеничной машины; P_w – сила аэродинамического сопротивления.

Силы сопротивления прямолинейному движению R_1 и R_2 складываются из сил сопротивления качению опорных катков по гусенице, а также прессования, бульдозирования и экскавации грунта. При движении по опорному основанию типа «плотный грунт» (на котором предполагается движение ГМ с высокими скоростями), эффектов бульдозирования и экскавации не происходит, силы R_1 и R_2 с достаточной точностью определяются коэффициентом сопротивления прямолинейному движению $f_{гр}$ [3, 2] (2):

$$R_1 = f_{гр} \cdot R_{z1}; \quad R_2 = f_{гр} \cdot R_{z2}, \quad (2)$$

где R_{z1}, R_{z2} – нормальные реакции, приходящиеся на отстающий и забегающий борт соответственно.

В результате действия поперечной составляющей центробежной силы C_y , гусеница забегающего борта имеет большую вертикальную реакцию опорного основания, чем отстающего. В этом случае [1] (3):

$$\begin{aligned} R_{z2} &= \frac{mg}{2} + \frac{C_y \cdot H_z}{B}; \\ R_{z1} &= \frac{mg}{2} - \frac{C_y \cdot H_z}{B}, \end{aligned} \quad (3)$$

где H_z – высота центра масс ГМ; m – масса ГМ; g – ускорение свободного падения.

Характерной особенностью поворота ГМ является значительное увеличение потребной тяги забегающего борта по сравнению с прямолинейным движением (более чем в 3 раза [3]). Это вызвано появлением момента сопротивления повороту M_c , который представляет собой момент от сил сопротивления вращательному движению опорных ветвей гусениц ГМ, вызванных трением и нагребанием грунтового вала боковыми сторонами траков и катков. Для вычисления M_c вводится понятие коэффициента сопротивления повороту μ . Так, при равномерном распределении нагрузок вдоль опорных ветвей гусениц момент M_c , может быть вычислен по формуле (4):

$$M_c = \frac{\mu \cdot mg \cdot L}{4}. \quad (4)$$

Принято считать, что коэффициент сопротивления повороту μ в основном зависит от дорожно-грунтовые условий (ДГУ) и радиуса поворота машины. При проведении расчетов эту зависимость часто описывают с помощью формулы А.О. Никитина [1-5] (5):

$$\mu = \frac{\mu_{max}}{0,925 + 0,15 \frac{R_t}{B}} \quad (5)$$

где μ_{max} – максимальный коэффициент сопротивления повороту (значение μ при повороте вокруг остановленной гусеницы для конкретных ДГУ, справочная величина); R_t – теоретический радиус поворота; B – колея ГМ.

Теоретический радиус поворота R_t (входящий в формулу А.О. Никитина) меньше фактического R_f вследствие буксования забегающей гусеницы и юза отстающей. В рамках тягового расчета обычно используется следующая эмпирическая зависимость, связывающая теоретический и фактический радиусы поворота [10] (6):

$$R_t = R_f \frac{B}{L}, \quad (6)$$

где L – база ГМ.

Зависимость (4), позволяющая определить момент сопротивления повороту M_c , получена исходя из предположения, что полюс поворота находится по центру базы ГМ. Однако, вследствие действия боковых сил (главным образом проекция центробежной силы на поперечную ось машины C_y), центр поворота машины смещается вперед по направлению движения, в результате чего момент сопротивления повороту M_c уменьшается. При достижении ГМ заносной скорости V_3 момент сопротивления повороту станет равен нулю, что приведет к полной потере возможности управления ГМ. Заносная (критическая по заносу) скорость определяется по следующей зависимости [1] (7):

$$V_3 = \sqrt{\mu_{max} \cdot g \cdot R_f}, \quad (7)$$

Момент сопротивления повороту M_c , с учётом его уменьшения при приближении к критической по заносу скорости, определяется по следующей формуле [11] (8):

$$M_c = \frac{\mu \cdot mg \cdot L}{4} \left(1 - \left(\frac{V_x}{V_3} \right)^4 \right). \quad (8)$$

Окончательно, для случая установившегося движения ГМ в повороте, со скоростью меньшей критической по заносу с учетом поперечной C_y и продольной C_x проекций центробежной силы, зависимость (1) можно переписать в виде (9):

$$P_2 = \frac{mg}{2} \left(f_{гр} \left(1 + \frac{2V_x^2 \cdot H_z}{B \cdot R_f \cdot g} \right) + \frac{\mu \cdot L}{2B} \left(1 - \left(\frac{V_x}{V_3} \right)^4 \right) \right) + \frac{m \cdot V_x^4 \cdot L}{4 \cdot R_f^3 \cdot \mu \cdot g} + \frac{P_w}{2}; \quad (9)$$

$$P_1 = \frac{mg}{2} \left(f_{гр} \left(1 - \frac{2V_x^2 \cdot H_z}{B \cdot R_f \cdot g} \right) - \frac{\mu \cdot L}{2B} \left(1 - \left(\frac{V_x}{V_3} \right)^4 \right) \right) + \frac{m \cdot V_x^4 \cdot L}{4 \cdot R_f^3 \cdot \mu \cdot g} + \frac{P_w}{2}.$$

Скорости перемотки гусениц забегающего V_2 и отстающего V_1 бортов при движении с теоретическим радиусом поворота R_t определяются как (10):

$$V_2 = V_x \left(1 + \frac{B}{2R_t} \right); \quad V_1 = V_x \left(1 - \frac{B}{2R_t} \right). \quad (10)$$

Тогда потребная мощность на ведущих колесах забегающего N_2 и отстающего N_1 бортов описывается следующими выражениями (11):

$$\begin{cases} N_2 = P_2 \cdot V_2 / \eta_2; \\ N_1 = P_1 \cdot V_1 \cdot \eta_1, \text{ если } P_1 < 0 \\ N_1 = P_1 \cdot V_1 \frac{1}{\eta_1}, \text{ если } P_1 > 0; \end{cases} \quad (11)$$

где η_1, η_2 – КПД гусеничного обвода отстающего и забегающего бортов соответственно. В данной работе КПД определяется по следующей приближенной зависимости [2] (12):

$$\eta_{\text{гус}} = 0,919 - 0,00385 \cdot 3,6 \cdot \omega_{\text{БК}} r_{\text{БК}}. \quad (12)$$

Краткое описание математической модели стационарного поворота гусеничной машины

Для оценки точности представленных аналитических зависимостей использовалась математическая модель, которая характеризуется системой уравнений (13) (уравнения стационарного поворота ГМ на плоскости). Расчетная схема, соответствующая рассматриваемой математической модели представлена на рис. 1.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n R_{xi} - P_w + m\omega_z V_y = 0; \\ \sum_{i=1}^n R_{yi} - m\omega_z V_x = 0; \\ \sum_{i=1}^n M(R_{yi}) - \sum_{i=1}^n M(R_{xi}) - \sum_{i=1}^n M_{\text{пк}i} = 0, \end{array} \right. \quad (13)$$

где R_{xi}, R_{yi} – проекции касательной силы взаимодействия активного участка гусеницы с опорной поверхностью, расположенного под i -ым опорным катком, на продольную и поперечную оси машины (оси системы координат $x - y$); P_w – сила сопротивления воздушной среды; $M_{\text{пк}i}$ – момент сопротивления повороту активного участка гусеницы под i -ым опорным катком; V_x – проекция вектора скорости центра масс на продольную ось ГМ; V_y – проекция вектора скорости центра масс на поперечную ось ГМ; ω_z – угловая скорость поворота корпуса ГМ вокруг вертикальной оси; n – число опорных катков ГМ.

