

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОЛОГОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**ВЕСТНИК  
ВОЛОГОДСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО  
УНИВЕРСИТЕТА**

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Основан в 2018 г.

**№ 3 (25) / 2024**

СЕРИЯ: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ВОЛОГДА  
2024

№ 3 (25) / 2024 / ОКТЯБРЬ. Выходит 4 раза в год.

Рецензируемый научный журнал «Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки» предназначен для ознакомления российской и зарубежной научной общественности, аспирантов и студентов с новыми научными результатами, имеющими значение в области фундаментальной и прикладной науки. С 2018 года включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). Полнотекстовые версии выпусков научного журнала размещены в свободном доступе на сайте Научной электронной библиотеки ([www.eLibrary.ru](http://www.eLibrary.ru)).

**Реестровая запись** от 5 апреля 2019 г. серии ПИ № ФС77-75456. Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

**Серия:** Технические науки.

**Специальности:** 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения, 2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение, 2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей, 2.1.9. Строительная механика, 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, 2.3.4. Управление в организационных системах, 2.3.7. Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования, 2.5.6. Технология машиностроения, 2.5.11. Наземные транспортно-технологические средства и комплексы.

**Главный редактор** – *А.А. Кочкин*, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры промышленного и гражданского строительства Вологодского государственного университета.

**Заместители главного редактора:** *А.Е. Немировский*, доктор технических наук, профессор Вологодского государственного университета, *А.Н. Швецов*, доктор технических наук, профессор Вологодского государственного университета.

**Секретарь** – *В.А. Раков*, кандидат технических наук, доцент Вологодского государственного университета.

**Члены редколлегии:**

П.Ю. Бочкарев, д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ,  
В.Г. Гагарин, д-р техн. наук, чл.-корр. РААСН,  
проф. НИИСФ РААСН,  
В.А. Горбунов, д-р физ.-мат. наук, проф. ВоГУ,  
В.П. Гусев, д-р техн. наук, зав. лаб. НИИСФ РААСН,  
Р.Ю. Добрецов, д-р техн. наук, проф. ИММиТ СПбПУ,  
Е.В. Ершов, д-р техн. наук, проф. ЧГУ,  
А.Ф. Зубков, д-р техн. наук, проф. ТГТУ,  
А.Л. Кузьминов, д-р техн. наук, проф. ЧГУ,  
А.Г. Кочев, д-р техн. наук, чл.-корр. РААСН,  
проф. ННГАСУ,  
Л.Н. Кондратьева, д-р техн. наук, проф. СПбГАСУ,  
В.И. Леденев, д-р техн. наук, проф. ТГТУ,  
С.В. Лукин, д-р техн. наук, проф. ЧГУ,

О.В. Мкртычев, д-р техн. наук, проф. НИУ МГСУ,  
С.Н. Овсянников, д-р техн. наук, проф. ТГАСУ,  
В.П. Подольский, заслуженный деятель науки РФ,  
д-р техн. наук, проф. ВГТУ,  
В.А. Пшеничкина, д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ,  
В.И. Римшин, д-р техн. наук, чл.-корр. РААСН, проф.  
НИИСФ РААСН,  
Н.Н. Трушин, д-р техн. наук, проф. ТулГУ,  
В.Д. Чертовской, д-р техн. наук, проф. ГУМРФ  
имени адмирала С.О. Макарова,  
С.Л. Шишигин, д-р техн. наук, проф. ВоГУ,  
В.А. Шорин, д-р хим. наук, проф. ВоГУ,  
И.Л. Шубин, д-р техн. наук, чл.-корр. РААСН,  
директор НИИСФ РААСН

**Переводчик** – *Т.В. Михайлюк*, кандидат педагогических наук, доцент Вологодского государственного университета.

**Редакторы:** *А.П. Митракова, Н.Н. Постникова*.

**Оригинал-макет** подготовила *Н.В. Подхомутова*.

**Адрес редакции:** 160000, Российская Федерация, Вологодская область, г. Вологда, ул. Галкинская, д. 3, каб. 326. Тел.: 8 (8172) 72-47-70, e-mail: [vestniktech@vogu35.ru](mailto:vestniktech@vogu35.ru). Сайт: [vestnik.vogu35.ru](http://vestnik.vogu35.ru).

**Учредитель и изатель:** ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», 160000, Российская Федерация, Вологодская область, город Вологда, улица Ленина, дом 15.

**Отпечатано:** ООО «Издательство „Сад-огород“», г. Вологда, ул. Текстильщиков, 20а; тел.: 8(8172) 73-12-22; e-mail: [vologdapost@yandex.ru](mailto:vologdapost@yandex.ru).

---

Подписано в печать 14.10.2024 г. Выпуск в свет 31.10.2024 г. Формат А4 (60 x 84/8).

Уч.-изд. л. 10,00. Усл. печ. л. 7,5. Тираж 30 экз. Заказ № 851. Цена свободная.

**ISSN 2658-3399**

© ФГБОУ ВО «Вологодский  
государственный университет», 2024

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE RUSSIAN FEDERATION

FEDERAL STATE BUDGETARY EDUCATIONAL INSTITUTION OF HIGHER EDUCATION  
VOLOGDA STATE UNIVERSITY

# **BULLETIN OF VOLOGDA STATE UNIVERSITY**

**SCIENTIFIC JOURNAL**

First published in 2018

**No. 3 (25) / 2024**

SERIES: TECHNICAL SCIENCES

VOLOGDA  
2024

No. 3 (25) / 2024 / OCTOBER. It is issued 4 times a year.

Peer-reviewed scholarly journal "Bulletin of the Vologda State University. Series: Technical Sciences" is intended to familiarize the Russian and foreign scientific community, post-graduate students and undergraduate students with new scientific results that are important in the field of fundamental and applied science. Since 2018, it has been included into the Russian Science Citation Index (RSCI). Full-text versions of the issues of the scholarly journal are freely available on the website of the Scientific Electronic Library ([www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru)).

**Register entry dated** April 5, 2019, series PI No. ФС77-75456. It's registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media (Roskomnadzor).

**Series:** Technical sciences.

**Specialties:** 2.1.1. Building constructions, buildings and structures, 2.1.3. Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply and lighting, 2.1.8. Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and traffic tunnels, 2.1.9. Structural mechanics, 2.3.1. System analysis, management and information processing, 2.3.3. Automation and management of technological processes and industries, 2.3.4. Management in organizational systems, 2.3.7. Computer modeling and design automation, 2.5.6. Engineering technology, 2.5.11. Land transport and technological means and complexes.

**Chief editor** A.A. Kochkin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Industrial and Civil Engineering, Vologda State University.

**Deputy Chief Editors:** A.E. Nemirovsky, Doctor of Technical Sciences, Professor of Vologda State University, A.N. Shvetsov, Doctor of Technical Sciences, Professor of Vologda State University.

**Secretary** V.A. Rakov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Vologda State University.

**Members of the Editorial Board:**

P.Yu. Bochkaryov, Doctor of Technical Sciences, Prof. of VolgSTU,

E.V. Ershov, Doctor of Technical Sciences, Prof. of CHSU

V.G. Gagarin, Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of RAACS, Prof. of Research Institute of Building Physics of RAACS,

V.A. Gorbunov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Prof. of VSU,

V.P. Gusev, Doctor of Technical Sciences, Head of the laboratory of Research Institute of Building Physics of RAACS,

R.Yu. Dobretsov, Doctor of Technical Sciences, Prof. of Institute of Machinery Materials and Transport of SPbPU,

A.F. Zubkov, Doctor of Technical Sciences, Prof. of TSTU,

A.L. Kuzminov, Doctor of Technical Sciences, Prof. of CHSU,

A.G. Kochev, Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of RAACS, Prof. of NNGASU,

L.N. Kondratiev, Doctor of Technical Sciences, Prof. of SPbGASU,

V.I. Ledenyov, Doctor of Technical Sciences, Prof. of TSTU,

S.V. Lukin, Doctor of Technical Sciences, Prof. of CHSU,

O.V. Mkrtchyan, Doctor of Technical Sciences, Prof. of NRU MGSU,

S.N. Ovsyannikov, Doctor of Technical Sciences, Prof. of TSUAB,

V.P. Podolsky, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Prof. of VSTU,

V.A. Pshenichkina, Doctor of Technical Sciences, Prof. of VolgSTU,

V.I. Rimshin, Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of RAACS, Prof. of Research Institute of Building Physics RAACS,

N.N. Trushin, Doctor of Technical Sciences, Prof. of TulSU,

V.D. Chertovskoy, Doctor of Technical Sciences, Prof. of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,

S.L. Shishigin, Doctor of Technical Sciences, Prof. of VSU,

V.A. Shorin, Doctor of Chemical Sciences, Prof. of VSU,

I.L. Shubin, Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of RAACS, Director of Research Institute of Building Physics of RAACS

**Translator** T.V. Mikhailyuk, Candidate of Pedagogy, Associate Professor of Vologda State University.

**Editors** A.P. Mitrokhova, N.N. Postnikova.

**Original layout** N.V. Podhomutova.

**Address of the Editorial Office:** 160000, Russian Federation, Vologda region, Vologda, Galkinskaya st., 3, office 326. Tel.: 8 (8172) 72-47-70, e-mail: [vestniktech@vogu35.ru](mailto:vestniktech@vogu35.ru). Website: [vestnik.vogu35.ru](http://vestnik.vogu35.ru).

**Founder and publisher:** Vologda State University, 160000, Russian Federation, Vologda region, Vologda, Lenina st., 15.

**Printed by:** LLC «Publishing House "Sad-Ogorod"», Vologda, Tekstilshchikov st., 20a; tel.: 8(8172) 73-12-22; e-mail: [vologdapost@yandex.ru](mailto:vologdapost@yandex.ru).

Passed for printing 14.10.2024. Date of Publication 31.10.2024. Format A4 (60 x 84/8).

Conventional printed sheets 10,00. Published pages 7,5. Number of copies 30. Order 851. Open price.

## СОДЕРЖАНИЕ

### СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

#### *Строительные конструкции, здания и сооружения*

|   |    |
|---|----|
| <b>Котов А.А.</b> ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ РАМЕ И ОТНОСИТЕЛЬНАЯ<br>ИНТЕГРАЛЬНАЯ ЖЕСТКОСТЬ ЕЕ ЭЛЕМЕНТОВ .....   | 7  |
| <b>Лукина А.В., Репин А.В.</b> АНАЛИЗ ФАСАДНЫХ СИСТЕМ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ КАПИТАЛЬНОГО<br>РЕМОНТА ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ .....  | 13 |
| <i>Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха</i>  |    |
| <b>Каперейко Ю.В.</b> СТОИМОСТНОЙ АНАЛИЗ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ ВОДЯНОГО<br>ОТОПЛЕНИЯ С МЕТЕОПРОГНОТИЧЕСКИМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ .....                                    | 16 |
| <i>Проектирование и строительство автомобильных дорог</i>   |    |
| <b>Габибов Н.Н., Батаков А.С.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ<br>СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ШЛАКА ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ЩЕБЕНОЧНО-МАСТИЧНОЙ<br>АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ ..... | 19 |
| <b>Степанов А.В.</b> ОСОБЕННОСТИ МЕЖСЕЗОННОГО ПОВЕДЕНИЯ ГРУНТОВ АРКТИЧЕСКИХ<br>ТЕРРИТОРИЙ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО РЕГИОНА .....  | 23 |
| <b>Шорин В.А., Вельсовский А.Ю.</b> ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВЫБОРА<br>ГЕРМЕТИЗИРУЮЩИХ МАСТИК ДЛЯ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ .....                                      | 26 |

#### *Строительная механика*

|  |    |
|--|----|
| <b>Копейкин О.Е., Шевцов Л.С.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ОТКАЗА СТАЛЬНОЙ БАЛКИ<br>ПРИ ИЗГИБЕ ПО КРИТЕРИЮ ПРОЧНОСТИ НОРМАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ .....                                      | 30 |
| <b>Соловьева А.А., Смирнов В.А.</b> МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ БАЗИСНОЙ ПЕРЕМЕННОЙ<br>ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРИМЕРЕ СНЕГОВОЙ НАГРУЗКИ ПРИ ВЕРОЯТНОСТНОМ АНАЛИЗЕ<br>НАДЕЖНОСТИ СООРУЖЕНИЙ ..... | 34 |

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

#### *Системный анализ, управление и обработка информации*

|  |    |
|--|----|
| <b>Горшков Г.А., Замиев В.М., Яицун Т.В.</b> ИМИТАЦИЯ ГОЛОСА СРЕДСТВАМИ ТЕХНОЛОГИИ<br>ГОЛОСОВОЙ КОНВЕРСИИ RVC v2 ..... | 38 |
| <b>Краснов А.А., Кочкин Д.В.</b> РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ТЕСТОВ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ<br>ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ .....                    | 43 |

#### *Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования*

|  |    |
|--|----|
| <b>Вольников М.И.</b> МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЙ ЗАЩИТЫ ГЕТЕРОСТРУКТУР МЕХАТРОНИКИ .....  | 49 |
| <b>Рахимов А.А.</b> ПРОГРАММНОЕ И СИСТЕМНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО<br>МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКЕ ОБУЧАЮЩИХСЯ<br>В ТЕХНИЧЕСКОМ ВУЗЕ ..... | 52 |

### МАШИНОСТРОЕНИЕ

#### *Технология машиностроения*

|   |    |
|---|----|
| <b>Воробьев Д.А., Булавин В.Ф., Булавина Т.Г.</b> ЦИФРОВОЕ КОНСТРУКТОРСКОЕ<br>СОПРОВОЖДЕНИЕ ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА .....                     | 59 |
| <i>Наземные транспортно-технологические средства и комплексы</i>  |    |
| <b>Воропай Л.М., Курилова Н.В., Назарова М.А., Белков О.Л.</b> ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО<br>СОСТАВА ОТРАБОТАННЫХ МОТОРНЫХ МАСЕЛ НА СПОСОБ ИХ УТИЛИЗАЦИИ ..... | 64 |
| <b>Корнеев А.П., Ню Итонг</b> ВОПРОСЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ<br>ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ .....   | 67 |
| <b>Смирнов П.И.</b> ПОДХОДЫ К ПОВЫШЕНИЮ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ<br>И ДОЛГОВЕЧНОСТИ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДВЕСКИ АВТОМОБИЛЕЙ .....                           | 71 |
| <b>Сведения об авторах</b> .....  | 76 |

## CONTENTS

### **CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE**

#### *Building constructions, buildings and structures*

|  |    |
|--|----|
| <b>Kotov A. A.</b> CRACK FORMATION IN A REINFORCED CONCRETE FRAME AND RELATIVE INTEGRAL STIFFNESS OF ITS ELEMENTS..... | 7  |
| <b>Lukina A.V., Repin A.V.</b> ANALYSIS OF FACADE SYSTEMS DURING PUBLIC BUILDINGS CAPITAL REPAIRS.....                 | 13 |

#### *Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха*

|  |    |
|--|----|
| <b>Kapereyko Y.V.</b> EQUIPMENT COST ANALYSIS FOR WATER HEATING SYSTEM WITH WEATHER PREDICTIVE CONTROL ..... | 16 |
|--|----|

#### *Road design and construction*

|   |    |
|---|----|
| <b>Gabibov N.N., Batakov A.C.</b> STUDYING POSSIBILITY OF STEEL MAKING SLAG USE FOR PREPARATION OF CRUSHED STONE MASTIC ASPHALT CONCRETE MIXTURE..... | 19 |
| <b>Stepanov A.V.</b> FEATURES OF SOILS INTER-SEASONAL BEHAVIOR IN THE ARCTIC TERRITORIES OF THE NORTHWESTERN REGION .....                             | 23 |
| <b>Shorin V.A., Velsovsky A.Y.</b> TECHNICAL AND ECONOMIC ASPECTS OF BRIDGE STRUCTURES SEALING MASTICS CHOICE.....                                    | 26 |

#### *Строительная механика*

|  |    |
|--|----|
| <b>Kopeykin O.E., Shevtsov L.S.</b> STUDY OF FAILURE PROBABILITY FOR FLEXURAL STEEL BEAM ACCORDING TO THE NORMAL SECTIONS STRENGTH CRITERION.....                                  | 30 |
| <b>Solovyova A.A., Smirnov V.A.</b> METHODOLOGY OF BASIC IMPACT VARIABLE FORMATION ON THE EXAMPLE OF SNOW LOAD WHEN CONDUCTING STRUCTURES RELIABILITY PROBABILISTIC ANALYSIS ..... | 34 |

## INFORMATION TECHNOLOGY

#### *System analysis, management and information processing*

|  |    |
|--|----|
| <b>Gorshkov G.A., Zamshev V.M., Yashchun T.V.</b> VOICE IMITATION USING RVC V2 VOICE CONVERSION TECHNOLOGY ..... | 38 |
| <b>Krasnov A.A., Kochkin D.V.</b> DEVELOPMENT OF TEST SYSTEM FOR WEB APPLICATION TESTING .....                   | 43 |

#### *Computer modeling and design automation*

|  |    |
|--|----|
| <b>Volnikov M.I.</b> MODELS OF PROTECTION TECHNOLOGIES FOR MECHATRONICS HETERO-STRUCTURES .....  | 49 |
| <b>Rakhimov A.A.</b> SOFTWARE AND SYSTEM REPRESENTATION OF COMPUTER MODELING FOR MATHEMATICAL TRAINING OF STUDENTS AT A TECHNICAL UNIVERSITY ..... | 51 |

## MECHANICAL ENGINEERING

#### *Engineering technology*

|   |    |
|---|----|
| <b>Vorobiov D.A., Bulavin V.F., Bulavina T.G.</b> DIGITAL DESIGN SUPPORT FOR INSTRUMENT MANUFACTURING ..... | 59 |
|---|----|

#### *Land transport and technological means and complexes*

|  |    |
|--|----|
| <b>Voropai L.M., Kurilova N.V., Nazarova M.A., Belkov O.L.</b> INFLUENCE OF WASTE MOTOR OILS CHEMICAL COMPOSITION ON THEIR DISPOSAL METHOD ..... | 64 |
| <b>Korneev A.P., Yitong Niu</b> SAFETY AND ENVIRONMENTAL ASPECTS OF USING ELECTRIC VEHICLES .....  | 67 |
| <b>Smirnov P.I.</b> APPROACHES TO INCREASING FATIGUE STRENGTH AND DURABILITY OF CARS ELASTIC SUSPENSION ELEMENTS .....                           | 71 |

|  |    |
|--|----|
| <i>Information about the authors</i> ..... | 79 |
|--|----|

# СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

## *Строительные конструкции, здания и сооружения*

УДК 624.072.33.012.45



*A.A. Котов*

*Мурманский арктический университет*

### **ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ РАМЕ И ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ИНТЕГРАЛЬНАЯ ЖЕСТКОСТЬ ЕЕ ЭЛЕМЕНТОВ**

В сооружениях с монолитным железобетонным каркасом трещинообразование в элементах и ползучесть бетона существенно уменьшают их первоначальную изгибную жесткость и влияют на распределение усилий между ними. Для получения правильного распределения усилий в конечноэлементных расчетных моделях сооружений следует назначать реальную изгибную жесткость элементов этих моделей, а для этого предварительно должен быть решен вопрос об относительных интегральных жесткостях характерных элементов каркаса, определяемых процессами трещинообразования и ползучести в бетоне. В представленной работе расчетным путем решен вопрос об относительных интегральных жесткостях изгибающихся и сжато-изогнутых элементов рамы.