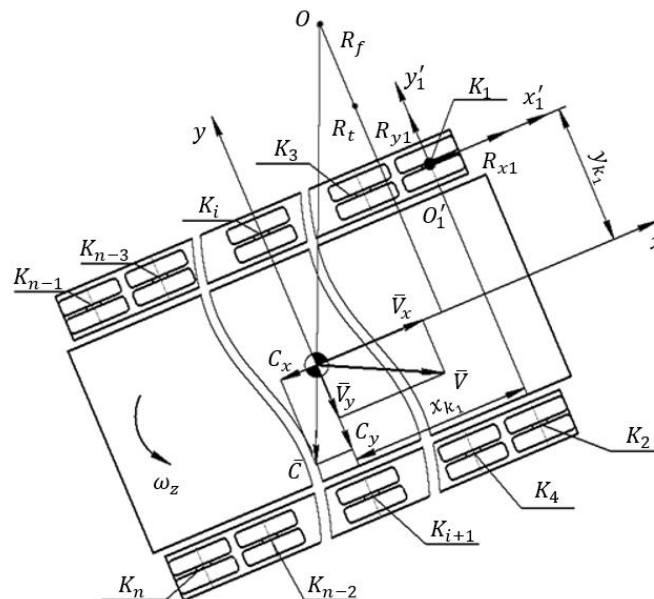


Рис. 1. Расчетная схема стационарного поворота ГМ

При создании имитационной модели были приняты следующие допущения.

1. Массы элементов ходовой части приведены к корпусу ГМ.

2. Движение ГМ происходит по ровной горизонтальной опорной поверхности типа «плотный грунт» (при взаимодействии с опорной поверхностью отсутствуют бульдозерный и экскавационный эффекты, а деформации по нормали пренебрежимо малы).

3. Определение нормальных реакций опорных катков при взаимодействии с опорной поверхностью происходит с допущением о совместности деформаций упругих элементов системы подрессоривания (характеристика упругого элемента считается линейной).

4. Вектор силы взаимодействия каждого активного участка гусеницы R_i , находящегося под опорным катком в плоскости опорного основания, расположен в геометрическом центре этого участка и направлен противоположно вектору скорости скольжения [11].

5. Проекции центров опорных катков на активные участки гусеницы совпадают с геометрическими центрами этих участков.

6. Силы сопротивления прямолинейному движению ГМ приведены к моментам сопротивления качению опорных катков по гусенице.

7. ГМ симметрична относительно продольной оси.

8. Взаимодействие ходовой части и опорного основания происходит только под активными участками гусеницы (согласно [13], эпюра распределения нормальных реакций по длине опорной ветви гусеницы обычно разрывна, основная часть нормальной нагрузки передаётся через участки гусеницы, расположенные под опорными катками). При этом возможно учесть отличающиеся коэффициенты сцепления траков в продольном и поперечном направлении (для этого введен коэффициент анизотропии λ_μ [11]).

Реализация разработанной модели адаптирована для выполнения многофакторных вычислительных экспериментов, система (13) решается численно (методом решения нелинейных систем уравнений Trust-Region-Dogleg), а в качестве задаваемых параметров принимает продольную проекцию скорости центра масс V_x и фактический радиуса поворота R_f . В этом смысле использование модели идентично проведению проектировочного тягового расчета поворота.

Исследование влияния параметров гусеничной машины и условий движения на коэффициент сопротивления повороту

С целью определения параметров, от которых в наибольшей степени зависит коэффициент сопротивления повороту, была проведена серия вычислительных экспериментов с использованием модели стационарного поворота ГМ. При этом использовались параметры ГМ, представленные в табл. 1 и характеристики опорной поверхности, представленные в табл. 2.

Таблица 1

Технические характеристики объекта исследования

| | |
|--|--------|
| Масса m , кг | 20000 |
| База L , м | 4,445 |
| Колея B , м | 2,5 |
| Высота центра масс H_z , м | 1,1 |
| Число опорных катков по борту, $n_{ок}$ | 7 |
| Радиус опорных катков $r_{ок}$, м | 0,31 |
| Радиус ведущего колеса $r_{вк}$, м | 0,31 |
| Коэффициент аэродинамического сопротивления c_x | 1 |
| Площадь лобового сечения машины $F_{лоб}$, м ² | 4,0315 |
| Высота центра парусности H_w , м | 1 |

Таблица 2

**Параметры, описывающие стационарный поворот ГМ
при проведении вычислительного эксперимента**

| | |
|---|------|
| Коэффициент S_0 | 0,1 |
| Максимальный коэффициент взаимодействия с ОП в продольном направлении $\mu_{sx_{max}}$ | 0,85 |
| Коэффициент анизотропии λ_μ | 1 |
| Коэффициент сопротивления движению $f_{гр}$ | 0,07 |

При проведении экспериментов теоретический радиус поворота R_t определялся с использованием математической модели. Величина максимального коэффициента сопротивления повороту μ_{max} является коэффициентом сопротивления повороту гусеничной машины с остановленной гусеницей отстающего борта. В связи с этим для перед каждой серией вычислительных экспериментов μ_{max} определялся дополнительно путём моделирования поворота ГМ вокруг остановленного борта.

Оценка коэффициента μ (или μ_{max} в случае поворота с $R_t = B/2$) производилось при помощи формулы (получена из зависимостей 9) (14):

$$\mu = \frac{2V_3^4 (BR_f(M_{к2} - M_{к1}) - 2mr_{вк}f_{гр}H_z V_x^2)}{mgLr_{вк}R_f(V_3^4 - V_x^4)}. \quad (14)$$

При этом величина $M_{к2} - M_{к1}$ находилась как (15):

$$M_{к2} - M_{к1} = f_{гр}r_{ок} \sum_{i=1}^{n/2} (R_{z\ 2i} - R_{z\ 2i-1}) + r_{вк} \sum_{i=1}^{n/2} (R_{x\ 2i} - R_{x\ 2i-1}). \quad (15)$$

Определяемый по формуле (14) коэффициент сопротивления повороту μ сравнивался с величиной, рассчитанной по формуле профессора А.О. Никитина при изменении фактического радиуса поворота R_f , конструктивных параметров ходовой части, характеристик опорного основания и скоростного режима движения ГМ.

Рассмотрим влияние на коэффициент сопротивления повороту μ фактического радиуса поворота R_f . Варьирование R_f производилось в пределах от 8,33 до 300 метров. Прочие параметры эксперимента приняты постоянными (табл.1 и2). При повороте машины с рассматриваемыми массогабаритными параметрами вокруг остановленного борта ($R_t = B/2$) в заданных ДГУ максимальный коэффициент сопротивления повороту составил $\mu_{max} = 0,71$. На рис.2 представлена зависимость коэффициента μ от фактического радиуса поворота, полученная с применением математической модели стационарного поворота ГМ и вычисленная с помощью формулы А.О. Никитина.