Железобетон, трещинообразование, ползучесть, расчетная модель, статическая неопределенность, интегральная жесткость.

В статически неопределеных пространственных расчетных моделях сооружений распределение усилий между элементами существенно зависит от соотношения их жесткостей. Поэтому норматив [4] в таких расчетных моделях сооружений из монолитного железобетона для получения правильного распределения усилий предписывает уменьшать номинальную жесткость вертикальных сжато-изогнутых элементов коэффициентом 0,6, а горизонтальных изгибающихся – коэффициентом 0,2 при работе с трещинами и коэффициентом 0,3 при работе без трещин.

Эти указания доступны критике как минимум с двух позиций. Во-первых, до первоначального расчета монолитного железобетонного каркаса в каком-либо конечно-элементном комплексе заранее неизвестно, работает ли данный горизонтальный изгибающийся элемент с трещинами или без трещин, поэтому неясно, какой коэффициент назначать: 0,2 или 0,3. С другой стороны, если в каркасе используются элементы без предварительного напряжения, то их работа без поперечных трещин в растянутой зоне бетона означает не что иное, как то, что эти элементы недогружены: в эффективном эксплуатационном состоянии с коэффициентами использования, близкими к единице, трещины в таких элементах обязательно должны быть. В соответствии с этими соображениями однозначно надо назначать 0,2, а не 0,3.

Во-вторых, вполне вероятно, что вся расчетная модель состоит из сжато-изогнутых вертикальных и изгибающихся горизонтальных элементов, и иных элементов просто нет. Тогда с учетом того, что распределение усилий зависит не от абсолютных значений жесткостей, а только от их соотношений, не обяза-

тельно понижать номинальную жесткость всех элементов, одних до 0,6, других до 0,2. Достаточно учесть, что жесткость горизонтальных изгибающихся уменьшится по сравнению с жесткостью вертикальных сжато-изогнутых до  $0,2/0,6 = 0,33$ . Это означает, что в подобных каркасах, если буквально следовать предписаниям [4], для получения правильного распределения усилий достаточно до одной трети понизить номинальную жесткость горизонтальных изгибающихся элементов, а жесткость вертикальных сжато-изогнутых оставить номинальной.

Наконец, сами величины понижающих коэффициентов 0,6 и 0,2, основанные на текущем опыте расчетов, испытаний и эксплуатации подобных конструкций, вряд ли можно считать безупречно точными. С накоплением информации в этих направлениях, в том числе и в отношении нелинейных физических свойств бетона, понижающих первоначальную жесткость железобетонных элементов, эти коэффициенты могут уточняться. Поэтому исследования в данном направлении, к которым относится предлагаемая статья, вполне можно считать актуальными.

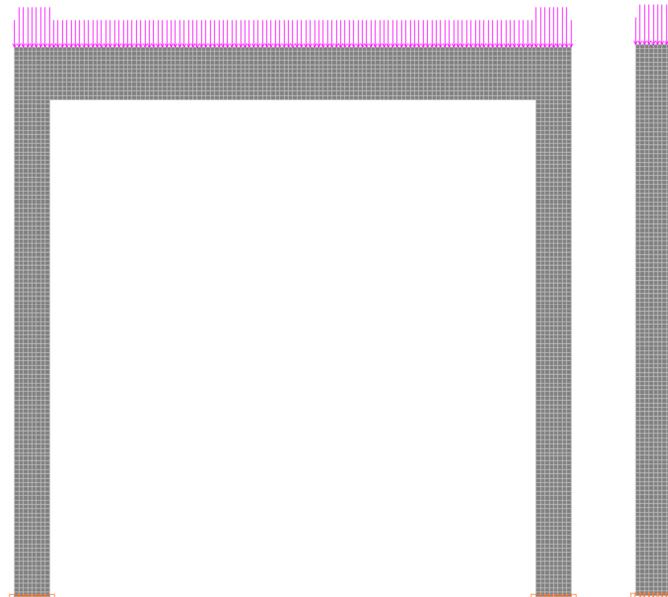
В качестве объекта исследования выбрана П-образная рама с жесткими узлами, поскольку в ее составе имеются одновременно и изгибающийся горизонтальный элемент (ригель), и сжато-изогнутые элементы (стойки). Колонны имеют сечение 400×400 мм, ригель – 400×600 мм. Стойки и ригель формируются из объемных конечных элементов (8-узловой параллелепипед) размерами 50×50×50 мм из бетона класса В25, работающего в условиях средней влажности. Нормативное сопротивление сжатию  $R_c = 18,5$  МПа, растяжению –  $R_p = 1,55$  МПа.

Вертикальные опорные связи установлены на всех нижних узлах колонн, а горизонтальные связи – только по средним рядам узлов опорных торцов колонн. Нагружение осуществляется по ригелю в виде сосредоточенных сил, прикладываемых к узлам его верхней поверхности, в том числе и над колоннами: нагрузка над колоннами предполагает воздействие вышестоящих колонн при работе рамы в многоэтажном сооружении. Общий вид рамы вместе с опорными связями и схемой модельного загружения показан на рисунке 1.

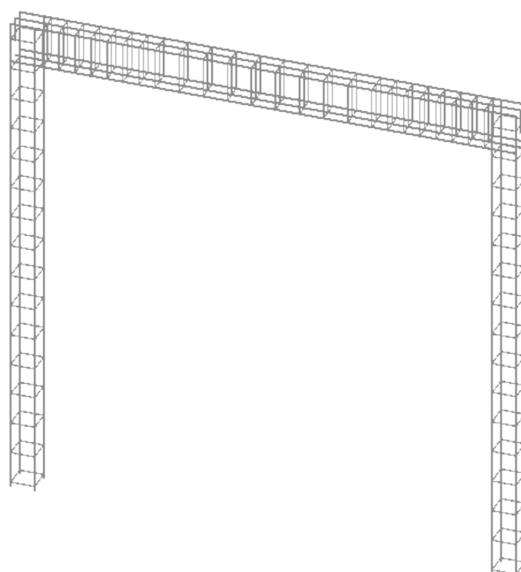
Стойки и ригель армируются продольной арматурой A500 Ø16: стойки – по углам, ригель – по три стержня на нижней и верхней гранях. Арматура протягивается по узлам объемных бетонных конечных

элементов, габаритное расстояние от поверхностей – 50 мм. Поперечная арматура – хомуты А240 Ø6 с шагом 400 мм на колоннах, 300 мм – в средней части ригеля и 200 мм – в опорных зонах ригеля. Армирование рамы показано на рисунке 2.

Для расчета величины ступени нагрузки в единицу времени необходимо приблизительно установить предельную величину нагрузки. Исходим из несущей способности ригеля рассматриваемой здесь рамы по сравнению с несущей способностью рассмотренной в [1] балки и, учитывая жесткость узлов соединения ригеля с колоннами, увеличиваем предполагаемое предельное значение узловой нагрузки в 1,5 раза, т.е. с 0,2 кН до 0,3 кН.



*Рис. 1. Расчетная схема рамы с опорными связями и модельным загружением, анфас и в профиль*



*Рис. 2. Схема армирования рамы*

Процесс нагружения распределяем на 20 сут.: 10 интервалов по 2 сут. Нагрузку добавляем равномерными ступенями на каждом шаге:  $0,3 \text{ кН} / 10 = 0,03 \text{ кН}$ . Далее предполагалось выдержать конструкцию под постоянной нагрузкой до момента времени 220 сут. с фиксацией в промежуточные моменты через каждые 20 сут.

Модуль деформаций бетона в соответствии с работой [3] рассматривался как функция времени  $t$  и уровня напряжений  $\eta$ :

$$D_B^w(\eta, t) = \frac{E_b}{1 + \varphi_{b,cr}} \left( 1 + a\varphi_{b,cr}s_t \cos(b\pi\eta) \right). \quad (1)$$

В ней для бетона класса В25, работающего в условиях средней влажности:  $E_b = 30 \cdot 10^3 \text{ МПа}$ ;  $\varphi_{b,cr} = 2,5$ ;  $a = 1,8$ ;  $b = 0,45$ . При этих значениях параметров формула (1) принимает вид

$$D_B^w(\eta, t) = 8,57 \cdot 10^3 \left[ 1 + 4,5 s_t \cos(1,413\eta) \right], \text{ МПа.} \quad (2)$$

Здесь в соответствии с [3]

$$s_t = \left( e^{-2 \cdot 10^{-4}t} + e^{-2 \cdot 10^{-5}t} + e^{-2 \cdot 10^{-6}t} + e^{-2 \cdot 10^{-7}t} + e^{-2 \cdot 10^{-8}t} + e^{-2 \cdot 10^{-9}t} \right) / 6. \quad (3)$$

Ниже представлена таблица параметров балки в назначенные к рассмотрению моменты ее состояния (табл. 1) в процессе нагружения в течение 20 суток.

Модули деформаций в последнем столбце таблицы 1 зависят от уровня напряжений  $\eta$ , который может быть разным в разных точках бетонного массива конструкции. Уровень напряжения в каждом бетонном объемном конечном элементе стоек оценивается по величине нормального напряжения в поперечном сечении ригеля или стойки путем сопоставления его с нормативным сопротивлением сжатию 18,5 МПа или растяжению 1,56 МПа. Нормативное сопротивление разделяется на 10 диапазонов. Распределение уровней напряжения по их диапазонам при сжатии и растяжении представлено в таблице 2. В соответствии с этим в каждой из итераций анализируется распределение напряжений и при необходимости в соответствующих местах уменьшается модуль деформаций.

Таблица 1

**Значения параметров режима нагружения в разные моменты времени**

| Номер шага | Время в сутках | Узловая нагрузка, кН | $s_t$ | $D(\eta)$ , МПа                              |
|------------|----------------|----------------------|-------|--|
| 0          | 0              | 0                    | 1,000 | $8,57 \cdot 10^3 [1 + 4,50 \cos(1,413\eta)]$ |
| 1          | 2              | 0,03                 | 0,617 | $8,57 \cdot 10^3 [1 + 2,78 \cos(1,413\eta)]$ |
| 2          | 4              | 0,06                 | 0,571 | $8,57 \cdot 10^3 [1 + 2,57 \cos(1,413\eta)]$ |
| 3          | 6              | 0,09                 | 0,557 | $8,57 \cdot 10^3 [1 + 2,51 \cos(1,413\eta)]$ |
| 4          | 8              | 0,12                 | 0,518 | $8,57 \cdot 10^3 [1 + 2,53 \cos(1,413\eta)]$ |
| 5          | 10             | 0,15                 | 0,506 | $8,57 \cdot 10^3 [1 + 2,28 \cos(1,413\eta)]$ |
| 6          | 12             | 0,18                 | 0,486 | $8,57 \cdot 10^3 [1 + 2,19 \cos(1,413\eta)]$ |
| 7          | 14             | 0,21                 | 0,475 | $8,57 \cdot 10^3 [1 + 2,14 \cos(1,413\eta)]$ |
| 8          | 16             | 0,24                 | 0,465 | $8,57 \cdot 10^3 [1 + 2,09 \cos(1,413\eta)]$ |
| 9          | 18             | 0,27                 | 0,457 | $8,57 \cdot 10^3 [1 + 2,06 \cos(1,413\eta)]$ |
| 10         | 20             | 0,30                 | 0,450 | $8,57 \cdot 10^3 [1 + 2,03 \cos(1,413\eta)]$ |

Таблица 2

**Диапазоны напряжений и соответствующие им уровни напряжений**

| Диапазоны сжимающих напряжений, МПа | Уровни напряжений $\eta$ | Диапазоны растягивающих напряжений, МПа |
|-------------------------------------|--------------------------|---|
| 0–1,85                              | 0,1                      | 0–0,156                                 |
| 1,86–3,70                           | 0,2                      | 0,157–0,312                             |
| 3,71–5,55                           | 0,3                      | 0,313–0,468                             |
| 5,56–7,40                           | 0,4                      | 0,469–0,624                             |
| 7,41–9,25                           | 0,5                      | 0,625–0,780                             |
| 9,26–11,10                          | 0,6                      | 0,781–0,936                             |
| 11,11–12,95                         | 0,7                      | 0,937–1,092                             |
| 12,96–14,80                         | 0,8                      | 1,093–1,248                             |
| 14,81–16,65                         | 0,9                      | 1,249–1,404                             |
| 16,66–18,50                         | 1,0                      | 1,405–1,560                             |

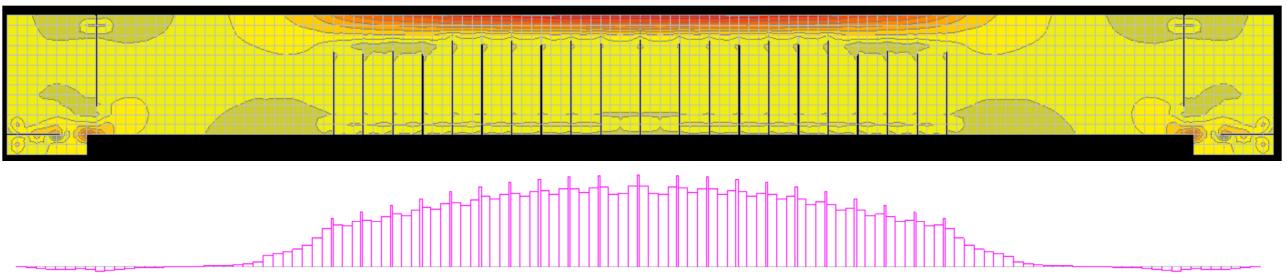


Рис. 3. Итерация 55. Предельное состояние рамы.  
Нормальные напряжения и трещины в бетоне и усилия в арматуре ригеля

На втором шаге по времени, т.е. в момент 4 сут. при узловой нагрузке 0,06 кН, на 4-й расчетной итерации, наибольшие растягивающие напряжения в бетоне в среднем сечении ригеля достигли своего нормативного сопротивления 1,560 МПа. Здесь начинаем формировать первую трещину, продвигая ее вверх до появления над ее вершиной сжимающих напряжений. Стабилизация состояния рамы после завершения динамического процесса образования первой трещины была достигнута на 7-й итерации. При этом напряжения в сжатой зоне остались на 1-м уровне, а в растянутой достигли 10-го уровня.

Следующие две трещины начали образовываться в растянутой зоне ригеля на 15-й итерации, после очередного додружения до 0,12 кН узловой нагрузки в момент времени 8 сут. При этом максимальный уровень сжимающих напряжений составил 0,3, а в растянутой зоне модуль деформаций бетона пришлось уменьшить на три ступени ниже 10-го уровня. Одновременно в верхних растянутых зонах стоек начала образовываться горизонтальная трещина. Стабилизация рамы после завершения образования вторых трещин в ригеле и первой трещины в стойках наступила после 22-й итерации. В промежутке между 15-й и 22-й итерациями максимальный уровень сжимающих напряжений составил 0,4, а в растянутой – 1,5, т.е. модуль деформаций в растянутой зоне был понижен на 5 ступеней после модуля деформаций, соответствующего уровню 1,0.

Далее процессы образования очередных трещин в нижней и верхней растянутых зонах ригеля и в верхней и нижней растянутых зонах стоек инициировались при узловых нагрузках 0, 15 кН (10 сут., итерация 23); 0,18 кН (12 сут., итерация 31); 0,21 кН (14 сут., итерация 39); 0,24 кН (16 сут., итерация 43); 0,27 кН (18 сут., итерация 47); 0,30 кН (20 сут., итерация 50). Завершились эти процессы стабильными состояниями рамы, наступавшими соответственно на 30-й итерации (10 сут., 0,15 кН); 38-й итерации (12 сут., 0,18 кН); 42-й итерации (14 сут., 0,21 кН); 46-й итерации (16 сут., 0,24 кН); 49-й итерации (18 сут., 0,27 кН); 55-й итерации (20 сут., 0,30 кН). На рисунке 3 показаны трещины и напряжения в бетоне и усилия в арматуре в ригеле в предельном состоянии рамы. В ригеле видны 11 пар трещин в нижней растянутой зоне в центральной его части и по одной трещине в верхних растянутых зонах на его концах. Наибольшее сжимающее напряжение в бетоне ригеля достигло величины 9,84 МПа, что существенно меньше нормативного сопротивления сжатию  $R_c = 18,5$  МПа.

Наибольшее усилие в растянутой арматуре ригеля составило 101,8 кН, что при площади сечения арматурного стержня 2,011 см<sup>2</sup> дает величину напряжения примерно 506 МПа, т.е. несколько выше нормативного сопротивления 500 МПа.

На рисунке 4 показаны трещины и напряжения в бетоне и усилия в арматуре в стойке в предельном состоянии рамы (верхняя и нижняя части стойки для компактности изображения показаны по отдельности).

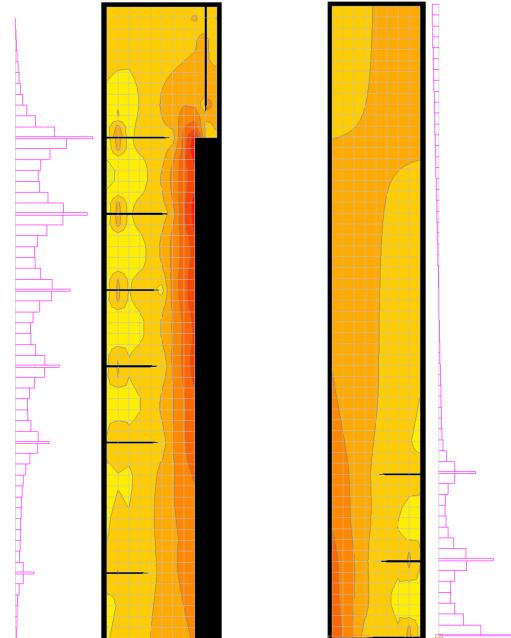


Рис. 4. Итерация 55. Предельное состояние рамы.  
Нормальные напряжения и трещины  
в бетоне и усилия в арматуре в стойке.  
Верхняя (слева) и нижняя части

В растянутых зонах стоек также образовались трещины: шесть в верхней наружной и три в нижней внутренней. Наибольшее сжимающее напряжение в бетоне стоек достигло величины 15,53 МПа, что заметно меньше нормативного сопротивления сжатию  $R_c = 18,5$  МПа. Наибольшее усилие в растянутой арматуре ригеля составило 105,1 кН, что при площади сечения арматурного стержня 2,011 см<sup>2</sup> дает величину напряжения 522 МПа, т.е. заметно больше нормативного сопротивления 500 МПа. Таким образом, растянутая арматура ригеля и стоек исчерпала свою несущую способность, и рама при нагружении в течение 20 суток до узловой нагрузки 0,30 Т достигла своего предельного состояния. Намеченная ранее в программе числового моделирования рамы длительная выдержка под узловой нагрузкой 0,030 Т оказалась невозможной.

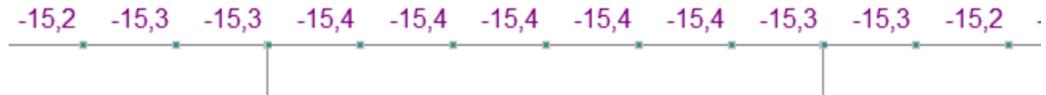


Рис. 5. Максимальный прогиб в ригеле реальной рамы с трещинами и с учетом ползучести

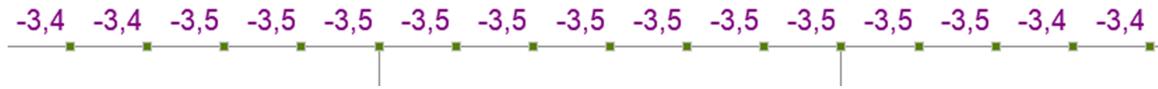


Рис. 6. Максимальный прогиб в ригеле виртуальной упругой рамы без трещин

Сравнивая предельное состояние рамы, полученное с учетом трещинообразования в бетоне и ползучести бетона, с состоянием под этой же нагрузкой виртуальной рамы без трещин в бетоне и при его работе с начальным модулем упругости, можно получить относительную интегральную жесткость ее элементов так, как это было предложено в работе [2]. Максимальный прогиб в ригеле в предельном состоянии с учетом трещинообразования и ползучести бетона согласно рисунку 5 составил 15,4 мм.

Максимальный прогиб в ригеле виртуальной упругой рамы без трещин согласно рисунку 6 составил 3,5 мм.

Из сравнения прогибов в ригелях реальной рамы с трещинами и виртуальной рамы без трещин получается относительная интегральная жесткость ригеля с трещинами с учетом нелинейных свойств бетона:

$$\beta_p = \frac{3,5}{15,4} = 2,3.$$

Это полученное здесь значение относительной интегральной жесткости достаточно хорошо согласуется с рекомендациями норматива [4] о понижении жесткости изгибаемых элементов с трещинами коэффициентом 0,2. Кроме того, ранее в работе [1] аналогичным способом была получена относительная интегральная жесткость статически определимой железобетонной балки в размере также  $\beta = 0,23$ . Совпадение значений этих двух относительных интегральных жесткостей с точностью до второго знака говорит о том, что снижение интегральной жесткости изгибающего железобетонного элемента если и зависит от граничных условий на его краях, то несущественно.

Для оценки относительной жесткости сжато-изогнутого элемента, каковым является стойка, сравним наибольшие в стойке горизонтальные перемещения: в реальной раме с трещинами в предельном состоянии и в виртуальной раме без трещин с начальным модулем деформаций бетона при той же нагрузке. В реальной раме наибольшее горизонтальное перемещение в стойке составило 6,4 мм, в виртуальной – 1,5 мм. Из сравнения этих перемещений относительная интегральная жесткость стоек с трещи-

нами с учетом нелинейных свойств бетона получается в размере

$$\beta_c = \frac{1,5}{6,4} = 2,3.$$

Таким образом, относительные интегральные жесткости изогнутого ригеля и сжато-изогнутой стойки с точностью до второго знака получились в нашем расчете одинаковыми, несмотря на то, что в стойках трещинообразование существенно менее значительное, чем в ригеле. Во-первых, этот результат заметно отличается от рекомендаций норматива [4] о том, что жесткость сжато-изогнутых элементов надо понижать коэффициентом 0,6. Во-вторых, выявленная в данном расчете одинаковость относительных интегральных жесткостей ригеля и стойки позволяет выдвинуть предположение, что можно говорить об относительных интегральных жесткостях не отдельных элементов, а всей рамы в целом. Продолжение этой логики приводит к следующему выводу: поскольку одинаковое понижение жесткости всех элементов каркасного сооружения, которое можно было бы делать на основании полученного здесь результата, не приведет к перераспределению усилий между элементами, то все жесткости при формировании конечно-элементных моделей можно оставлять номинальными.

### Литература

- Котов, А. А. Интегральная жесткость железобетонной балки с учетом трещинообразования и ползучести / А. А. Котов // Вестник гражданских инженеров. – 2023. – № 1 (96). – С. 22–32.
- Котов, А. А. Исследование железобетонной балки методом конечных элементов / А. А. Котов // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – № 5 (58). – С. 79–85.
- Котов, А. А. Модуль деформаций бетона как функция уровня нагрузления и времени / А. А. Котов // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования – 2021: сборник докладов Второй Национальной научной конференции (Москва, 8 декабря 2021 г.). – Москва : МИСИ – МГСУ. – 2022. – С. 27–35.
- СП 52-103-2007. Железобетонные монолитные конструкции зданий // Москва : ФГУП «НИЦ Строительство». – 2007. – 22 с.

**A.A. Kotov**  
*Murmansk Arctic University*

**CRACK FORMATION IN REINFORCED CONCRETE FRAME AND THE  
RELATIVE INTEGRAL STIFFNESS OF ITS ELEMENTS**

In structures with a monolithic reinforced concrete frame, crack formation in the elements and creep of concrete significantly reduce their initial bending stiffness and affect the distribution of forces between them. To obtain the correct distribution of forces in finite element design models of structures, the real bending stiffness of the elements of these models should be assigned, and for this, the question of the relative integral stiffness of the characteristic elements of the frame, determined by the processes of cracking and creeping in concrete, must be resolved first. In the presented work the question of the relative integral stiffness of the bent and compressed-curved frame elements is solved by calculation.

Reinforced concrete, crack formation, creep, calculation model, static indeterminacy, integral stiffness.



*А.В. Лукина, А.В. Репин*  
Владимирский государственный университет  
имени А.Г. и Н.Г. Столетовых

## АНАЛИЗ ФАСАДНЫХ СИСТЕМ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ КАПИТАЛЬНОГО РЕМОНТА ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ

Высокое потребление энергии в зданиях является серьезной проблемой. Фасадные системы благодаря своей архитектурной выразительности пользуются огромной популярностью на строительном, особенно при капитальных ремонтах. В статье выполнен анализ применения навесных и мокрых фасадов при капитальном ремонте общественных зданий. Описаны преимущества и недостатки этих систем.

Фасады, навесные системы, капитальный ремонт, теплопотери здания.

Управление техническим состоянием объектов недвижимости, а именно общественными зданиями, является относительно новым и актуальным направлением как в научных исследованиях, так и в практической деятельности управляющих компаний жилищно-коммунального комплекса, что обусловлено прежде всего отсутствием нормативов по долговечности многослойных ограждающих конструкций.

Значение и острая необходимость проведения капитального ремонта общественных зданий по всей стране обуславливают высокий интерес к выбранной теме. В последние годы установлено, что до 35 % теплопотерь приходится на наружные стены [1].

Федеральный закон Российской Федерации № 261-ФЗ от 23 ноября 2009 г. «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности» предусматривает ряд мероприятий, которые позволят обеспечить соответствие показателя теплового сопротивления наружных стен современным требованиям.

Существует два основных конструктивных решения систем наружного утепления фасадов – это фасадные системы теплоизоляционные композиционные с наружными штукатурными слоями и навесные вентилируемые фасадные (НВФ) системы, которые предусматривают воздушный зазор [2].

При капитальном ремонте наружных общественных зданий должны учитываться современные требования по энергосбережению: снижение теплопотерь через ограждающие конструкции. Фасадная система должна быть спроектирована с учетом всех возможных воздействий на нее и рисков, угрожающих ее характеристикам в течение эксплуатации.

До настоящего времени проблемы, связанные с использованием систем мокрого фасада и НВФ при капитальном ремонте до конца не решены. В нормативной и научно-технической литературе нет четкого алгоритма применения тех или иных систем. При разработке проектов капитальных ремонтов общественных зданий строители руководствуются технико-экономическим обоснованием принятых решений.

Сложность применений штукатурных и НВФ заключается в том, что конструкции навесных вентилируемых фасадов работают в условиях переменного перепада температур, причем разность температур может достигать 40–50°C. Это вызывает значительные внешние и внутренние напряжения материалов в условиях воздействий. Поэтому необходимо учитывать временное прогнозирование срока службы всей системы [3]. Вопросы долговечности, в частности креплений НВФ, недостаточно изучены.

Разработка эффективных подходов к проектированию имеет решающее значение для создания соответствующих фасадных решений. Проектирование фасадов является сложным и междисциплинарным процессом, включающим несколько зачастую противоречивых критерии эффективности. Актуальной остается проблема оценки качества ремонта мокрых фасадов, от которого зависит энергоэффективность общественных зданий. Поэтому исследование применения систем мокрых фасадов при капитальном ремонте общественных зданий является актуальной темой.

Фасад – это своеобразная визитная карточка любой постройки [4]. Регулярная экспертиза фасада здания необходима для выявления различных дефектов. Они возникают из-за ошибок при строительстве или сложных климатических условий. Осмотр проводят несколько раз в год: весной и осенью – плановый, после стихийных бедствий – внеплановый [5]. По его результатам формируют список дефектов, анализируют причины их появления и формируют архитектурное решение [6].

Навесные вентилируемые фасады – наиболее распространенный вид отделки и утепления существующих зданий при капитальном ремонте, так как они обладают рядом преимуществ (рис.). Благодаря легкому весу, долговечности, эстетичной форме и достаточно быстрому монтажу конструкции, осуществляющемуся в любых погодных условиях из-за отсутствия «мокрых работ». [7].

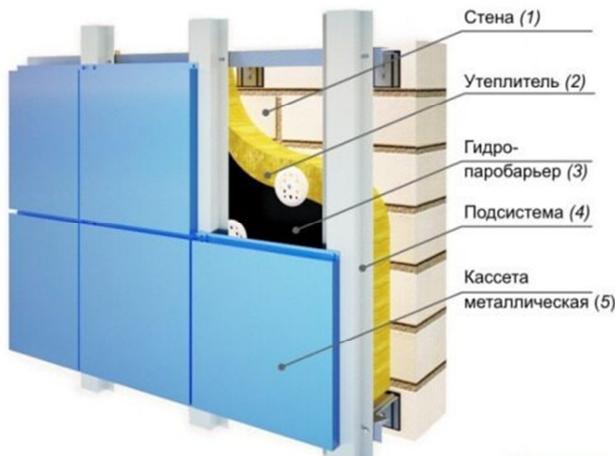


Рис. Принцип работы навесных фасадов [8]

Таблица

#### Сравнительный анализ навесного вентилируемого и системы «мокрого» фасадов

| № | Показатель  | НВФ   | Мокрый фасад  |
|---|---|---|---|
| 1 | Подготовка фасадов к возведению   | Можно устанавливать круглый год, даже при отрицательных температурах.   | Применение возможно, если стены полностью защищены от отрицательных температур и осадков.       |
| 2 | Монтаж фасада   | Учитывается СП:<br>– СП 131.13330.2020;<br>«Строительная климатология»;<br>– СП 50.13330.2012<br>«Тепловая защита зданий».        | Согласно техническим условиям.  |
| 3 | Обслуживание фасада   | Низкие трудозатраты   |   |
| 4 | Физико-химические характеристики утеплителя                                       | Как правило используют пенополистирольные или минераловатные плиты.   |   |
| 5 | Монтаж  | Быстрый монтаж за счет готовых каркасов   | Перед каждой стадией нанесения стенам необходимо высохнуть, что удлиняет время ремонтных работ. |
| 6 | Пожаростойкость   | Фасады выполнены из огнестойких или негорючих материалов. Однако используется ветрозащитная пленка, которая легко воспламеняется. | Более огнестойкая благодаря отсутствию горючих материалов, кроме пенополистирола.               |
| 7 | Средняя стоимость отделочных работ по монтажу (площадь покрытия стены 100 кв. м.) | 3890 руб.   | 2755 руб.   |

В качестве утеплителя как правило используют негорючую минеральную вату. Механически создаваемый поток воздуха при правильном управлении может положительно повлиять на тепловые и энергетические характеристики здания (рис.). НВФ состоят из трех основных слоев: несущий, теплоизолирующий, декоративно-защитный.

Штукатурные фасады, называемые еще «мокрыми», делятся на легкие и тяжелые. Инженеры-строители стали называть фасад «мокрым», потому что для его нанесения используются водные растворы. Мокрая штукатурка очень универсальна, ее можно применять на любом основании (кирпич, бетон или дерево). Также следует отметить ее относительно низкую стоимостью и простой монтаж [8]. Сопостав-

ительный анализ фасадных систем представлен в таблице.

Таким образом, обе фасадные системы могут быть применены при капитальном ремонте общественных зданий. Проведение ремонтов будет происходить с наружной части зданий, что не нарушит деятельности, которая проводится в общественном здании. Применение этих систем особенно актуально в учебных заведениях, где закрывать классы на период ремонта не представляется простой и легкой задачей.

Анализ рассмотренных преимуществ и недостатков фасадных систем показывает, что у НВФ физические свойства, такие как морозостойкость, звукоизоляция, теплоизоляция, выше мокрых фасадов. Эти преимущества объясняются отсутствием в НВФ вод-

ного раствора. В сухих климатических зонах лучше применять штукатурные фасады. В районах с сильными ветрами и большим количеством осадков навесные фасады превосходят мокрые фасады благодаря их устойчивости к эрозии.

Существуют различия в энергоэффективности, которые связаны с количеством тепловых мостиков, и следует отметить, что гипсовые фасады имеют меньшую долю тепловых мостиков. Экономический анализ играет фундаментальную роль при сравнении альтернативных решений или изучении преимуществ. НВФ более дорогие. Средняя стоимость площади покрытия стены на 100 кв. м. навесными фасадами будет дороже в 1,4 раза, нежели стены, выполненные из мокрой штукатурки.