Анализ полученных данных говорит о том, что формула, предложенная профессором А.О. Никитиным, качественно верно описывает характер зависимости коэффициента сопротивления повороту μ от фактического радиуса поворота при $R_f < 20$ м. При больших значениях фактического радиуса отклонение между рассматриваемыми величинами увеличивается. Величина R_f в явном виде и не входит в формулу А.О. Никитина, ее влияние учитывается изменением теоретического радиуса R_t в каждом из расчетных случаев.

Рассмотрим влияние на коэффициент сопротивления повороту μ конструктивных параметров ходовой части. В качестве варьируемых параметров были приняты отношение базы машины к колее L/B и число опорных катков на борту машины. В настоящей работе зависимость $\mu(L/B)$ исследовалась при $1 \leq L/B \leq 2$. Число опорных катков по борту варьировалось от 5 до 7 шт. При исследовании зависимости коэффициента сопротивления повороту μ от указанных параметров прочие величины, описывающие движение машины во внешней среде, приняты постоянными (табл.1 и 2). Скорость движения V_x принята равной 5 км/ч. Изменение отношения L/B достигалось путем корректировки базы машины L .

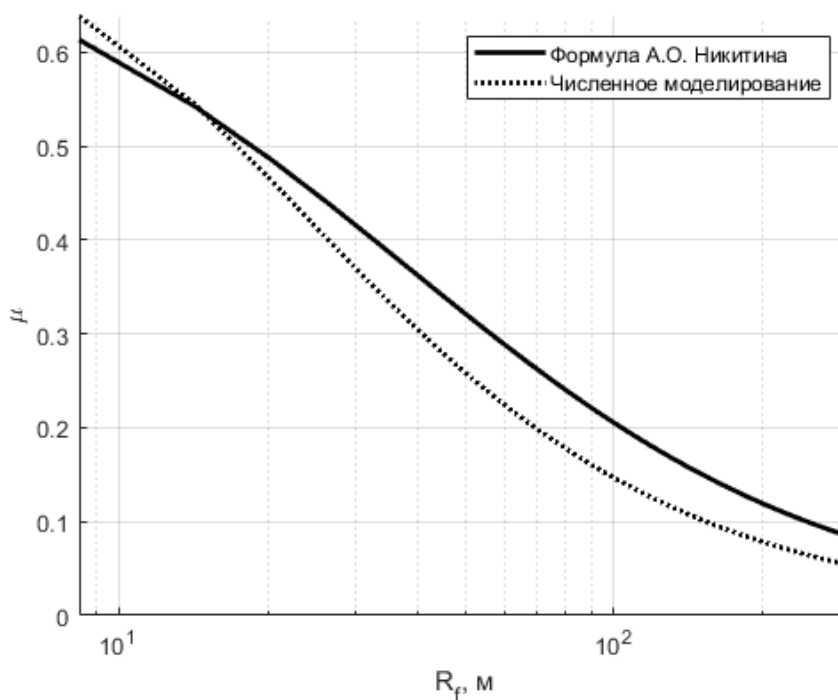


Рис. 2. Зависимость коэффициента μ от фактического радиуса поворота R_f

Максимальный коэффициент сопротивления повороту μ_{max} определялся дополнительно для всей совокупности исследуемых конструктивных параметров ходовой части путем имитации поворота машины вокруг остановленного борта. Полученная зависимость μ_{max} от отношения L/B при различных значениях $n_{ок}$ представлена на рис. 3.

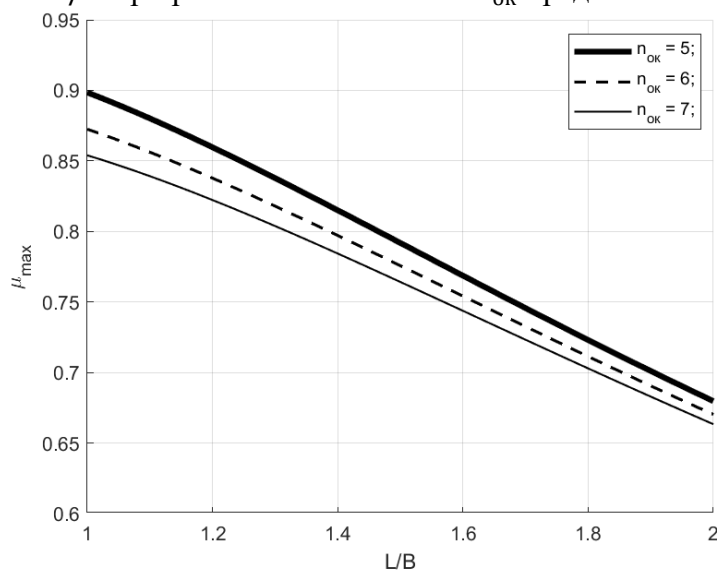


Рис. 3. Зависимость коэффициента μ_{max} от отношения L/B при различных значениях $n_{ок}$

Как видно из полученных данных, максимальный коэффициент сопротивления повороту μ_{max} обладает зависимостью как от L/B , так и от $n_{ок}$. При этом зависимость от L/B достаточно выражена. Для дальнейших экспериментов величина фактического радиуса поворота была принята $R_f = 34$ м. На рис.4 представлена зависимость коэффициента μ от отношения L/B при различных значениях $n_{ок}$, полученная с применением математической модели стационарного поворота ГМ и вычисленная с помощью формулы А.О. Никитина.

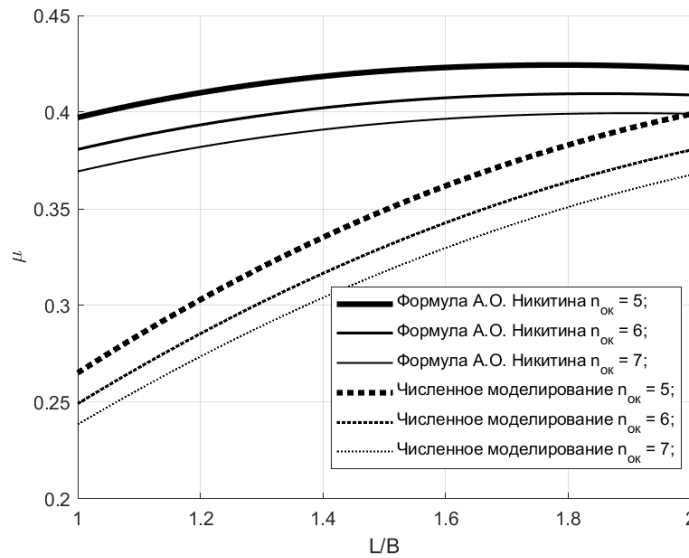


Рис. 4. Зависимость коэффициента сопротивления повороту μ от отношения L/B при различных значениях $n_{ок}$

Полученные данные говорят о том, что формула (5) недостаточно учитывает влияние L/B на сопротивление повороту. Величины L/B и $n_{ок}$ в явном виде не входят в формулу А.О. Никитина, тем не менее их влияние учитывается изменением теоретического радиуса R_t , вычисляемого для каждого расчётного случая с помощью модели.

Рассмотрим зависимость коэффициента сопротивления повороту μ от параметров, описывающих взаимодействие движителя с опорной поверхностью. В соответствии с математической моделью стационарного поворота, для описания взаимодействия с грунтом применяются: максимальный коэффициент взаимодействия движителя с опорной поверхностью в продольном направлении $\mu_{sx_{max}}$, коэффициент анизотропии λ_μ , коэффициент S_0 . Для учета сопротивления движению ГМ используется коэффициент $f_{гр}$. В табл.3 перечислены пределы изменения указанных параметров:

Таблица 3

Пределы изменения параметров, описывающих взаимодействие движителя с опорной поверхностью

| | |
|--|-------------|
| Максимальный коэффициент взаимодействия с ОП в продольном направлении $\mu_{sx_{max}}$ | 0,3...0,85 |
| Коэффициент анизотропии λ_μ | 0,6...1 |
| Коэффициент S_0 | 0,01...0,2 |
| Коэффициент сопротивления движению $f_{гр}$ | 0,035...0,3 |

При исследовании зависимости коэффициента сопротивления повороту μ от указанных параметров другие величины, описывающие движение машины во внешней среде, равно как и саму машину, приняты постоянными (табл.1 и 2). Для вычислительного эксперимента приняты $V_x = 5$ км/ч, $R_f = 34$ м, по аналогии с предыдущими вычислительными экспериментами.

Максимальный коэффициент сопротивления повороту μ_{max} определялся дополнительно для всей совокупности исследуемых параметров, описывающих взаимодействие движителя с опорной поверхностью, путем имитации поворота машины вокруг остановленного борта. Зависимости коэффициента μ от S_0 , $f_{гр}$, $\mu_{sx_{max}}$, λ_μ рассматриваемых характеристик опорной поверхности представлены на рис. 5.

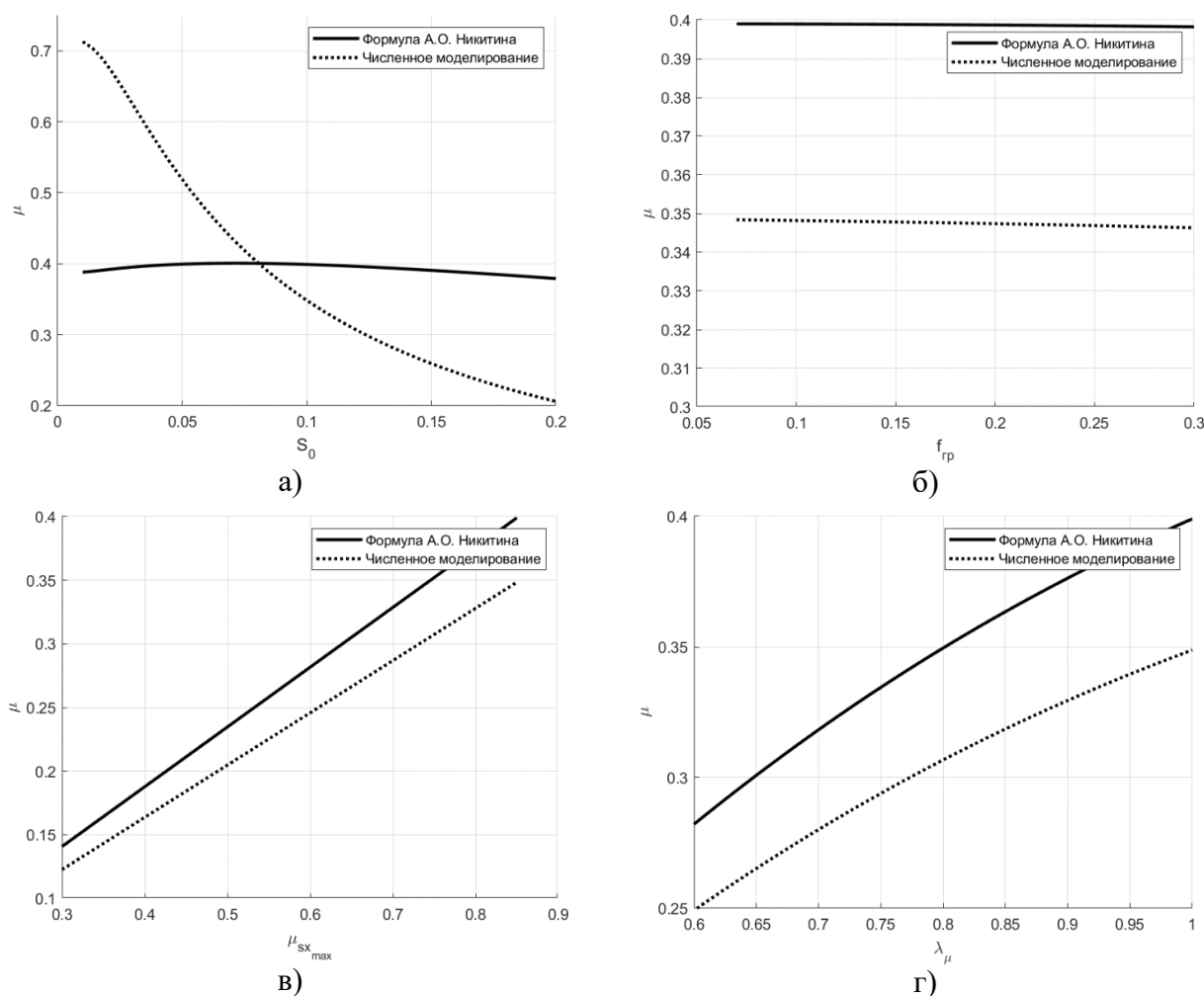


Рис. 5. а) зависимость μ от S_0 ; б) зависимость μ от $f_{гр}$;
в) зависимость μ от $\mu_{sx_{max}}$; г) зависимость μ от λ_μ

Из полученных данных следует, что формула Никитина, не позволяет описывать влияние коэффициента S_0 на коэффициент сопротивления повороту μ (хотя величина S_0 в явном виде не входит в формулу, ее влияние косвенно учитывается изменением теоретического радиуса R_t , получаемого из моделирования). При малых значениях S_0 (асфальтобетонное шоссе) характерно приближение μ к μ_{max} , что соответствует случаю «сухого» трения и не оценивается формулой (5). Противоположная ситуация наблюдается при больших значениях S_0 , характерных для мягкого грунта (грунтовая дорога в период распутицы, заболоченная местность) при движении по которому наблюдается значительное буксование.

Влияние коэффициентов $\mu_{sx_{max}}$ и λ_μ качественно верно описывается формулой А.О. Никитина. Несоответствие между количественными значениями полученных функций объясняется недостаточно точным описанием формулой зависимости $\mu(R_f)$ для рассматриваемого радиуса поворота. Зависимость коэффициента μ от $f_{гр}$ при принятых допущениях практически отсутствует.

Влияние скоростного режима движения на коэффициент сопротивления повороту μ , рассматривался при варьировании величины коэффициента поперечной устойчивости $\eta_{пу} = V/2H_z$ в диапазоне от 0,8 до 1,35 и отношения V_x/V_z в диапазоне от 0,1 до 0,9. Прочие величины, описывающие движение машины во внешней среде, приняты постоянными (табл.1 и 2). Фактический радиус поворота принят $R_f = 34$ м. По результатам предыдущих вычислительных экспериментов для рассматриваемых условий движения максимальный коэффициент сопротивления повороту составил $\mu_{max} = 0,71$.