### Литература

1. Schaffer, M., Bugenings, L.A., Larsen, O.K., Zhang, C. Exploring the potential of combining diffuse ceiling and double-skin facade for school renovations, *Build. Environ.* 235 (January) (2023), 110199, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110199>
2. Князев, О. В., Ласкаржевский, О. В. Навесные вентилируемые. Строительные материалы. – 2000. – № 4. – С. 16–17. – EDN IAJMSH.
3. Рошина, С. И., Лукина, А. В., Садовников, М. С., Сергеев, М. С. Реконструкция покрытия над одноэтажной пристройкой льнопрядильной фабрики в г. Вязники. Известия высших учебных заведений.
- Технология текстильной промышленности. – 2017. – № 4(370). – С. 226–230. – EDN YLHYOS.
4. Рошина, С. И., Сергеев, М. С., Лукина, А. В., Садовников, Ю. С. Особенности обследования зданий на предмет аварийности. В сборнике: Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. Материалы Международных академических чтений. Курский государственный университет. – 2015. – С. 325–332.
5. Дорошин, И. Н., Драгич, М. Особенности энергоэффективности и зарубежный опыт применения энергоэффективных фасадных систем в жилищном строительстве. Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 6(90). – С. 499–508. – EDN XKWZKP.
6. Ascione F., Bianco N., Iovane T., Mastellone M., Mauro G.M. The evolution of building energy retrofit via double-skin and responsive façades: a review, *Sol. Energy* 224 (2021) Pp. 703–717, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.06.035>. June.
7. <https://kronosfasad.ru/ventiliruemye-fasady/iz-kompozitnih-paneley>.
8. Грязнов, М. В., Смирнов, Е. А., Лукина, А. В., Стрекалкин, А. А. Анализ применения «сверхтонкого» жидкого керамического теплоизоляционного покрытия (ЖКТП) для повышения энергоэффективности стен при капитальном ремонте фасадов. БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2016. – № 8(984). – С. 58–59. – EDN WIQLEX.

A.V. Lukina, A.V. Repin

Vladimir State University named after Alexander and Nikolai Stoletovs (VLSU)

### ANALYSIS OF FACADE SYSTEMS DURING PUBLIC BUILDINGS CAPITAL REPAIRS

High energy consumption in buildings is a serious problem. Due to their architectural expressiveness, façade systems are extremely popular in the construction market, especially during major renovations. The article analyzes the use of curtain and wet facades during major renovations of public buildings. The advantages and disadvantages of these systems are described.

Facades, hanging systems, major repairs, heat loss of the building.

## **Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха**

УДК 697.2, 004.8



**Ю.В. Каперейко**

Брестский государственный технический университет

### **СТОИМОСТНОЙ АНАЛИЗ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ ВОДЯНОГО ОТОПЛЕНИЯ С МЕТЕОПРОГНОТИЧЕСКИМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ**

В данной статье представлены исследования по реализации метеопрогностического регулирования системами водяного отопления и эффективности данного подхода в сравнении с современными решениями погодо-зависимого управления параметрами систем водяного отопления. Совершенствование данной технологии может достигаться при использовании прогностически достоверных метеоданных, во временной основе которых лежит принцип краткосрочной адаптации системы теплоснабжения. Проведен сравнительный стоимостной анализ оборудования для работы этих систем.

Система водяного отопления, метеопрогностическое регулирование, микроклимат помещений.

В последние десятилетия развития способов проектирования различных инженерных систем ярко выражается необходимость рационализации процессов регулирования этих систем для установления экономически и энергетически обоснованных режимов работы.

В инженерных системах достижение энергосберегающего эффекта и экономии энергоресурсов является одной из важнейших целей, на которые ориентированы современные разработки по управлению инженерными системами. Одной из таких разработок является погодозависимое управление системами водяного отопления [3], которое используется и внедряется в существующие системы уже несколько десятилетий. Однако в процессе эксплуатации выявляются некоторые неточности в работе погодозависимой автоматики, а в частности, учет только температуры наружного воздуха в качестве метеорологического фактора, влияющего на теплопотери зданий.

В качестве альтернативы рассматривается концепция метеопрогностического регулирования. Научная идея состоит в использовании краткосрочных метеоданных для реализации процессов управления системами теплообеспечения. В пределах отопительного сезона колебания температуры наружного воздуха играют весомую роль в рамках эффективного теплопотребления. Необходимость предопределения данных трансформаций заключается в потенциальной возможности регулирования температуры теплоносителя в рамках подающего и обратного направления от теплоагрегата в логически обоснованной корреляции. Передовыми технологиями учета наружного температурного режима являются средства погодозависимого управления системами теплоснабжения.

Совершенствование погодозависимого управления может достигаться при использовании прогностически достоверных метеоданных, во временной основе которых лежит принцип краткосрочной адаптации системы теплоснабжения. Предиктивное управление возможно при использовании алгоритмов

удаленной передачи предполагаемых температурных значений со стороны метеоресурсов. Данная информация является полезной в рамках ее использования в динамике обращений, синхронизируемых в цикле подготовки параметров микроклимата для будущего температурного режима в пространственных пределах объекта эксплуатации.

Теоретическим преимуществом метеопрогностического управления параметрами теплоносителя является возможность внедрения в пределах предустановленного оборудования системы водяного отопления. Энергоэффективное потребление топливных энергоресурсов может достигаться за счет нивелирования тепловой инерционности объекта эксплуатации, что является отличительным признаком в сравнении со стандартным погодозависимым алгоритмом управления.

На тепловые потери зданий влияет не только температура, но и влажность, скорость движения воздуха. Так как существующие методики расчета не дают универсального для всех зданий решения по погодо-зависимому регулированию, включающему все метеорологические факторы, то для нахождения необходимых зависимостей может использоваться нейронная сеть, способная обучаться на входных и выходных параметрах системы.

С помощью подключенных датчиков наружной температуры воздуха, скорости ветра, влажности программа обеспечит наблюдение и расчет необходимой компенсации тепловых потерь. Посредством термо-приводов, установленных на отопительных приборах, расход теплоносителя в отопительных приборах будет изменяться в соответствии с необходимостью [4]. Это также позволит использовать такую характеристику, как инерционность здания, тем самым «предугадывать», какие тепловые потери будут у здания через определенный промежуток времени, и использовать накопленную теплоту для сглаживания кратковременных колебаний температуры внутри помещений.

Таблица

**Стоимостный сравнительный анализ оборудования для системы водяного отопления  
с метеопрогностическим регулированием и с погодозависимым управлением**

| Наименование позиции (вид оборудования)                                | Стоимость оборудования, бел. руб. | Кол-во, штук | Общая стоимость, бел. руб. |
|--|-----------------------------------|--------------|----------------------------|
| <b>Погодозависимая автоматика</b>                                      |                                   |              |                            |
| Программируемый контроллер погодозависимой автоматики Vaillant VRC 720 | 1673,19                           | 1            | 1673,19                    |
| Датчик температуры наружного воздуха Ariston Gal Evo                   | 70,00                             | 1            | 70,00                      |
| Комнатный датчик температуры внутреннего воздуха Auraton 3003          | 90,96                             | 10           | 909,6                      |
| Термостатический клапан ГЕРЦ TS-V, угловой, осевой 1/2"                | 56,91                             | 5            | 284,55                     |
| Термостатическая головка HERZ-THERMOSTAT MINI 1920068 30*1,5           | 51,98                             | 5            | 259,9                      |
| Сервопривод для контура теплого пола TIM M315NO                        | 22,26                             | 6            | 133,56                     |
| <b>Всего</b>   |                                   |              | <b>3330,8</b>              |
| <b>Метеопрогностическое регулирование</b>                              |                                   |              |                            |
| Программируемый контроллер погодозависимой автоматики Vaillant VRC 720 | 1673,19                           | 1            | 1673,19                    |
| Микроконтроллер WIFI Bluetooth ESP-WROOM-32 ESP-32S                    | 25,00                             | 1            | 25,00                      |
| Сервопривод для контура теплого пола TIM M315NO                        | 22,26                             | 6            | 133,56                     |
| Термопривод (для клапанов радиаторов) Kermi x-net 24 V                 | 93,50                             | 5            | 467,5                      |
| Датчик температуры наружного воздуха Ariston Gal Evo                   | 70,00                             | 1            | 70,00                      |
| Комнатный датчик температуры внутреннего воздуха Auraton 3003          | 90,96                             | 10           | 909,6                      |
| Устройство измерения ветра и дождя Aumller WRAG2                       | 442,41                            | 1            | 442,41                     |
| <b>Всего</b>   |                                   |              | <b>3721,26</b>             |

Данная система базируется на использовании современных технологий управления и мониторинга [1], а также интеграции данных о погодных условиях для оптимизации работы отопительного оборудования.

Прежде чем переходить к широкому внедрению таких систем, необходимо провести анализ их рентабельности и экономической выгоды. Оценка затрат включает в себя не только стоимость приобретения и установки необходимого оборудования, такого как датчики температуры и специальные контроллеры, но и расходы на разработку и внедрение программного обеспечения для сбора, анализа и использования метеорологических данных. Кроме того, необходимо учитывать расходы, связанные с обслуживанием и поддержанием работоспособности системы.

В качестве примера для расчета была взята модель двухэтажного индивидуального жилого дома с запроектированной системой водяного отопления и теплого пола.

Стоимостный сравнительный анализ оборудования для системы водяного отопления с метеопрогностическим регулированием и с погодозависимым управлением представлен в таблице.

Анализ показал, что установка усовершенствованной системы дороже погодозависимой автоматики на:

$$\delta = \frac{3721,26 - 3330,8}{3330,8} \cdot 100 \% = 11,7 \%$$

Для определения экономической выгоды от применения метеопрогностической концепции необходимо тестирование работы нейронной сети на реальном объекте эксплуатации системы водяного отопления в период значительного понижения температуры

наружного воздуха и появления атмосферных воздействий.

По теоретическим расчетам использование предиктивного управления позволит сгладить значительные температурные колебания внутри помещения [2], а также позволит уменьшить перерасход теплоносителя в случаях периодического увеличения его расхода.

На основании вышеприведенных фактов, применение искусственного интеллекта позволит создать систему, способную адаптироваться к персональным потребностям и предпочтениям пользователей, подстраиваться под индивидуальные особенности здания, в котором установлено такое оборудование. Система сможет учитывать предпочтения по температурному режиму в разных помещениях и автоматически регулировать его в соответствии с выбранными настройками.

### Литература

- Головко, В. А. Нейросетевые технологии обработки данных : учеб. пособие / В. А. Головко, В. В. Краснопрошин. – Минск : БГУ, 2017. – 263 с.
- Каперейко, Ю. В. Метеопрогностическое регулирование в системах водяного отопления / Ю. В. Каперейко, А. О. Заречный, В. Г. Новосельцев // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2024. – № 2 (134). – С. 6–11.
- Кувшинов, Ю. Я. Энергосбережение в системе обеспечения микроклимата зданий. – Москва : Издательство АСВ, 2010. – 320 с.
- Покотилов, В. В. Системы водяного отопления. – Вена, 2008. – 159 с.

**Y.V. Kapereyko**  
*Brest State Technical University*

**EQUIPMENT COST ANALYSIS FOR WATER HEATING SYSTEM  
WITH WEATHER PREDICTIVE CONTROL**

This article presents research on the implementation of weather predictive regulation of water heating systems and the effectiveness of this approach in comparison with modern solutions for weather-dependent control of parameters of water heating systems. The improvement of this technology can be achieved by using predictively reliable weather data, which is based on the principle of short-term adaptation of the heat supply system. The article presents a comparative cost analysis of the equipment for the operation of these systems.

Water heating system, weather predictive control, indoor microclimate.

## *Проектирование и строительство автомобильных дорог*

УДК 625.85.06



**Н.Н. Габибов, А.С. Батаков**  
Вологодский государственный университет

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ШЛАКА ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ЩЕБЕНОЧНО-МАСТИЧНОЙ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ**

В статье представлено исследование возможности применения щебня из сталеплавильного шлака для приготовления щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси. В результате установлено, что сталеплавильный шлак может выступать в роли дешевого альтернативного материала габбро-диабазу и является привлекательным выбором при приготовлении щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей.

Асфальтобетонная смесь, шлак, свойства, применение, сравнение.

Резкий рост интенсивности движения и увеличения транспортных нагрузок создал общую необходимость в повышении износостойкости и несущей способности покрытий из асфальтобетона на улицах городов и автомобильных дорогах общего пользования.

До недавнего времени в основном для строительства дорожных покрытий использовались традиционные горячие асфальтобетонные смеси, приготовленные согласно требованиям ГОСТ 9128-2013. В качестве заполнителя для приготовления данных смесей применялись традиционные минеральные материалы, такие как щебень, гравий, песок и другие.

В последние годы для повышения износостойкости дорожных покрытий широко начали применять щебеночно-мастичные асфальтобетонные смеси. Они характеризуются высоким содержанием щебня и отличаются повышенной износостойкостью и долговечностью.

Для приготовления щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей в основном используются щебни из изверженных и метаморфических горных пород, а также из гравия и валунов, соответствующие марке щебня М1000 и марке на сопротивление к износу от И1 до И2. В условиях Вологодской области получили распространение преимущественно щебеночно-мастичные асфальтобетонные смеси на основе габбро-диабаза. Данный материал соответствует требованиям, предъявляемым к щебням, для приготовления щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей.

Габбро-диабазы – это глубинные известняковые породы, которые представляют собой разновидности пироксенов пород. Они являются основной составляющей глубинных земель и имеют разнообразную структуру и состав.

В строительстве габбро-диабазы играют важную роль благодаря своей прочности и устойчивости к различным нагрузкам. Они широко применяются в качестве материала для строительства дорожного по-

крытия, набережных, облицовок наружных стен и тротуаров. Благодаря своей высокой плотности и твердости, габбро-диабазы обеспечивают долговечность и стойкость к износу.

Габбро-диабазы также используются в области геотехники, особенно в строительстве дорог. Благодаря своей прочности и стабильности они могут быть использованы для создания устойчивых и надежных фундаментов и стабилизации грунта. Габбро-диабазы также используются в производстве асфальтобетонных смесей и других материалов, используемых для дорожного покрытия.

Начиная с 90-х годов в Вологодской области для приготовления асфальтобетонных смесей стали применять металлургические шлаки, в частности доменные и сталеплавильные, выпускаемые АО «Северсталь».

К настоящему времени эти материалы успешно применяются при производстве асфальтобетонных смесей для устройства асфальтобетонных покрытий городских улиц и дорог общего пользования. Щебень из металлургических шлаков отличается высокими показателями дробимости и сопротивления к износу. Кроме того, по сравнению с габбро-диабазом, характеризуется сравнительно невысокой стоимостью.

В лабораторных условиях проводились испытания щебня из металлургических шлаков на соответствие требованиям, предъявляемым к щебням, входящим в состав щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей.

В качестве эталонного щебня испытывался также щебень из габбро-диабаза. Результаты испытаний представлены в таблице 1.

Сравнительный анализ результатов испытаний показывает, что по физико-механическим показателям сталеплавильный шлак полностью соответствует требованиям, предъявляемым к щебням для приготовления щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей, тогда как щебень из доменного шлака не соответствует

стандарту. Следовательно, для дальнейших исследований был принят щебень из сталеплавильного шлака.

Были изготовлены образцы щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси и испытывались в лабораторных условиях ФКУ УПРДОР «Холмогоры», имеющего компетентность по стандарту [1] и обладающего сертификатами соответствия для проведения испытаний на заявленную область действия. Данная организация имеет необходимые оборудование на проведение лабораторных испытаний асфальтобетонной смеси по показателям, описанным в нормативном документе [2].

Ниже, в таблице 2, представлен перечень проведенных лабораторных испытаний и их принадлежность к конкретным нормативным документам.

Результаты испытаний приведены в таблице 3.

В рамках данных исследований проводился также расчет экономической эффективности применения щебня из сталеплавильного шлака АО «Северсталь» для приготовления щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей.

Стоимость компонентов, входящих в состав щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси, принятой применительно к АБЗ ООО «Магистраль» за 2023 год и представлена в таблице 4.

Расчеты стоимости 1 тонны щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси (ЩМА-16) на основе щебня из габбро-диабаза и сталеплавильного шлака представлены соответственно в таблицах 5 и 6.