На рис. 6 представлена полученная зависимость коэффициента μ от отношения V_x/V_3 при различных значениях $\eta_{пу}$.

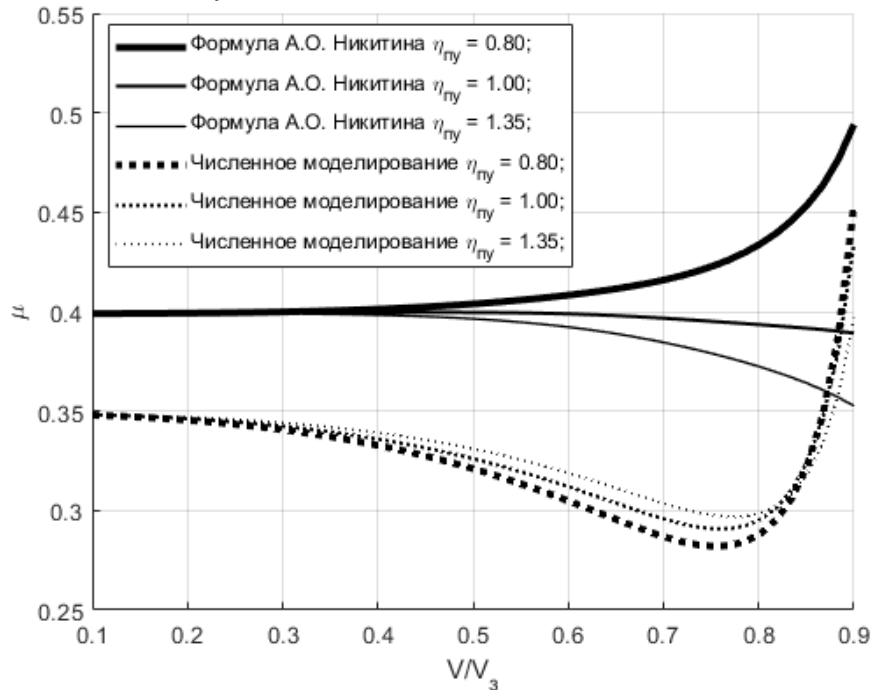


Рис. 6. Зависимость μ от отношения V/V_3 при различных $\eta_{пу}$

Из полученных данных следует, что формула, предложенная профессором А.О. Никитиным, корректно описывает характер зависимости коэффициента сопротивления повороту μ от отношения V/V_3 и величины $\eta_{пу}$ только при $V/V_3 < 0,5$ (несоответствие между количественными значениями полученных функций объясняется недостаточно точным описанием формулой зависимости $\mu(R_f)$ для рассматриваемого радиуса поворота). При дальнейшем приближении к критической по заносу скорости движения ГМ применение формулы (5) для оценки режимов нагружения машины становится необоснованным. Особенно сильное влияние скоростного режима движения на коэффициент μ наблюдается при $V/V_3 > 0,8$ (в данной области находится граница применимости как аналитического тягового расчета так и математической модели стационарного поворота).

В процессе экспериментов также выявлено что при варьировании параметров движения ГМ отношение между фактическим и теоретическим радиусом поворота не является постоянной величиной и отношение (6) не вполне справедливо. В связи с этим введена корректирующая величина k_R (16):

$$R_f = k_R \cdot \frac{L}{B} \cdot R_t \quad (16)$$

Таким образом, при использовании аналитических зависимостей для полноценного исследования быстроходности машины, оценке ее энергоэффективности и определении необходимой тяговооруженности, необходимо учитывать влияние рассмотренных факторов на коэффициент μ и k_R . Учитывая большое количество оказывающих влияние параметров целесообразно применить аппроксимацию нейронной сетью.

Нейронная сеть в общем случае – математическая модель, построенная по принципу организации связей между биологическими нейронами в нервной системе живых организмов. Она представляет собой последовательность математических преобразований, устанавливающую соответствие между входными и выходными данными.

Применение нейронной сети для повышения точности проекторочного тягового расчета

В работе [12] установлено, что нейронные сети, имеющие один скрытый слой с функцией активации типа сигма-функция являются наиболее подходящими для задач аппроксимации. При этом число нейронов в скрытом слое выбирается эмпирическим путем. В связи с этим была выбрана нейронная сеть с одним скрытым слоем из 200 нейронов.

Для обучения нейронной сети использовался массив данных, сформированный из значений коэффициента сопротивления повороту μ и k_R полученных с помощью разработанной математической модели стационарного поворота ГМ, а также различных параметров движения машины, которые в большей степени определяют значения рассматриваемых коэффициентов. На основании проведенного исследования в качестве входного вектора значений нейронной сети необходимо использовать:

- фактическая кривизна k_f поворота;
- отношение базы машины к коле L/B ;
- количество опорных катков $n_{ок}$;
- коэффициент S_0 ;
- максимальный коэффициент взаимодействия активных участков гусениц с опорной поверхностью в продольном направлении $\mu_{sx_{max}}$;
- коэффициент анизотропии трака λ_μ ;
- степень приближения скорости движения ГМ к критической по заносу V/V_3 ;
- коэффициент поперечной устойчивости $\eta_{пу}$.

Как видно, большинство параметров выбраны в качестве удельных величин с тем, чтобы обеспечить возможность применения обученной нейронной сети для машин с различными параметрами. Таким образом была сформирована нейронная сеть со следующей архитектурой (рис. 7).

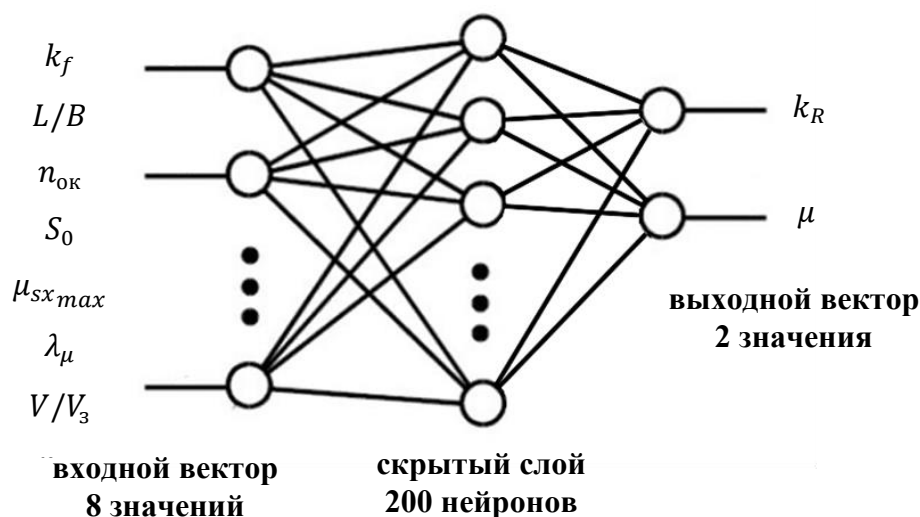


Рис. 7. Архитектура нейронной сети для аппроксимации μ и k_R

Для оценки эффективности применения нейронной сети, а также качества ее обучения было проведено сравнение результатов тягового расчета, полученных с применением классического подхода, классического подхода дополненного нейронной сетью, а также математического моделирования стационарного поворота ГМ (рис. 8). В силу того, что параметр μ_{max} не используется при описании взаимодействия активных участков гусениц с опорным основанием в рамках предложенной модели стационарного поворота, то для обеспечения

возможности сравнения при проведении расчетов величина μ_{max} была определена по результатам численного моделирования поворота ГМ вокруг остановленного борта (с $R_t = B/2$). В качестве расчетного радиуса поворота выбран $R_f = 34$ м. Массогабаритные параметры машины приняты в соответствии с табл.1. Имитация движения проводилась по опорной поверхности типа «дернистый грунт» ($\mu_{sxmax} = 0,85, S_0 = 0,1, f_{гр} = 0,07$), коэффициент анизотропии трака принят $\lambda_\mu = 1$, коэффициент μ_{max} получен равным $\mu_{max} = 0,71$.