**Результаты испытаний свойств щебня**

**Таблица 1**

| Показатели                                  | Доменный шлак<br>АО «Северсталь» | Сталеплавильный шлак<br>АО «Северсталь» | Габбро-диабаз | Метод испытаний |
|---|----------------------------------|---|---------------|-----------------|
| Дробимость, марка                           | M800                             | M1200                                   | M1400         | По ГОСТ 3344-83 |
| Морозостойкость, марка                      | F200                             | F50                                     | F150          | По ГОСТ 3344-83 |
| Активность, марка                           | A                                | BA                                      | BA            | По ГОСТ 3344-83 |
| Сопротивление дроблению и износу, марка     | ИПП                              | ИИ                                      | ИИ            | По ГОСТ 3344-83 |
| Удельная эффективность ЕРН, кБк/кг          | 50                               | 26.3                                    | 305           | По ГОСТ 3344-83 |
| Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>       | 1250                             | 1620                                    | 1390          | По ГОСТ 3344-83 |
| Устойчивость структуры, марка               | УС1                              | УС2                                     | УС2           | По ГОСТ 3344-83 |
| Содержание металлических примесей, %        | 0,0                              | 0,0                                     | 0,0           | По ГОСТ 3344-83 |
| Содержание пылевидных и глинистых частиц, % | 1,5                              | 1,10                                    | 4,8           | По ГОСТ 3344-83 |
| Содержание слабых зерен, %                  | 0,9                              | 0,0                                     | 0,0           | По ГОСТ 3344-83 |
| Полный остаток на сите d мм, %              | 97,2                             | 97,2                                    | 97,8          | По ГОСТ 3344-83 |
| Полный остаток на сите 0,5 (d+D) мм, %      | 55,8                             | 56,2                                    | 56,5          | По ГОСТ 3344-83 |
| Полный остаток на сите D мм, %              | 3,9                              | 5,5                                     | 4,3           | По ГОСТ 3344-83 |

**Перечень испытаний щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей**

**Таблица 2**

| Наименование показателя     | Метод испытания      |
|-----------------------------|----------------------|
| Максимальная плотность      | ГОСТ Р 58401.16-2019 |
| Объемная плотность          | ГОСТ Р 58401.10-2019 |
| Содержание воздушных пустот | ГОСТ Р 58401.8-2019  |
| Средняя глубина колеи       | ГОСТ Р 58406.3-2020  |

**Результаты испытаний свойств составов ЩМА-16 на различных щебнях**

**Таблица 3**

| Показатели                                    | Габбро-диабаз | Сталеплавильный шлак<br>АО «Северсталь» | Требования согласно<br>ГОСТ           |
|---|---------------|---|---------------------------------------|
| Минимальная масса испытуемой пробы, г         | 16 235        | 16 495                                  | 2000 (согласно<br>ГОСТ 58401.15-2019) |
| Максимальная плотность, г/см <sup>3</sup>     | 2,76          | 2,81                                    | Не нормируется                        |
| Объемная плотность, г/см <sup>3</sup>         | 2,67          | 2,71                                    | Не нормируется                        |
| Содержание воздушных пустот, %                | 2,1           | 3,56                                    | От 2 до 4                             |
| Средняя глубина колеи, мм                     | 3,91          | 3,97                                    | Не более 4,0                          |
| Толщина изготавливаемого<br>образца-плиты, мм | 50            | 50                                      | 55±5                                  |

Таблица 4

**Стоимостные показатели материалов, входящие в состав ЩМА-16**

| Наименование компонентов             | Стоимость материала на 1 тонну, руб. | Стоимость материала на 1 кг, руб. |
|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Битум БНД 70/100                     | 42 000                               | 42                                |
| VIATOP Premium                       | 54 000                               | 54                                |
| Минеральный порошок (МП-2)           | 3200                                 | 3,2                               |
| Сталеплавильный шлак АО «Северсталь» | 1350                                 | 1,35                              |
| Щебень на габбро-диабазе             | 2760                                 | 2,76                              |

Таблица 5

**Стоимость ЩМА-16 на основе щебня из габбро-диабаза**

| Наименование компонентов                         | Процентное содержание, % от общей массы | Объем материала на 1 т ЩМА, кг | Стоимость материала за 1 кг, руб. | Стоимость материала от общего объема, руб. | Итоговая стоимость, руб. |
|--|---|--------------------------------|-----------------------------------|--|--------------------------|
| Битум БНД 70/100 (сверх 100 % минеральной части) | 5,7                                     | 57                             | 42                                | 2394,00                                    | 5470,64                  |
| VIATOP Premium (сверх 100% минеральной части)    | 0,5                                     | 5                              | 54                                | 270,00                                     |                          |
| Минеральный порошок (МП-2)                       | 10,6                                    | 106                            | 3,2                               | 339,20                                     |                          |
| Щебень на габбро-диабазе АО «Северсталь»         | 89,4                                    | 894                            | 2,76                              | 2467,44                                    |                          |

Таблица 6

**Стоимость ЩМА-16 на основе щебня из сталеплавильного шлака АО «Северсталь»**

| Наименование компонентов                         | Процентное содержание, % от общей массы | Объём материала на 1 т, кг | Стоимость материала за 1 кг, руб. | Стоимость материала от общего объема, руб. | Итоговая стоимость, руб. |
|--|---|----------------------------|-----------------------------------|--|--------------------------|
| Битум БНД 70/100 (сверх 100 % минеральной части) | 5,7                                     | 57                         | 42                                | 2394,00                                    | 4210,1                   |
| VIATOP Premium (сверх 100 % минеральной части)   | 0,5                                     | 5                          | 54                                | 270,00                                     |                          |
| Минеральный порошок (МП-2)                       | 10,6                                    | 106                        | 3,2                               | 339,20                                     |                          |
| Сталеплавильный шлак АО «Северсталь»             | 89,4                                    | 894                        | 1,35                              | 1206,90                                    |                          |

Из данных таблицы 5 и 6 следует, что стоимость одной тонны смеси ЩМА-16 на основе щебня из габбро-диабаза составляет 5470,64 руб., тогда как при использовании щебня из сталеплавильного шлака она снижается и составляет 4210,10 руб. Следовательно, использование щебня из сталеплавильного шлака приводит к снижению себестоимости щебеноочномастичной асфальтобетонной смеси на 23 %.

Таким образом, проведенные исследования свидетельствуют о том, что сталеплавильный шлак может выступать в роли дешевого альтернативного материала габбро-диабазу и является привлекательным выбором при приготовлении щебеноочномастичных асфальтобетонных смесей.

**Литература**

1. ГОСТ Р ИСО/МЭК 17.25-2021. межгосударственный стандарт. общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. Дата введения 28.06.2019. № 55-ст. Действует взамен ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025-2009.

2. ГОСТ Р 508406.1-2020 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси щебеноочномастичные асфальтобетонные и асфальтобетон. Технические условия. Дата введения 15.05.2020. № 191-ст. Действует взамен ПНСТ 183-2019.

*N.N. Gabibov, A.C. Batakov*  
*Vologda State University*

**STUDYING POSSIBILITY OF STEELMAKING SLAG USE FOR PREPARATION  
OF CRUSHED STONE MASTIC ASPHALT CONCRETE MIXTURE**

The article presents the possibilities of using crushed stone from steelmaking slag for the preparation of crushed stone-mastic asphalt concrete mixture. The results of these studies have established that steelmaking slag can act as a cheap alternative material for gabbro-diabase and is a good option for the preparation of crushed stone-mastic asphalt concrete mixtures.

Asphalt-concrete mixture, slag, properties, application, comparison.



## ОСОБЕННОСТИ МЕЖСЕЗОННОГО ПОВЕДЕНИЯ ГРУНТОВ АРКТИЧЕСКИХ ТЕРРИТОРИЙ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО РЕГИОНА

В статье представлены результаты анализа причинно-следственной связи изменения температуры в грунтах, характерных для арктической территории северо-запада страны в период межсезонья. Проанализированы грунтово-геологические и климатические характеристики рассматриваемого района, определен перечень разрушений строительных конструкций, возникающих в весенний период, на примере автомобильных дорог.

Арктика, автомобильные дороги, разрушения, грунты, температура.

Климатические особенности Арктики северо-западной части России обусловлены продолжительной отрицательной температурой в зимний период, с 20-х чисел октября до середины апреля, мая, коротким и относительно прохладным летом и большим среднегодовым количеством атмосферных осадков в диапазоне от 550 до 750 мм. Вследствие этого 20,5 % всей представленной территории заняты болотами и озерами [1]. Такие условия стали причиной образования болотно-подзолистых грунтов и обширных торфяников на пониженных участках рельефа и подзолистых остаточно-карбонатных с перегнойно-карбонатными грунтами на возвышенностях.

Подзолистые почвы появляются в суглинистых грунтах при цикличном замерзании и оттаивании в водонасыщенном состоянии, что как раз и является характерной особенностью Мурманской и Архангельской областей, а также Республики Карелия. А суглинистые грунты имеют низкие значения коэффициента фильтрации и высокие показатели по набуханию, водонасыщению.

Говорят, что «весной мороз уходит в землю», – данное явление крайне опасно для инженерных сооружений, т.к может сопровождаться появлением разрушений.

В физике данный феномен называется «теплоперенос в грунтах». Процесс теплопереноса в грунтах – это сложное явление, прежде всего зависящее от климатических условий, а также от состава грунта непосредственно. Если по-другому, то процесс теплопередачи в любой среде – это прежде всего перераспределение энергии, вследствие которого тепло от более теплого объекта передается к более холодному, пока их температуры не станут одинаковыми.

Именно это мы и наблюдаем, когда смотрим на то, как промерзает грунт с течением времени. Сначала грунт контактирует с более холодной средой, из-за чего его температура понижается, далее промерзший слой грунта контактирует со слоем грунта, залегающим ниже, тем самым охлаждая его. Так как температура внешней среды постоянно отрицательная, то

грунт промерзает все глубже, не приходя в тепловое равновесие.

С точки зрения физики явление «весной мороз в землю уходит» можно объяснить довольно просто. Зимой грунт промерзает не сразу на всю глубину, а делает это постепенно. Когда приходит оттепель, грунт сверху начинает также постепенно отогреваться, однако процесс промерзания продолжается за счет выбега энергии в толще грунта, выделения теплоты льдообразования, что создает картину, будто «мороз идет в землю». [4]

Зная то, какие процессы происходят в грунте, можно выделить основные теплофизические свойства и для определения и прогнозирования глубины и скорости промерзания и оттаивания грунтовых оснований.

К основным теплофизическими характеристикам грунтов относятся коэффициент теплопроводности, объемная теплоемкость и коэффициент температуропроводности.

Теплопроводностью грунта называется его способность пропускать тепло при условии разных температур поверхности. Данная характеристика определяется коэффициентом теплопроводности, который выступает показателем пропорциональности между величиной удельного теплового потока и градиентом температуры в грунте. Коэффициент теплопроводности численно равен установившемуся потоку тепла через слой единичной толщины при разнице температур на границах слоя в 1 °C. Единица измерения коэффициента теплопроводности – Вт/(м · °C).

Теплоемкость грунта характеризует его способность поглощать тепло при нагревании и удерживать его в себе, а при охлаждении – отдавать (выделять). Другими словами, это некоторое количество тепла, необходимое для повышения температуры грунта на 1 °C. Различают удельную и объемную теплоемкость грунта. Значение теплоемкости грунтов как многокомпонентных систем определяется теплоемкостью его составляющих (твердых, жидких и газообразных). На практике используют значения объемной теплоемкости, которую получают путем умножения ее удель-

ной величины на показания плотности грунта. Единица измерения объемной теплоемкости – Дж/(м<sup>3</sup> · °C).

Температуропроводность характеризует скорость изменения (выравнивания) температуры грунта. Она является мерой скорости прогрева или охлаждения грунта, численно принимается равной отношению теплопроводности к объемной теплоемкости, измеряется в м<sup>2</sup>/с [3]:

$$a = \frac{\lambda}{C\rho}, \quad (1)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м · °C);

$C\rho$  – объемная теплоемкость, Дж/(м<sup>3</sup> · °C).

Важно отметить, что из-за низкого показателя температуропроводности, а также его толщины, которая в среднем составляет 80 см для региона, снежный покров является хорошим утеплителем и не позволяет холodu добраться до грунта. Однако с началом весны часто можно наблюдать, что снежный покров уменьшается, плотность снега увеличивается, что повышает температуропроводность и отрицательные значения окружающей среды оказывают более активное воздействие на скорость промерзания.

В целом глубина промерзания носит случайный характер и от года к году имеет отличающиеся значения, ввиду отличий по осеннему обводнению грунтов, характера наступления отрицательных температур, а именно плавное падение температуры или резкое, наличие и величина снежного покрова, особенностей весенней оттепели, а также других показателей [4].

Рассмотрим сезон осень – зима – весна 2023–2024 гг. Осень характерна теплым и сухим сентябрем, средней влажности октябрем с первыми заморозками и значительными осадками в виде снега в ноябре с плавно поникающейся температурой. Зима отличалась снежным декабрям и оттепелью в конце января, в результате которой снежный покров уменьшился на 13 см, после чего холодное начало февраля и оттепель в последние дни. Весна: март – частые перепады температур, апрель – колоссальные объемы осадков в виде снега и дождя, положительная температура. Таким образом, с наступлением зимы все было в порядке, плавное похолодание с покрытием снега, т.е. резкого промерзания грунта, не произошло, далее рекордные снегопады предвещали минимальное промерзание с обильным паводком весной, однако резкая оттепель в январе обеспечила уменьшение снежного покрова за два дня на 20 %. Впоследствии февраль, март и апрель имели цикличность температур от +10 до -25. Общее количество циклов перепадов составило 11, что достаточно велико. Это способствовало постоянному обводнению грунтов талой водой и ее замерзанием 11 раз с увеличением общей глубины промерзания с каждым циклом до наступления постоянной положительной температуры [5]. И, как следствие, весна 2024 года для дорог северо-запада страны стала настоящим испытанием на прочность.

Согласно исследованиям разрушений покрытий автомобильных дорог [2] (рис.), видно общее преобладание наличия трещин разного рода над остальными деформациями.

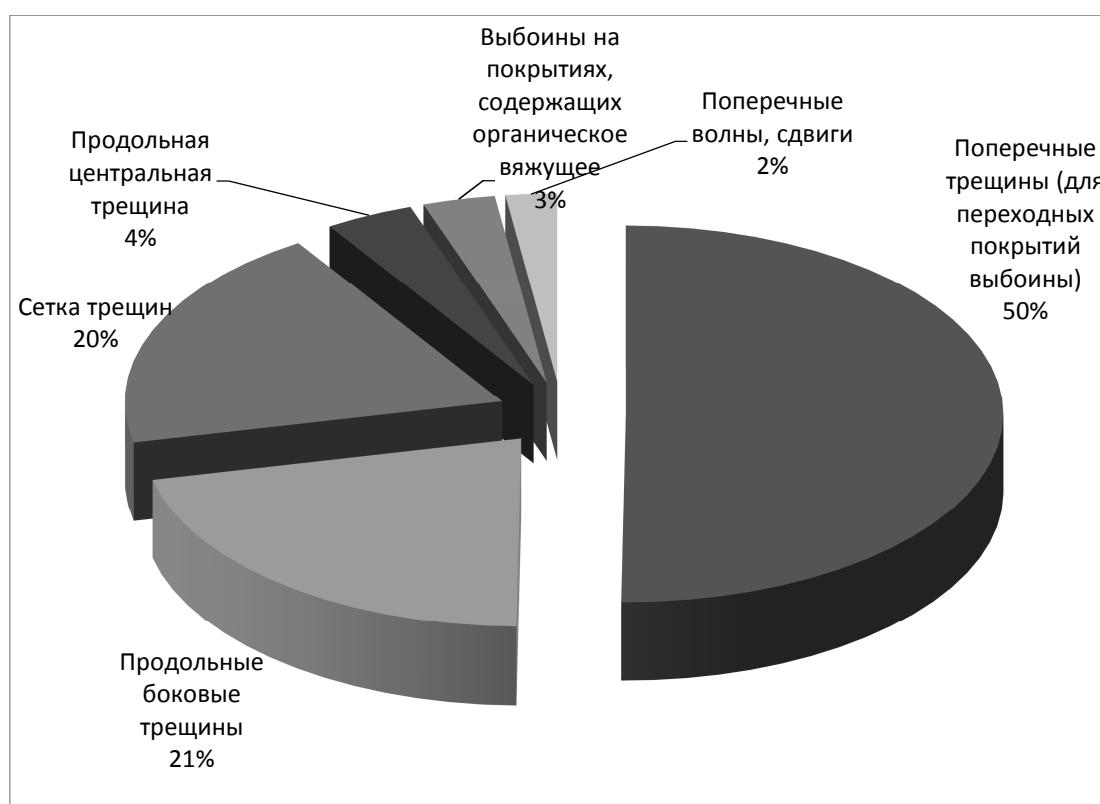


Рис. Частота встречаемости дефектов

Причинами образования трещин могут быть температурные сужения или расширения материала покрытия, пучинистые явления в грунтах рабочего слоя либо уменьшение несущей способности основания дорожной одежды ввиду переувлажнения материала.

Таким образом, для обеспечения надежности работы автомобильных дорог арктического региона с учетом изменяющегося климата рекомендуется при проведении капитального ремонта использовать непучинистые материалы на глубину средне-максимальной глубины промерзания, Мурманская область – 160 см, Карелия – 150 см, Архангельская область – 175 см. При проведении ремонтных работ особое внимание следует уделить водоотводу и понижению уровня грунтовых вод.

#### **Литература**

1. Степанов, А. В. Организация строительства автомобильных дорог [Текст] / А. В. Степанов, Т. Г. Винокурова, В. К. Катаров [и др.]. – Петрозаводск : ПетрГУ, 2021.
2. Степанов, А. В. Экспериментальная оценка состояния дорог Карелии, подверженных активному воздействию лесовозного транспорта [Текст] / А. В. Степанов, А. В. Груздов // Resources and Technology. – Петрозаводск, 2023. – № 4. – С. 160–173.
3. Ядовина, К. С. О практическом значении определения теплофизических свойств сезоннопромерзающих грунтов / К. С. Ядовина, А. В. Мащенко // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2017. – Т. 8, № 1. – С. 81–89.
4. Леонович, И. И. Глубина промерзания грунтов – важнейший фактор водно-теплового режима земляного полотна / И. И. Леонович, Н. П. Вырко // Строительная наука и техника. – 2011. – № 5. – С. 27–35.
5. Рекомендации по методике изучения процессов сезонного промерзания и протаивания грунтов / ПНИИС. – Москва : Стройиздат, 1986 – 80 с.

**A.V. Stepanov**

*Petrozavodsk State University*

#### **FEATURES OF SOILS INTER-SEASONAL BEHAVIOR IN THE ARCTIC TERRITORIES OF THE NORTHWESTERN REGION**

The article presents the results of the analysis of the temperature changes causal relationship in soils characteristic of the Arctic territory of the north-west of the country during the off-season. The soil-geological and climatic characteristics of the area under consideration are analyzed, a list of structural failures, that occur in the spring period, is determined using the example of highways.

Arctic, highways, destruction, soils, temperature.



**V.A. Шорин, А.Ю. Вельсовский**  
Вологодский государственный университет

## ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВЫБОРА ГЕРМЕТИЗИРУЮЩИХ МАСТИК ДЛЯ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ

В статье рассмотрен и исследован актуальный вопрос поиска эффективных гидроизоляционных материалов для цементобетонных конструкций мостов, мостовых переходов и других искусственных сооружений на автомобильных дорогах. Впервые, по результатам анализа большой выборки источников отечественной и зарубежной научно-технической информации, разработана и предложена новая методика подхода к выбору гидроизоляционных материалов для бетонных покрытий по их технико-экономическим показателям. По результатам статистической обработки технических и экономических характеристик определен доверительный интервал и показаны лучшие гидроизоляционные материалы.

Герметизирующие мастики, технические характеристики, адгезия с бетоном, теплоемкость, водопоглощение, относительное удлинение, стоимость покрытия, доверительный интервал.

Мостовые сооружения являются сложными инженерными объектами, надежность эксплуатации которых зависит и от их правильного конструирования, и от правильного подбора материалов, применяемых при их строительстве. Неудовлетворительное состояние проезжей части мостового полотна мостов является одной из причин разрушения бетона, находящегося ниже мостового полотна, и сокращения срока службы конструктивных элементов. Первостепенным технологическим элементом про этом является правильное выполнение конструкции покрытия и особенно гидроизоляции, исключающей проникновение нежелательной влаги, приводящей к коррозии и преждевременному разрушению бетонных конструкций.

В дорожном строительстве бетон является очень распространенным материалом за счет своей прочности. Конструкции из него выдерживают большие нагрузки, вибрации. Возводят мосты, путепроводы, развязки и трубы из бетонных изделий. Несмотря на множество плюсов и распространенность, материал имеет ряд минусов. Главный из них – коррозия.

Коррозия бетона бывает нескольких видов [1–3]:

- растворение составных частей бетонного камня;
- взаимодействие цементного камня с кислотами, содержащимися в воде;
- образование и кристаллизация труднорастворимых веществ в порах.

В «чистом» виде ни один вид коррозии не встречается. Это всегда комбинация нескольких видов вследствие воздействия множества агрессивных факторов. Учитывая особенности строительства автомобильных дорог, выбираем самые распространенные материалы для устройства гидроизоляции – это битумные мастики. Особенно актуальным в этом плане является правильный выбор по физико-механическим показателям герметизирующих мастик. Однако в настоящее время из-за очень большого количества

различных материалов на рынке сложно прийти к правильному выбору.

Выбираем из общего массива материалов те, которые удовлетворяют требованиям норм и стандартов. В итоге получается список из десяти различных мастик:

- мастика битумно-полимерная ТехноНИКОЛЬ № 41 (Эврика);
- мастика битумно-резиновая Грида;
- полиуретановая мастика Гипердесмо;
- мастика ТехноНИКОЛЬ № 21 (Техномаст);
- мастика водоэмulsionная ТехноНИКОЛЬ № 33;
- битумно-полимерная мастика МЭБИС;
- битумно-полиуретановая мастика-клей-герметик ГИДРОЛОК Г;
- изоляционная мастика ИЖОРА МБР-Г-90;
- битумно-латексная эмульсия ИЖОРА ДМ-65;
- мастика СЛАВЯНКА гидроизоляционная обмазочная.

Используя данные по каждой мастике, предоставляемые в свободном доступе на специализированных интернет-ресурсах [4, 5], составляем сводную таблицу. Вносим необходимые для сравнения показатели, чтобы в дальнейшем рассчитать средние значения показателей, среднее квадратичное отклонение и доверительный интервал. В качестве основных базовых физико-технических характеристик битумных мастик выбрали следующие: адгезия с бетоном, адгезия между слоями, относительное удлинение при разрыве, теплостойкость и водопоглощение по массе.

Также прописываем цену единицы (1 кг) материала и средний расход материала на единицу ( $\text{м}^2$ ) площади. Перемножив эти данные получаем расход денежных средств на единицу площади. Таким образом, мы сможем сравнивать непосредственно цену покрытия, а не самого материала.

В строительстве автомобильных мостов подбор материалов является очень важной и ответственной задачей. В период проектирования необходимо правильно выбрать необходимые материалы из огромного списка аналогов. Надо учесть технические характеристики, стоимость производства работ.

Для начала рассчитываем среднее значение показателей по формуле (1):

$$x_{cp} = \frac{\sum x_i}{n}. \quad (1)$$

Далее среднее квадратичное отклонение по формуле (2):

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - x_{cp})^2}{n-1}}. \quad (2)$$

Также рассчитываем доверительный интервал по формуле (3):

$$S_x = \frac{S}{\sqrt{n}}. \quad (3)$$

Составляем диаграммы для сравнения технических характеристик мастик. Чтобы не загромождать графики, присвоим каждому материалу номер:

1. Мастика битумно-полимерная ТехноНИКОЛЬ № 41 (Эврика);
2. Мастика битумно-резиновая Грида.
3. Полиуретановая мастика Гипердесмо.
4. Мастика ТехноНИКОЛЬ № 21 (Техномаст).
5. Мастика водоэмульсионная ТехноНИКОЛЬ № 33.
6. Битумно-полимерная мастика МЭБИС.
7. Битумно-полиуретановая мастика-клей-герметик ГИДРОЛОК Г.
8. Изоляционная мастика ИЖОРА МБР-Г-90.
9. Битумно-латексная эмульсия ИЖОРА ДМ-65.
10. Мастика СЛАВЯНКА гидроизоляционная обмазочная.

Далее представлены диаграммы сравнения значений технических характеристик (рис. 1–5). Сплошной линией обозначено среднее значение. Штриховыми линиями – доверительный интервал. Таким образом расставляем баллы по каждой характеристике: за значения выше доверительного интервала – 1 балл, в доверительном интервале – 2 балла, ниже – 3 балла.

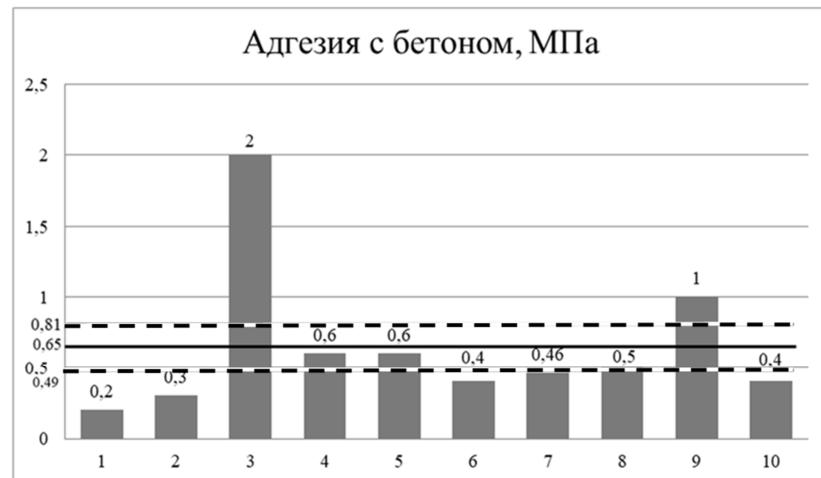


Рис. 1. Диаграмма адгезии с бетоном

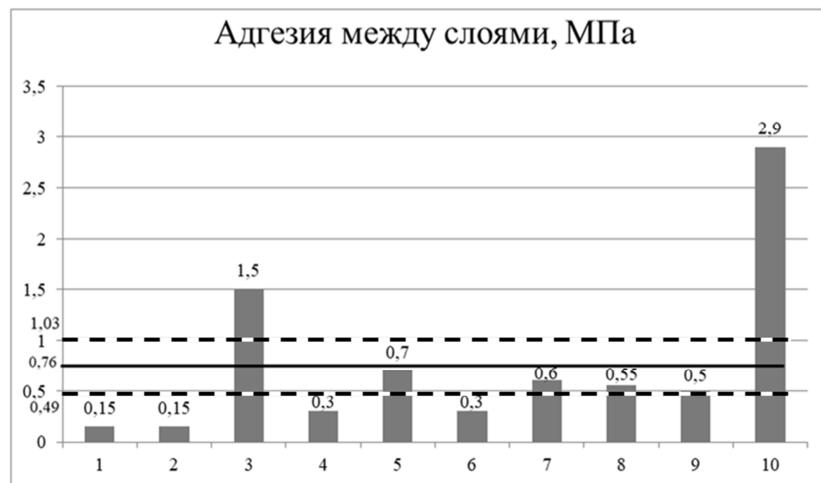


Рис. 2. Диаграмма адгезии между слоями материала

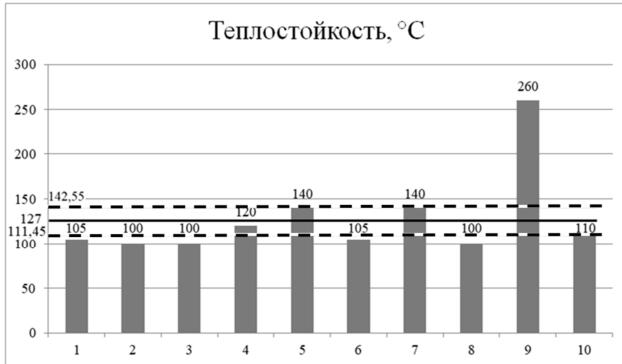


Рис. 3. Диаграмма теплостойкости материалов

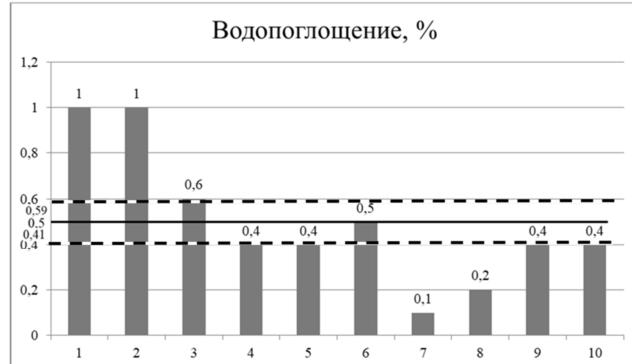


Рис. 4. Диаграмма водопоглощения материалов

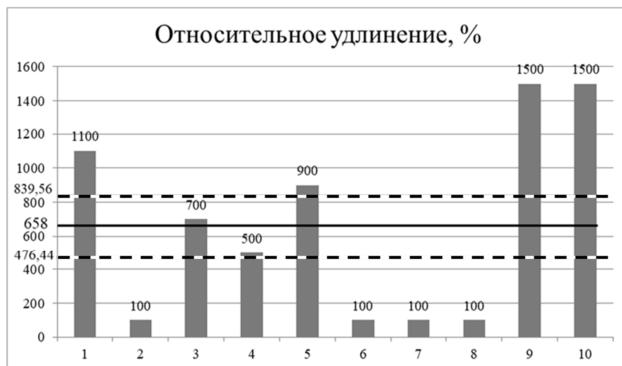


Рис. 5. Диаграмма относительного удлинения материалов при разрыве



Рис. 6. Диаграмма цены единицы покрытия

Таблица

#### Сводная таблица материалов

| Показатели                      | Баллы |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|---------------------------------|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|                                 | 1     | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 |
| Адгезия с бетоном               | 3     | 3  | 1  | 2  | 2  | 3  | 3  | 2  | 1  | 3  |
| Адгезия между слоями материала  | 3     | 3  | 1  | 3  | 2  | 3  | 2  | 2  | 2  | 1  |
| Относительное удлинение         | 1     | 3  | 2  | 2  | 1  | 3  | 3  | 3  | 1  | 1  |
| Теплостойкость                  | 3     | 3  | 3  | 2  | 2  | 3  | 2  | 3  | 1  | 3  |
| Водопоглощение                  | 1     | 1  | 1  | 3  | 3  | 2  | 3  | 3  | 3  | 3  |
| Итог по техническим показателям | 11    | 13 | 8  | 12 | 10 | 14 | 13 | 13 | 8  | 11 |
| Цена покрытия                   | 1     | 1  | 3  | 2  | 3  | 1  | 2  | 1  | 3  | 1  |
| Итог                            | 12    | 14 | 11 | 14 | 13 | 15 | 15 | 14 | 11 | 12 |

При сравнении водопоглощения будем действовать по обратной схеме, потому что чем меньше водопоглощение, тем лучше. Тогда, если значение меньше доверительного интервала, присваиваем 1 балл, в доверительном интервале – 2 балла, выше – 3 балла (рис. 4, 5).

Для сравнения цены единицы покрытия присваиваем за цену до 200 руб. 1 балл, до 500 руб. – 2 балла, свыше 500 руб. – 3 балла. Для наглядности также производим построение диаграммы (рис. 6).

Итоги расстановки баллов представлены ниже в таблице. Суммируя баллы, получаем итоговые значения. Чем меньше сумма, тем лучше материал отвечает нашим требованиям. Сочетая значения баллов по техническим характеристикам и цене покрытия, получаем итоговый рейтинг.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. По результатам комплексного сравнения и статистической обработки технических характеристик рассмотренных материалов, а также с учетом цены и качества, можно выделить следующие гидроизоляционные материалы – это: «Полиуретановая мастика Гипердесмо»; «Битумно-латексная эмульсия ИЖОРА ДМ-65»; «Мастика битумно-полимерная ТехноНиколь № 33 (Эврика)».

2. По результатам комплексного сравнения и статистической обработки технических характеристик рассмотренных материалов, а также с учетом цены и качества, можно выделить следующие гидроизоляционные материалы – это: «Полиуретановая мастика Гипердесмо»; «Битумно-латексная эмульсия ИЖОРА ДМ-65»; «Мастика битумно-полимерная ТехноНиколь № 41 (Эврика)»; «Мастика СЛАВЯНКА гидроизоляционная обмазочная».

#### Литература

- Все о коррозии [Электронный ресурс]: инф.-справ. система. – Режим доступа: <https://www.okorozii.com/korrozabetona.html>.

2. Москвин, В. М. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В. М. Москвин, Ф. М. Иванов, С. Н. Алексеев, Е. А. Гузеев. – Москва : Стройиздат, 1980. – 536 с.
3. СП 28.13330.2012. Свод правил. Защита строительных конструкций от коррозии: Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85: утв. Минрегионом РФ
- 29.12.2011 № 625 – Введ. 01.01.2013. – Москва : ФГУП ЦПП, 2013 – 94 с.
4. Изоляция фундамента [Электронный ресурс]: инф.-справ. система. – Режим доступа: <http://fundaizol.ru/>.
5. Производство герметизирующих материалов «БРИТ» [Электронный ресурс]: инф.-справ. система. – Режим доступа: <http://www.brit-r.ru>

*V.A. Shorin, A.Y. Velsovsky  
Vologda State University*

## **TECHNICAL AND ECONOMIC ASPECTS OF BRIDGE STRUCTURES SEALING MASTICS CHOICE**

The article considers and studies the topical issue of finding effective waterproofing materials for cement-concrete structures of bridges, bridge crossings and other artificial structures on highways. For the first time, based on the results of the analysis of a large sample of sources of domestic and foreign scientific and technical information, a new method of approach to the selection of waterproofing materials for concrete coatings according to their technical and economic indicators has been developed and proposed. Based on the results of statistical processing of technical and economic characteristics, a confidence interval was determined and the best waterproofing materials were shown.

Sealing mastics, technical characteristics, adhesion to concrete, heat capacity, water absorption, elongation, coating cost, confidence interval.



**O.E. Копейкин, Л.С. Шевцов**  
Вологодский государственный университет

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ОТКАЗА СТАЛЬНОЙ БАЛКИ ПРИ ИЗГИБЕ ПО КРИТЕРИЮ ПРОЧНОСТИ НОРМАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ

В статье представлен подход к определению вероятности отказа стального стержня при изгибе по критерию прочности нормальных сечений. На основе предложенного подхода можно выполнить подбор сечения конструктивного элемента (прогон, балка и др.) на заданный уровень надежности. В качестве метода оценки вероятности отказа используется метод Монте-Карло, численная реализация которого может быть выполнена на базе простых программ. В отличие от метода предельных состояний, на основе разработанных алгоритмов можно выполнить оптимизацию сечения стального элемента из условия эффективного соотношения критерия безопасности и металлоемкости конструкции.

Надежность, вероятностное проектирование, стальная балка, вероятность отказа, изгиб, предельное состояние, неопределенность.

Надежность строительных конструкций является ключевым показателем при проектировании, строительстве и эксплуатации зданий и сооружений. Согласно текущей концепции проектирования строительных конструкций надежность строительного объекта считается обеспеченной, если выполняются требования (критерии) для всех учитываемых предельных состояний при действии наиболее неблагоприятных сочетаний расчетных нагрузок в течение расчетного срока службы. Количественный показатель надежности в нормах на текущий момент не присутствует.

В рамках теории надежности строительных конструкций как фундаментальной науки [1, 2] предлагается измерять надежность в виде вероятности отказа  $P_f$  или индекса надежности  $\beta$ . Вычисление этих показателей требует использования полных вероятностных расчетов в проектировании строительных конструкций [3–6].

Рассмотрим стальную балку с поперечным сечением в виде двутавра, обозначения размеров которого приведены на рисунке 1. Момент сопротивления сечения балки относительно оси  $x$  можно вычислить по формуле:

$$W_x \approx \frac{2}{h} \cdot \left( \frac{b \cdot h^3}{12} - 2 \cdot \left[ \frac{b_w \cdot h_w^3}{12} \right] \right), \quad (1)$$

где обозначения геометрических параметров приведены на рисунке 1.