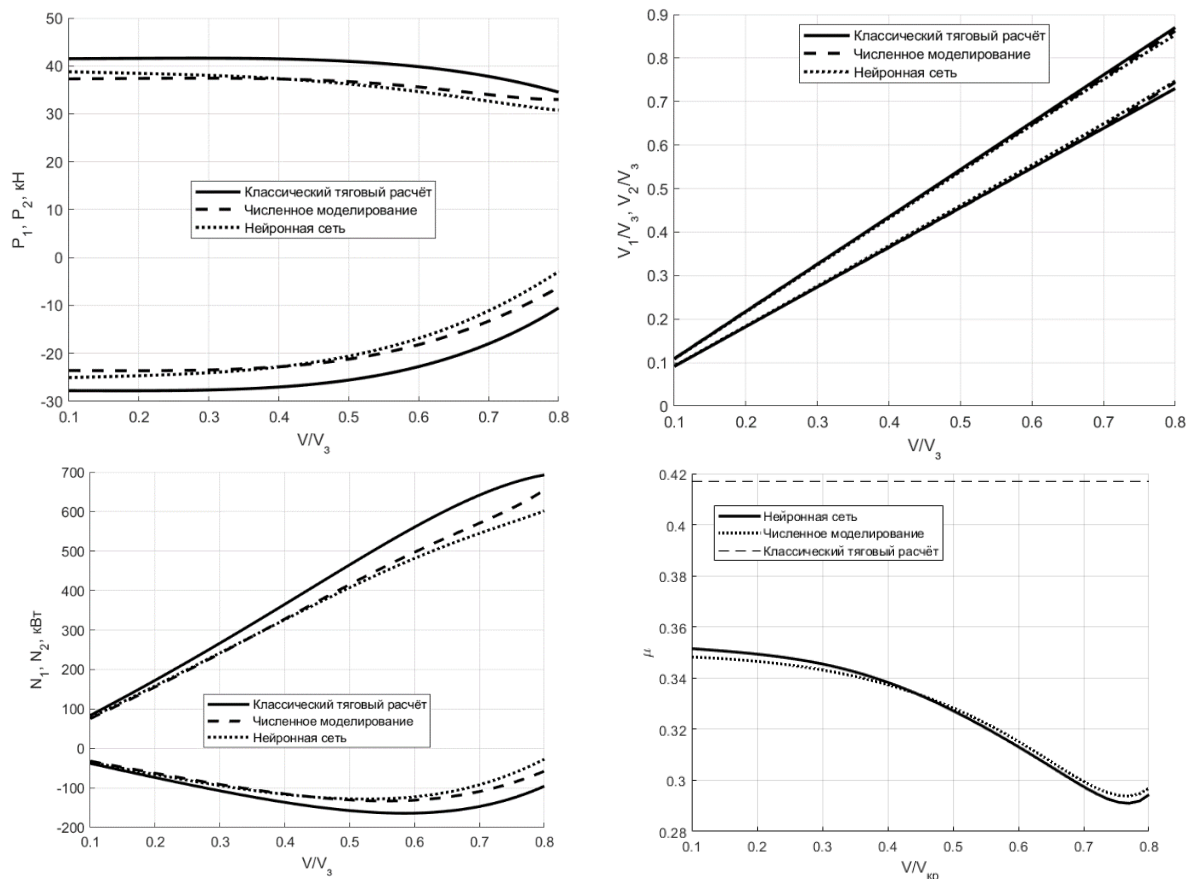


Рис. 8. Сравнение результатов расчета разными методами:

- а) потребные силы тяги; б) скорости гусениц, отнесенные к величине заносной скорости V_1/V_3 и V_2/V_3 ; в) потребные мощности на ведущих колесах; г) результаты расчета коэффициентов сопротивления повороту μ

Заключение

Установлено, что применение классических аналитических зависимостей тягового расчета поворота ГМ ограничивается низкой точностью определения коэффициента сопротивления повороту μ и коэффициента k_R , отражающего взаимосвязь фактического R_f и теоретического R_t радиусов поворота ($R_f = k_R \cdot \frac{L}{B} \cdot R_t$). Сложную зависимость этих коэффициентов от условий движения и геометрических параметров ГМ удалось аппроксимировать нейронной сетью, которую возможно использовать для уточненных расчетов. Обосновано применение выбранной архитектуры нейронной сети. Подтверждена эффективность применения указанного подхода в сравнении с математической моделью стационарного поворота ГМ и классическим подходом к тяговому расчету.

Представленная методика получения обучающего массива нейронной сети может быть использована для аппроксимации не только результатов математического моделирования, но и реальных экспериментальных данных. Обученная по результатам натурных экспе-

риментов нейронная сеть позволит не принимать во внимание допущения, принятые при составлении математической модели, и еще больше повысить точность аналитических тяговых расчетов, не усложняя при этом математическую модель движения машины и, соответственно, не увеличивая время исследования.

Библиографический список

1. **Чобиток, В.А.** Теория движения танков и БМП / В.А. Чобиток. – М.: Воениздат, 1984. – 264 с.
2. **Забавников, Н.А.** Основы теории транспортных гусеничных машин / Н.А. Забавников. – М.: Машиностроение. 1967. – 356 с.
3. **Антонов, А.С.** Гусеничные тягачи. Часть первая / А.С. Антонов. – М.: Воениздат МО СССР, 1960. – 356 с.
4. **Никитин, А.О.** Теория танка / А.О. Никитин. – М.: Типография Военной ордена Ленина академии бронетанковых войск, 1962. – 584 с.
5. **Xuefeng, Han** Energy management based on reinforcement learning with double deep Q-learning for a hybrid electric tracked vehicle / Han Xuefeng, He Hongwen, Wu Jingda, Peng Jiankun, Li Yuecheng // Applied Energy. Volume 254, 2019. – 113708.
6. **Al-Milli, Said** Track-terrain modelling and traversability prediction for tracked vehicles on soft terrain / Said Al-Milli, Lakmal D. Seneviratne, Kaspar Althoefer // Journal of Terramechanics. 2010, Volume 47, Issue 3. Pages 151-160. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2010.02.001>.
7. **Котиев, Г.О.** Математическая модель криволинейного движения автомобиля с колесной формулой 8x8 при различных способах управления поворотом / Г.О. Котиев, Н.В. Чернышев, В.А. Горелов // Журнал автомобильных инженеров. – 2009. – №2. – С. 34-39.
8. **Котиев, Г.О.** Математическая модель движения вездеходного транспортного средства / Г.О. Котиев, В.А. Горелов, А.А. Бекетов // Журнал автомобильных инженеров. – 2008. – №1. – С. 50-54.
9. **Котиев, Г.О.** Математическое моделирование рабочих процессов колесных и гусеничных машин с электромеханическими трансмиссиями / Г.О. Котиев, В.А. Горелов, А.В. Мирошниченко // Сборник статей научно-практической конференции: Разработка и исследование электрических трансмиссий для образцов вооружения и военной техники. – 2016. – С. 76-86.
10. **Фаробин, Я.Е.** Теория поворота транспортных машин / Я.Е. Фаробин. – М.: Машиностроение, 1970. – 176 с.
11. **Бекетов, С.А.** Теория управляемого движения гусеничных машин / С.А.Бекетов. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2017. – 125 с.
12. **Heaton, Jeff** Introduction to Neural Networks for Java / Jeff Heaton, 2nd Edition (2nd. ed.). Heaton Research, Inc, 2008.
13. **Красеньков, В.И.** Динамика криволинейного движения транспортной гусеничной машины / В.И. Красеньков, С.А. Харитонов // Вопросы расчета и конструирования гусеничных машин: Труды МВТУ, №339. – 1980. – С. 3-67.

*Дата поступления
в редакцию: 22.09.2020*

A.A. Stadukhin

APPLICABILITY RESEARCH OF CLASSICAL EXPRESSIONS FOR A TRACKED MACHINE TURNING CALCULATIONS AND THE METHOD OF ITS REFINING WITH NEURAL NETWORK

Bauman Moscow State Technical University

Purpose: The existing approaches to the turning calculation of tracked vehicles are based on the empirical formulas of the 50s of the XX century. In this regard, their using for modern highly mobile tracked vehicles is not entirely justified. To the greatest extent, the use of classical analytical dependences is limited by the significant nonlinearity of the coefficients, especially with the speed of the tracked vehicle approaches the critical drift.

Design/methodology/approach: In the course of the work, it was found that the use of classical analytical dependences of turning calculations of tracked vehicles is limited by the low accuracy of determining the resistance to turning and the ratio of the actual and theoretical turning radii.

Findings: A search was carried out for the parameters of the tracked vehicle and the driving conditions that most affect the parameters under study. The complex dependence of the steering resistance coefficient and the ratio of the actual and theoretical turning radii on the turning parameters of the tracked vehicle was approximated by a neural network, which can be used for refined calculations. The application of the chosen architecture of the neural network is substantiated.

Research limitations/implications: The paper presents a comparative analysis of the results obtained by the classical method and the results obtained using a more complex model of the tracked vehicle stationary turning.

Originality/value: For the selected mode of the tracked vehicle movement, the required traction forces, track rewinding speeds and the required power were determined. Thus, the effectiveness of the neural network approximation is confirmed in comparison with the mathematical model of the stationary rotation of the GM and the classical approach to the thrust calculation.

Key words: tracked vehicle, turn, modeling, traction calculation, neural network

НАШИ АВТОРЫ

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Костин Павел Васильевич – доцент Приволжского института повышения квалификации ФНС России, канд. юр. наук;
expert36@list.ru

Куликов Александр Борисович – ведущий инженер Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук;
akulikov@nntu.ru

Куликов Владимир Борисович – аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;
vb.kulikov@yandex.ru

Лабутин Николай Григорьевич – заведующий кафедрой информационной безопасности Приволжского института повышения квалификации ФНС России, доцент, канд. техн. наук;
ko_kol1@rambler.ru

Леушкин Антон Дмитриевич – студент Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского;
leyshkinanton@gmail.com

Неймарк Елена Александровна – доцент Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, канд. техн. наук;
e.neumark@mail.ru

Тарасова Наталья Владимировна – старший научный сотрудник Российского федерального ядерного центра – Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики;
tara271978@mail.ru

Хранилов Валерий Павлович – профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук,
hranilov@nntu.ru

Шадрунова Наталья Юрьевна – ст. преподаватель Приволжского института повышения квалификации ФНС России;
shadny2015@mail.ru

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

Баринов Александр Александрович – инженер-конструктор 1 категории Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова;
lxbarinov92@mail.ru

Виленский Олег Юрьевич – начальник отдела обоснования прочности и ресурса оборудования АЭС Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова, канд. техн. наук;
sigma@okbm.nnov.ru

Душев Сергей Анатольевич – главный конструктор оборудования обращения с топливом Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова, канд. техн. наук;
dushev@okbm.nnov.ru

Ершова Мария Игоревна – студент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;
m.aria.1@mail.ru

Захаров Дмитрий Александрович – ведущий инженер Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова;
shishulin@okbm.nnov.ru

Коновалов Илья Адильевич – магистрант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;
iliakonowaloff@yandex.ru

Лапшин Денис Александрович – начальник бюро отдела прочности Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова, канд. техн. наук;
lapshane@bk.ru

Легчанов Максим Александрович – заместитель директора Института ядерной энергетики и технической физики Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук;
legchanov@nntu.ru

Новинский Эрнест Георгиевич – главный специалист Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова, д-р техн. наук;
novinskiy@okbm.nnov.ru

Пахомов Владимир Александрович – инженер-конструктор отдела прочности Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова, канд. техн. наук;
varanov@okbm.nnov.ru;

Пичков Сергей Николаевич – начальник отдела системных разработок по надежности и безопасности ядерных установок Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова;
shishulin@okbm.nnov.ru

Соколов Андрей Николаевич – начальник бюро подразделения № 49 Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова;
asokmail@mail.ru

Татарский Алексей Максимович – инженер-конструктор отдела прочности Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова;
aleksey.tatarskiy@yandex.ru

Хробостов Александр Евгеньевич – директор Института Ядерной энергетики и технической физики Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук;
khrobostov@nntu.ru

Хлыбов Александр Анатольевич – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук;
hlybov_52@mail.ru

Чесноков Александр Андреевич – магистрант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;
1997chesnokov@gmail.com

Шилов Андрей Владимирович – инженер-конструктор 1 категории Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова);
nickel2020@rambler.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

Басманов Иван Вадимович – аспирант Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана;
basmanov.str@gmail.com

Береснев Павел Олегович – инженер Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;
pavel.beresnev@nntu.ru

Вольская Наталья Станиславовна – профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, д-р техн. наук;
volskaja52@mail.ru

Гладышев Алексей Александрович – инженер Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;
wotpricol@mail.ru

Захаров Александр Юрьевич – доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук;
zakharov-al@mail.ru

Косицын Борис Борисович – доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук;
kositsyn_b@bmstu.ru

Колин Александр Андреевич – техник Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;
kolinaa@nntu.ru

Пинчин Алексей Викторович – инженер Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;
pinchinav96@gmail.com

Порубов Дмитрий Михайлович – ведущий инженер Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;
dmitry.porubov@nntu.ru

Рогов Петр Сергеевич – заместитель директора Регионального научно-образовательного центра транспортного машиностроения Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, доцент, канд. техн. наук;
petr.rogov@nntu.ru

Силантьев Сергей Эдуардович – инженер Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;
silantsevse@nntu.ru

Сергиевский Сергей Андреевич – руководитель научно-исследовательской лаборатории Интеллектуальных транспортных систем Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук;
s.sergievskiy@nntu.ru