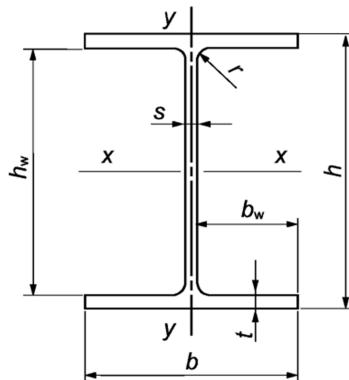


Рис. 1. Обозначения размеров поперечного сечения двутавра в соответствии с ГОСТ Р 57837-2017 «Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок»

Пусть балка является однопролетной и имеет шарнирно-подвижную и шарнирно неподвижную опоры и загружена равномерно-распределенной нагрузкой  $q$  по всему пролету. Тогда условие обеспечения прочности балки по критерию прочности нормальных сечений можно представить в виде:

$$\tilde{q} < \tilde{\sigma}_{s,ult} \cdot \frac{16}{\tilde{h} \cdot l^2} \cdot \left( \frac{\tilde{b} \cdot \tilde{h}^3}{12} - 2 \cdot \left[ \frac{\tilde{b}_w \cdot \tilde{h}_w^3}{12} \right] \right), \quad (2)$$

где  $\tilde{\sigma}_{s,ult}$  – предельное напряжение, соответствующее пределу текучести стали (волнистой линией обозначается случайная величина);

$l$  – пролет балки (детерминированная, постоянная величина).

Примем за основу расчета двутавр 20Б1 пролетом 4 м со случайными параметрами по таблице.

По результатам генерации 100 000 значений по указанным в таблице параметрам можно получить функцию распределения для момента сопротивления рассматриваемого сечения (рис. 2). В запас надежности рассматривается статистическая независимость параметров при вычислении момента сопротивления.

Для предела текучести стали принято нормальное распределение с коэффициентом вариации 5 %. В ис-

следовании Г. Шпете [7] отмечается, что коэффициент вариации зависит от типа стальной продукции:

один и тот же стальной профиль с одного завода: 0,01–0,04;

различные профили с одного завода: 0,04–0,07;

одинаковые профили с разных заводов: 0,05–0,08;

различные профили с разных заводов: 0,06–0,12.

В нормативном документе Joint Committee on Structural Safety Probabilistic Model Code 2001 [8] предлагается использовать коэффициент вариации 0,07.

Таблица

### Статистические параметры величин в математической модели

| Параметр  | Распределение                           | Параметры  | Примечание   |
|---|---|--|--|
| Ширина двутавра $\tilde{b}$   | Равномерное                             | [97; 103] мм                                       | Допуск $\pm 3$ мм по ГОСТ Р 57837-2017                   |
| Высота двутавра $\tilde{h}$   | Равномерное                             | [197; 203] мм                                      | Допуск $\pm 3$ мм по ГОСТ Р 57837-2017                   |
| Высота ( $\chi$ ) $\tilde{h}_w$   | Равномерное                             | [181; 187] мм                                      | Допуск толщины полки $t \pm 1,5$ мм по ГОСТ Р 57837-2017 |
| Ширина ( $\chi$ ) $\tilde{b}_w$   | Равномерное                             | [46,9; 47,6] мм                                    | Допуск толщины полки $t \pm 0,7$ мм по ГОСТ Р 57837-2017 |
| Пролет $l$  | Постоянная (детерминированная) величина | 4000 мм  | -  |
| Предельное напряжение, соответствующее пределу текучести стали $\tilde{\sigma}_{s,ult}$ | Нормальное                              | $m_\sigma = 277,85$ МПа;<br>$S_\sigma = 13,89$ МПа | Сталь С255   |
| Равномерно-распределенная нагрузка $\tilde{q}$  | Нормальное                              | $m_q = 25$ кН/м;<br>$S_q = 4$ кН/м                 | -  |

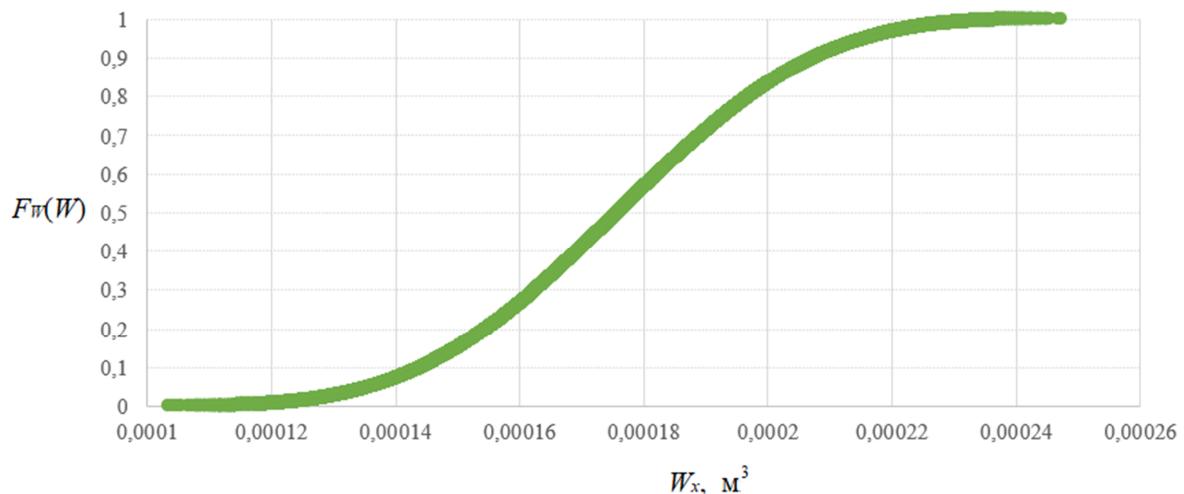


Рис. 2. Функция распределения вероятностей для момента инерции  $\tilde{W}_x$  как случайной величины по результатам генерации данных

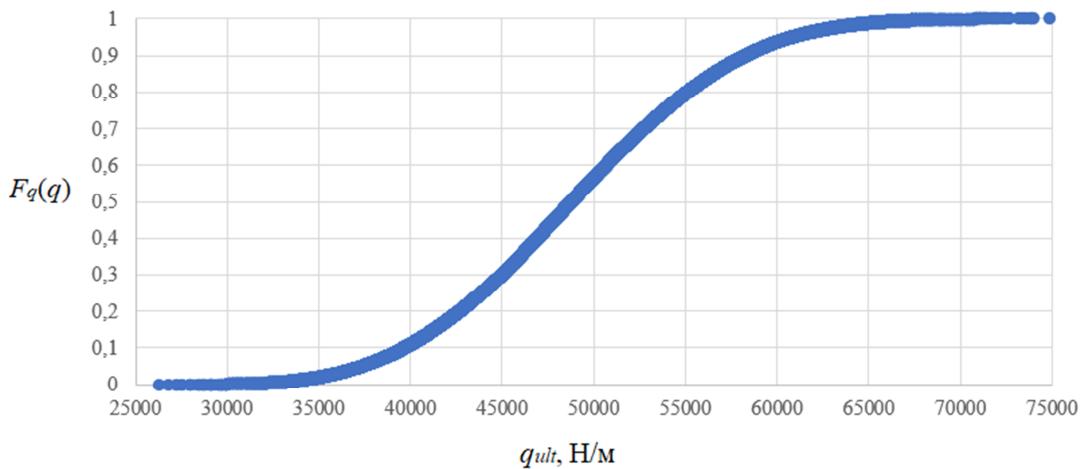


Рис. 3. Функция распределения вероятностей для момента инерции  $\tilde{W}_x$  как случайной величины по результатам генерации данных

Вероятность отказа  $P_f$  на основе классического метода Монте-Карло определяется как:

$$P_f \approx \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I[g(X_j) \leq 0], \quad (3)$$

где  $I[\cdot]$  – это функция индикатора, имеющая значение 1, если  $\{\cdot\}$  равно «истина», и значение 0, если  $\{\cdot\}$  равно «ложь»;  $N$  – число генераций случайных величин;  $X_j$  – вектор случайных величин функции предельного состояния  $g$ .

Генерация случайных величин по основным законам распределения вероятностей (нормальный, равномерный и т.д.) может быть выполнена, например, в программной среде MathCAD. Однако зачастую функция распределения вероятностей может отличаться от известных распределений или представлять собой модель частично непараметрического р-блока. Генерация базовыми подходами в таком случае становится невозможной. В этом случае можно использовать метод обратного преобразования Н.В. Смирнова: генерируются  $N$  значений равномерно распределенной случайной величины  $u_i$  в пределах от  $[0; 1]$ . Значения случайной величины в виде  $x_i$  получают методом обратного преобразования  $x_i = F^{-1}(u_i)$ .

Для рассматриваемого случая функция предельного состояния  $g$  примет вид:

$$g = \tilde{\sigma}_{s,ult} \cdot \frac{16}{\tilde{h} \cdot l^2} \cdot \left( \frac{\tilde{b} \cdot \tilde{h}^3}{12} - 2 \cdot \left[ \frac{\tilde{b}_w \cdot \tilde{h}_w^3}{12} \right] \right) - . \quad (4)$$

$-\tilde{q} < 0$

На рисунке 3 представлен график функции распределения предельной нагрузки  $q$  по условию (4).

Сгенерируем 100 000 значений эксплуатационной нагрузки  $\tilde{q}$  с параметрами по таблице. Из сравнения генераций по формуле (4) установлено, что в 398 случаях функция предельного состояния  $g$  приняла

отрицательные значения. Таким образом, вероятность отказа стальной балки можно оценить как:

$$P_f \approx \frac{398}{100000} = 0,00398 \text{ или } 3,98 \text{ %}.$$

Проанализируем изменение вероятности отказа при изменении допуском на различные параметры двутавра. Пусть допуск на высоту двутавра  $\tilde{h}$  составит  $\pm 2$  мм, при сохранении допуска толщины полки  $t \pm 1,5$  мм, а ширина  $\tilde{b}$  двутавра также будет иметь пониженный допуск  $\pm 2$  мм; тогда границы для генерации значений примут следующий вид:

$$\tilde{h} \in [198, 202] \text{ мм}, \tilde{b} \in [98, 102] \text{ мм}.$$

Повторная генерация случайных величин показывает превышение предельного состояния в 329 случаях из 100 000. Таким образом, вероятность отказа стальной балки можно оценить как:

$$P_f \approx \frac{329}{100000} = 0,00329 \text{ или } 3,29 \text{ %}.$$

При установке более строгих допусков с  $\pm 3$  мм до  $\pm 2$  мм получается определенный результат, выраженный в снижении вероятности отказа двутавра на 17 % или на 0,69 % в абсолютных показателях.

Таким образом, на основе предложенной методики к анализу вероятности отказа стальной балки при изгибе по критерию прочности нормальных сечений можно выполнить оптимизацию сечения стального элемента из условия эффективного соотношения критерия безопасности и металлоемкости конструкции. Использование дополнительных инструментов технико-экономической оптимизации [9, 10] позволит включить многопараметрическую оптимизацию элемента и выявить наиболее рациональное поперечное сечение с учетом всех групп предельных состояний, фактора риска и экономических характеристик.

## **Литература**

1. Соловьева, А. А. Вероятностные модели случайных величин в строительном проектировании / А. А. Соловьева, С. А. Соловьев. – Вологда : Вологодский государственный университет, 2024. – 144 с.
2. Zhang H., Dai H., Beer M., Wang W. Structural reliability analysis on the basis of small samples: An interval quasi-Monte Carlo method. Mechanical Systems and Signal Processing. 2013. Vol. 37. No. 1-2. Pp. 137–151.
3. Soloveva, A. A. Reliability Analysis of RHS Steel Trusses Joints Based on the P-Boxes Approach / A. A. Soloveva, S. A. Solovev // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2021. – Vol. 17. – No 1. – P. 87–97.
4. Соловьев, С. А. Вероятностная оценка промышленной безопасности при неполной статистической информации / С. А. Соловьев // Безопасность труда в промышленности. – 2020. – № 9. – С. 88–93.
5. Zhang, H. Structural analysis with probability-boxes / H. Zhang, R. L. Mullen, R. L. Muhanna // International Journal of Reliability and Safety. – 2012. – Vol. 6. – No. 1-3. – Pp. 110–129.
6. Соловьева, А. А. Вероятностный анализ надежности ферм статистическим генерированием данных / А. А. Соловьева, С. А. Соловьев // Строительная механика и расчет сооружений. – 2023. – № 5(310). – С. 2–11.
7. Шпете, Г. Надежность несущих строительных конструкций / Герхард Шпете ; перевод с немецкого О. О. Андреева. – Москва : Стройиздат, 1994. – 287 с.
8. Vrouwenvelder, T. Reliability Based Code Calibration—The Use of the JSCC Probabilistic Model Code. Joint Committee of Structural Safety / T. Vrouwenvelder // Workshop on Code Calibration. – 2003. – Vol. 21. – P. 1–22.
9. Holicky, M. Optimisation of the target reliability for temporary structures / M. Holicky // Civil Engineering and Environmental Systems. – 2013. – Vol. 30, No. 2. – P. 87–96.
10. Соловьев, С. А. Неклассические методы анализа надежности строительных конструкций / С. А. Соловьев. – Вологда : Вологодский государственный университет, 2022. – 135 с.

*O.E. Kopeykin, L.S. Shevtsov*

*Vologda State University*

## **STUDY OF FAILURE PROBABILITY FOR FLEXURAL STEEL BEAM ACCORDING TO THE NORMAL SECTIONS STRENGTH CRITERION**

The article presents an approach to estimation of the failure probability of a flexural steel rod according to the criterion of normal sections strength. Based on the proposed approach, it is possible to select the cross-section of a structural element (girder, beam, etc.) for a target level of reliability. The Monte Carlo Simulation is used as a method for estimating the failure probability, the numerical implementation of which can be performed on the basis of simple programs. Unlike the limit state design method, it is possible to optimize the section of a steel element based on the developed algorithms from the condition of an effective ratio of the safety criterion and the metal content of the structure.

Reliability, probabilistic design, steel beam, probability of failure, bending, limit condition, uncertainty.



*A.A. Соловьева<sup>1</sup>,  
B.A. Смирнов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Вологодский государственный университет,*  
<sup>2</sup>*НИУ Московский государственный строительный университет*

## **МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ БАЗИСНОЙ ПЕРЕМЕННОЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРИМЕРЕ СНЕГОВОЙ НАГРУЗКИ ПРИ ВЕРОЯТНОСТНОМ АНАЛИЗЕ НАДЕЖНОСТИ СООРУЖЕНИЙ**

В статье представлен алгоритм формирования базисной переменной воздействия на примере снеговой нагрузки в задачах вероятностного анализа надежности. Путем статистического анализа веса снегового покрова по различным метеостанциям РФ предложены варианты формирования стохастической модели снеговой нагрузки на покрытие. Выполнен сравнительный анализ расчетного и нормативного значения снеговой нагрузки по данным карты районирования на основе СП и данным метеостанций. Представленный подход может быть использован при анализе и подборе вероятностной модели нагрузки в задачах расчета надежности строительных конструкций.

Надежность, вероятностное проектирование, снеговая нагрузка, модель воздействия, распределение Гумбеля, предельное состояние, неопределенность.

Для применения вероятностных методов расчета требуется формирование моделей базисных переменных. Обычно выделяют две группы базисных переменных: первые определяют модели воздействия (например, нагрузку), вторые – модели сопротивления (например, несущую способность).

Модель воздействия определяется нагрузками и воздействиями на строительную конструкцию. 14–18 % аварий и обрушений в ряде основных причин имеют превышение кратковременной нагрузки [1], которая в Вологодской области, как правило, определяется снеговой. Рассмотрение статистической информации по снеговой нагрузке способствует предварительному составлению вероятностной (стохастической) модели данной нагрузки.

Основными показателями снеговой нагрузки, влияющими на безопасность строительных конструкций, являются высота снежного покрова, количество воды в снеге, плотность снежного покрова.

Первые неинструментальные ежедневные записи за погодой велись примерно с 1650 г., инструментальные – с 1695 г. Регулярные инструментальные метеорологические наблюдения начали производить примерно с 1724 г., результаты которых, к сожалению, не сохранились. В 1834 г. зарождается регулярная геофизическая сеть в России [2], а уже в 1872 г. началось создание полноценной сети метеорологических станций [3]. К концу XIX века метеорологическая сеть в России насчитывала 839 станций, 1020 дождемерных и 1830 снегомерных постов, которые проводили первые снегосъемки с 1924 г., а регулярность приобрели к 1935 г. К концу 1970 г. число стан-

ций превысило 6000, а максимального развития сеть достигла к 1986 г. – 2308 станций и 3274 поста [2].

В настоящее время насчитывается около 5736 пунктов. Из общего числа пунктов 1628 (в 2021 г.) и 1660 (в 2023 г.) производят снегосъемки, которые включают в себя высоту снежного покрова на различных участках [2].

Данные о запасах воды в снежном покрове ведут с 1976 года, начиная с 6-ти стоковых площадок и на водосборах [2].

Статистические данные за период 1976–2022 гг. по показателям продолжительности залегания снегового покрова, значений максимальной высоты имеют тенденции к изменению своих средних значений как в большую, так и в меньшую стороны в зависимости от района [4] (рис. 1). Также по данным [4] в среднем по России наблюдается тенденция к увеличению запаса воды в снеге примерно на 2,71 мм за 10 л, что достаточно сильно может изменить средний показатель нагрузки от снежного покрова.

Графически оценим изменчивость параметров снегового покрова на примере Вологодской области.

По данным архива погоды [5] определена изменчивость высоты снежного покрова (по средним и максимальным значениям).