Стадухин Антон Алексеевич – доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук; **ant.m9@yandex.ru**

Тюгин Дмитрий Юрьевич – ведущий научный сотрудник Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. физ.-мат. наук;
dmitry.tyugin@nntu.ru

Филатов Валерий Игоревич – инженер Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;
valera.filatov@nntu.ru

Чичекин Илья Викторович – доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук; **hiv2@mail.ru**

Чутков Константин Александрович – докторант Военного института (Инженерных войск) военного учебно-научного центра Сухопутных войск «Общевойсковая ордена Жукова Академия Вооруженных сил Российской Федерации», канд. техн. наук;
kchutkov@yandex.ru

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО НАПИСАНИЮ РЕФЕРАТОВ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

Авторский реферат на английском языке должен быть понятен без ссылки на саму статью. Это краткое точное изложение содержания представленной к публикации статьи, отражающее предмет, цели и задачи работы, актуальность, постановку проблемы, вариант ее решения, сферу применения. Объем: не менее 10 строк (100-250 слов ~ 850 знаков). Реферат статьи может также включать краткое описание концептуальных основ и методологии работы, перспектив дальнейших исследований.

Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны воспроизводиться повторно в тексте реферата. Следует применять терминологию, характерную для иностранных специальных текстов, избегать терминов, являющихся «калькой» русскоязычных слов. Рекомендуется использование слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» (consequently, moreover, for example, the benefits of this study, as a result). Необходимо использовать активный, а не пассивный залог, т.е. «The study tested», но не «It was tested in the study».

Образец: авторское резюме из International Journal of Operations & Production Management. V. 22. N 8.

B. Meijboom, M. Houtepens

STRUCTURING INTERNATIONAL SERVICE OPERATIONS: A THEORETICAL FRAMEWORK AND A CASE STUDY IN THE IT-SECTOR

The title of organization

Purpose: The specific challenges with which companies pursuing international manufacturing strategies are faced, if their output also contains a service dimension, are addressed.

Design/methodology/approach: A theoretical framework is proposed based on three virtually complementary perspectives by integrating international production, demand, and contemporary ICT-based theory. Subsequently, an exploratory case study in a pure service environment is described that illustrates the value of the framework.

Findings: It is possible, for example, to apply the theoretical framework to case studies in internationally-operating companies delivering a mix of goods and services.

Research limitations/implications: The present study provides a starting-point for further research in the international manufacturing sector.

Originality/value: Moreover, the framework has proven to be useful in improving the European structure of the case company. This is a notable and promising side-effect of the exploratory study, at least from a managerial point of view.

Key words: multinationals, service operations, location, decision making, case studies.

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

Адрес редакции: 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, ауд. 1363-3

Телефон: 8(920)00-37-877

E-mail: rsl@nntu.ru

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ, НАПРАВЛЯЕМЫХ В РЕДАКЦИЮ

- В редакцию направляются **два печатных экземпляра** статьи и комплекты сопроводительной документации: бумажный и электронный.
- Рекомендуемый объем статьи не превышает 15 страниц текста и 4–6 рисунков. Все страницы должны быть пронумерованы. Минимальное количество страниц – 7; **минимальный объем статьи – 0,5 п.л.**
- **Статью необходимо сопроводить** актом и протоколом экспортного контроля, экспертным заключением о возможности открытого опубликования, выпиской из заседания кафедры, рекомендующей статью к опубликованию.
- **Печатные экземпляры** статей должны быть подписаны всеми авторами.
- **Первая страница** статьи должна содержать следующую информацию: УДК (код по универсальному десятичному классификатору); инициалы и фамилии авторов (в порядке, отражающем их авторский вклад); название статьи; место работы всех авторов (полное название организации, город); аннотацию (не менее 150 слов), ключевые слова (не менее 10).
- Изложение материала должно быть логически выстроенным. **Тематическая направленность** представленного исследования должна **строго соответствовать рубрике журнала**. Рекомендуется следующая структура статьи: вводная часть с обоснованием необходимости и изложением цели работы, теоретический анализ, методика, экспериментальная часть, результаты и выводы (не более 0,5 страницы), **библиографический список, содержащий только цитируемые или рассматриваемые в тексте работы**. Ссылки нумеруются в порядке цитирования. Рекомендуется **ограничить самоцитирование** тремя пунктами.
- Статья должна завершаться **информацией на английском языке**: инициалы и фамилии авторов, тема, названия организаций, в которых работают авторы, реферат и ключевые слова.
- К статье необходимо **приложить файл с информацией об авторах** на русском языке: ФИО (полностью), место работы, должность, ученая степень и звание, e-mail.
- Текст набирается через один интервал 12 кеглем. Сноски и примечания 10 кеглем. Поля: левое, правое и нижнее – 20 мм, верхнее – 25 мм. Переносы не допускаются. Используется формат **Word for Windows** и стандартные шрифты **Times New Roman** и **Symbol**.
- Формульные выражения выполняют строго в редакторе MS Equation 3-12 кегль. Размерность физических величин должна соответствовать системе СИ.
- Сокращение слов, кроме общепринятых, не допускается. Использованию аббревиатур должна предшествовать их расшифровка.
- Таблицы (11 кегль жирный) должны иметь названия, их следует располагать по тексту статьи, ссылки на таблицы: (табл. 1).
- Диаграммы выполняются в формате Excel.
- Графический материал (**только в черно-белом изображении**) должен быть четким и не требовать перерисовки. Изображения выполняются в формате **jpg** или **tif** с разрешением 300 **dpi**. Рисунки выполняются по ГОСТ, подрисовочная подпись 11 жирный кегль, ссылки на рисунки: (рис. 1).

Образец оформления статьи:
<https://www.nntu.ru/content/nauka/zhurnal-trudy-ngtu-im-r-e-alekseeva>

**РУКОПИСИ И СОПРОВОДИТЕЛЬНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ
ПРИНИМАЮТСЯ ПО СЛЕДУЮЩИМ АДРЕСАМ:**

05.05.03 Колесные и гусеничные машины

Владимир Сергеевич Макаров: vladimir.makarov@nntu.ru

**05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации
05.13.17 Теоретические основы информатики**

Валерий Павлович Хранилов: hranilov@nntu.ru

05.14.02 Электрические станции и электроэнергетические системы

Евгений Викторович Бычков: fae_nir@nntu.ru

**05.14.03 Ядерные энергетические установки, включая проектирование,
эксплуатацию и выход из эксплуатации**

Максим Александрович Легчанов: legchanov@nntu.ru

16+

**ТРУДЫ НГТУ
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА**

№ 4 (131)

Ответственный редактор: **В.И. Казакова**
Технические редакторы: **М.В. Прохорова, А.В. Крылова**

Редакция:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.
rsl@nntu.ru
Свободная цена

Подписано в печать: 14.12.2020. Дата выхода в свет 28.12.2020. Формат 60x84 ¹/₈.
Бумага офсетная. Печать трафаретная.
Усл. печ. л. 9,00. Тираж 300 экз. Заказ .

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева.
Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

Индекс 44757
Объединенный каталог «Пресса России»

Свидетельство о регистрации
периодического печатного издания
ПИ № ФС 77-56417 от 11 декабря 2013