По данным [6] количество воды в снежном покрове бассейна Северной Двины и Рыбинского водохранилища распределяется согласно рисунку 2.

По данным [4] определяются отклонения от объявленного среднего за период в 30 лет параметров:

- максимальной за год высоты снежного покрова (рис. 3);
- запаса воды в снежном покрове (рис. 4).

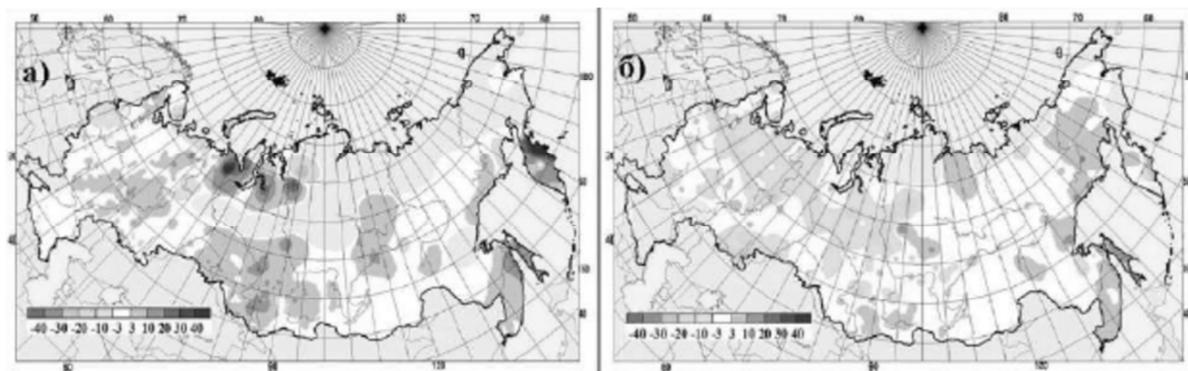


Рис. 1. Изменение запаса воды в снежном покрове за зиму 2022–2023 гг. [4]

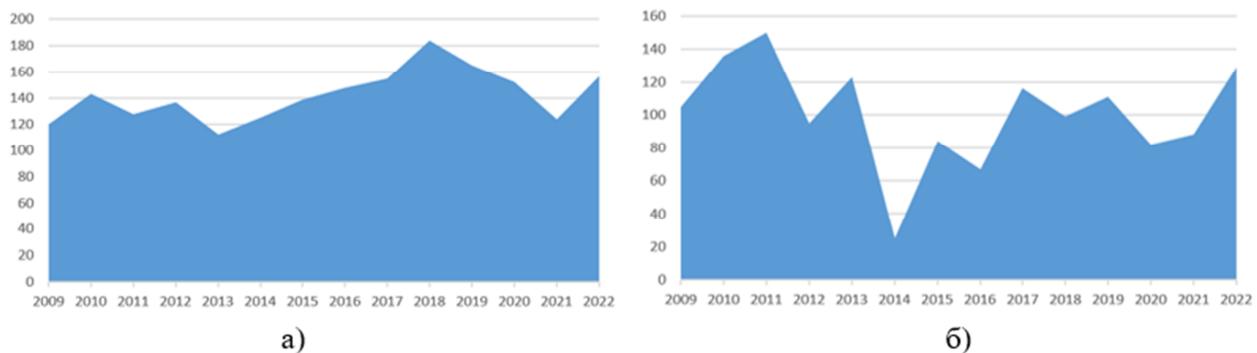


Рис. 2. Количество воды в снежном покрове бассейна Северной Двины (а) и Рыбинского водохранилища (б), мм [6]

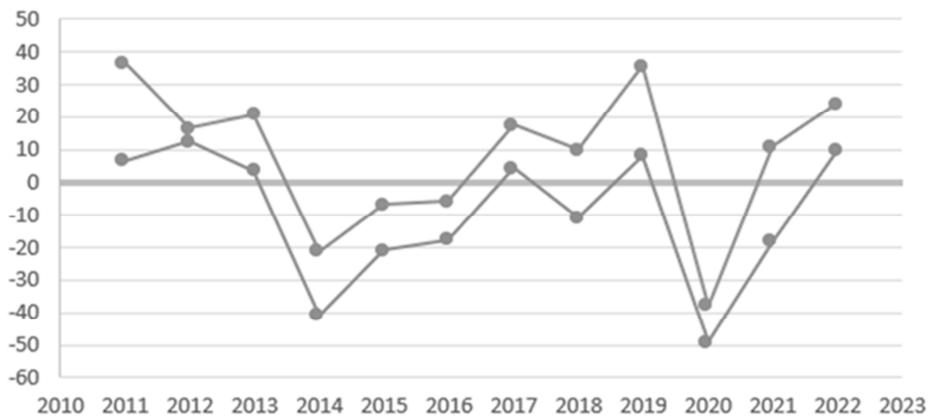


Рис. 3. Отклонение максимальной за год высоты снежного покрова от среднего значения на период с 2011–2013 от среднего значения периода 1961–1991, с 2014–2021 от среднего значения периода 1971–2000, 2022 от среднего значения периода 1991–2020 (нижний график – поле, верхний график – лет)

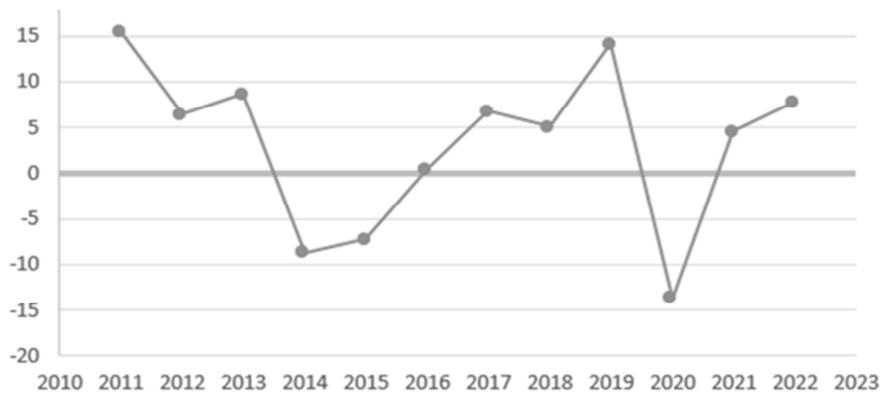


Рис. 4. Отклонение запаса воды в снежном покрове от среднего значения на период с 2011–2021 от среднего значения периода 1971–2000, 2022 от среднего значения периода 1991–2020

Можно отметить большой разброс параметров, влияющих на значение среднего снеговой нагрузки. Также довольно широкий диапазон отклонений проявляется в частных случаях (годах) даже в короткие (рассматриваемый участок на рисунках 4, 5 – 12 лет) промежутках. Использование средних значений параметров без учета данных отклонений негативно сказывается на несущей способности зданий и сооружений, что может привести как к авариям и отказам строительных конструкций, так и к необоснованному запасу.

В связи с небольшой продолжительностью наблюдения за параметрами снежного покрова и их малого объема, а также сильной изменчивостью представление снеговой нагрузки в качестве случайной величины является актуальной темой исследований [7, 8]. Попытка учета пиковых значений параметров встречается в исследованиях [9, 10].

В ряде исследований [7–10] отмечается, что наиболее подходящим для вероятностного моделирования снеговой нагрузки является закон распределения Гумбеля (или двойной экспоненциальный закон) с аналитическим видом:

$$F_s(s) = \exp\left[-\exp\left(\frac{\alpha-s}{\beta}\right)\right], \quad (1)$$

где  $\alpha$  – параметр центра;  $\beta$  – параметр сдвига.

Параметры закона распределения Гумбеля могут быть вычислены по статистической выборке следующим образом:

$$\begin{aligned} \beta &= (0,78 + 1,54 \cdot N^{-0,75}) \cdot \sigma_s, \\ \alpha &= m_s - [0,45 + 0,34 \cdot N^{-0,69}] \cdot \sigma_s, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $N$  – количество значений в выборке,  $m_s$  – математическое ожидание случайной величины,  $\sigma_s$  – среднеквадратическое отклонение случайной величины.

В связи с этим в статье предлагается рассмотреть изменчивость веса снежного покрова, найденного по различным подходам, и сходимость полученных значений с нормативными и расчетными.

Вес снегового покрова можно найти как произведение плотности снега на его высоту. Высоту снега по разным метеостанциям, относящихся к одному снеговому району, определяем согласно данным [5], плотность согласно ГОСТ 53613-2009 «Воздействие природных внешних условий на технические изделия. Общая характеристика. Осадки и ветер» п. 5.3 – «плотность свежевыпавшего снега изменяется в пределах от 70 до 150 кг/м<sup>3</sup>, а плотность слежавшегося снега изменяется в пределах от 200 до 400 кг/м<sup>3</sup>».

По данным различных метеостанций, расположенных в Вологодской области, определим значение снеговой нагрузки с обеспеченностью 0,98 для каждого населенного пункта за рассматриваемый период в 19 лет. Вес снегового покрова определяется также по запасу воды снежном покрове по [6] для всех населенных пунктов, относящихся к одному бассейну (в

связи с недостатком данных метеостанций о запасе воды в снежном покрове).

Сравнивать полученные значения будем с нормативными и расчетными параметрами, определенными по СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия».

Полученные результаты представлены графически на рисунке 6.

Снеговая нагрузка – случайная величина с большим коэффициентом вариации [9]. Рассмотрение данного параметра в детерминистической постановке вводит большую неопределенность в математическую модель предельного состояния, что может привести к крайним ситуациям: авариям и отказам или необоснованным запасам строительных конструкций.

Представление базисных переменных математических моделей предельных состояний дает возможность применения вероятностных методов как современного шага в развитии расчета и проектирования строительных конструкций для оценки уровня надежности объекта в различные периоды его эксплуатации. Представленный подход может быть использован при анализе и подборе вероятностной модели нагрузки в задачах расчета надежности строительных конструкций [11–13] и при анализе промышленной безопасности [14]. Для северных регионов РФ снеговая нагрузка зачастую является главным фактором, определяющим надежность покрытия [15, 16], что делает вопрос построения достоверной модели веса снегового покрова и его распределения по сооружению актуальным при обеспечении необходимого уровня безопасности.

## Литература

1. Еремин, К. И. Систематизация научных исследований в области комплексной безопасности объектов строительства / К.И. Еремин // Материалы круглого стола «Комплексная безопасность в строительстве» [Электронный ресурс]. – Москва. – Режим доступа: [https://profi.erzrf.ru/upload/iblock/97d/Eremin-K.I.\\_-Sistematisatsiya-nauchnykh-issledovanii\\_-v-oblasti-kompleksnoi\\_-bezopasnosti-v-stroitelstve.pdf](https://profi.erzrf.ru/upload/iblock/97d/Eremin-K.I._-Sistematisatsiya-nauchnykh-issledovanii_-v-oblasti-kompleksnoi_-bezopasnosti-v-stroitelstve.pdf).
2. Очерки по истории гидрометеорологической службы России. Том 1 – СПб.: Гидрометеоиздат, 1997. – 343 с.
3. Климат. Сеть метеостанций [Электронный ресурс]. – Национальный Атлас России. – Режим доступа: <https://nationalatlas.ru/tom2/151.html>.
4. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации – Москва : Росгидромет, 2023. – 109 с.
5. Архив погоды в Вологде (аэропорт) [Электронный ресурс]. – Вологда. – Режим доступа: [https://tr5.ru/Arxiv\\_pogody\\_v\\_Vologde\\_%28aeroport%29?ysclid=lqf6car1qw843778095](https://tr5.ru/Arxiv_pogody_v_Vologde_%28aeroport%29?ysclid=lqf6car1qw843778095).
6. Сведения о запасах воды в снежном покрове по бассейнам крупных рек и водохранилищ России [Электронный ресурс]. – Росгидромет, 2020. – 1 с. – Режим доступа: <https://www.meteorf.gov.ru/special/press/news/20708/?ysclid=ls8yk34ico883685186>.
7. Qiang S. Research on reliability of steel roof structures subjected to snow loads at representative sites in

- China / S. Qiang, X. Zhou, M. Gu // Cold Regions Science and Technology. – 2018. – Vol. 150. – Pp. 62-69.
8. Wolinski S. Evaluation of load values using the Gumbel model / S. Wolinski, T. Pytlowany // Archives of Civil Engineering. – 2012. – Vol. 58. – Issue 2. – Pp. 199–208.
9. Золина, Т. В. Моделирование снеговой нагрузки на покрытие промышленного здания / Т. В. Золина, П. Н. Садчиков // Вестник МГСУ. – 2016. – № 8. – С. 25–33.
10. Мкртычев, О. В. Теория надежности в проектировании строительных конструкций: монография / О. В. Мкртычев, В. Д. Райзер. – Москва : Изд-во АСВ, 2016. – 906 с.
11. Шевцов, Л. С. Вероятностный подход в проектировании изгибаемых элементов из армированного арболита / Л. С. Шевцов, А. А. Соловьев, С. А. Соловьев // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2023. – № 2(20). – С. 15–17.
12. Соловьев, С. А. Неклассические методы анализа надежности строительных конструкций /
- С. А. Соловьев. – Вологда : Вологодский государственный университет, 2022. – 135 с.
13. Соловьева, А. А. Вероятностные модели случайных величин в строительном проектировании / А. А. Соловьева, С. А. Соловьев. – Вологда : Вологодский государственный университет, 2024. – 144 с.
14. Соловьев, С. А. Вероятностная оценка промышленной безопасности при неполной статистической информации / С. А. Соловьев // Безопасность труда в промышленности. – 2020. – № 9. – С. 88–93.
15. Соловьева, А. А. Расчет надежности элементов стальных ферм по критерию устойчивости с использованием р-блоков / А. А. Соловьева, С. А. Соловьев // Строительная механика и расчет сооружений. – 2021. – № 1(294). – С. 45–53.
- Соловьев, С. А. Моделирование случайной статической нагрузки на покрытия сооружений при неполной статистической информации / С. А. Соловьев // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2020. – Т. 16, № 4. – С. 243–249.

*A.A. Solovyova<sup>1</sup>, V.A. Smirnov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Vologda State University,*

<sup>2</sup>*Moscow State University of Civil Engineering*

## **METHODOLOGY OF BASIC IMPACT VARIABLE FORMATION ON THE EXAMPLE OF SNOW LOAD WHEN CONDUCTING STRUCTURES RELIABILITY PROBABILISTIC ANALYSIS**

The article presents an algorithm for the formation of a basic impact variable using the example of snow load in the tasks of probabilistic reliability analysis. By statistical analysis of the weight of snow cover at various weather stations of the Russian Federation, options for the formation of a stochastic model of snow load on the coating are proposed. A comparative analysis of the design and normative values of snow load was performed according to the zoning map data based on a Set of Rules and data from weather stations. The presented approach can be used in the analysis and selection of a probabilistic load model in the tasks of reliability analysis of buildings and structures.

Reliability, probabilistic design, snow load, impact model, Gumbel distribution, limit state, uncertainty.

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

## *Системный анализ, управление и обработка информации*

УДК 004.8



**Г.А. Горшков, В.М. Замиев, Т.В. Яцун**  
Вологодский государственный университет

### **ИМИТАЦИЯ ГОЛОСА СРЕДСТВАМИ ТЕХНОЛОГИИ ГОЛОСОВОЙ КОНВЕРСИИ RVC v2**

В статье предлагаются результаты анализа современных средств голосовых конверсий с помощью нейросетей, описание проблем применения данных технологий и результаты исследования одного из способов имитации голосов на основе RVC v2. Предлагаются результаты оценивания временных и вычислительных затрат процесса имитации голоса средствами непрофессиональной вычислительной техники. Результаты эксперимента подтверждают предположение о широких возможностях современных нейросетей для имитации чужого голоса и поднимают ряд соответствующих этических и правовых проблем.

Нейронные сети, искусственный интеллект, голосовая конверсия, нейронная голосовая модель, преобразование голоса на основе поиска, этические и правовые проблемы.

В последние годы методы и технологии синтеза и клонирования голосов значительно развились. Существуют разнообразные подходы решения данной проблемы [1], одним из которых являются нейронные технологии. Так, например, в 2023 году проведен ряд исследований, направленных на усовершенствование методов синтеза вокала и речи, которые предлагают инновационные подходы к решению существующих проблем.

Одним из ключевых направлений является улучшение синтеза вокала. Например, в [2] представлена модель GLOttal-flow LPC Filter (GOLF), которая использует физические характеристики человеческого голоса для синтеза, что позволяет значительно улучшить качество результата. Модель CoMoSpeech [3], представленная Гонконгским университетом науки и технологий и Гонконгским институтом науки и инноваций, использует методы консистентного моделирования для синтеза речи и вокала, обеспечивая высокое качество звука при минимальном времени обработки.

Результаты исследований в данной области являются ошеломительными. Действительно, на сегодняшний день любой человек, имеющий достаточно мощный персональный компьютер и данные голоса другого человека, может с легкостью создать нейронную голосовую модель (NVM). NVM (Neural Voice Model) может быть создана с использованием современных достижений в области нейронных сетей на основе элементарных образцов исходного материала – нескольких минут вокала или речи человека. Примеры применения и исследования в данной области демонстрируют успешные результаты.

Одной из технологий, проявивших незаурядные результаты в исследуемой области, является преобразование голоса на основе поиска (RVC). Технология RVC (Retrieval-Based Voice Conversion) в отличие от традиционных методов применяет передовые алго-

ритмы для клонирования голосов с замечательной точностью [4].

RVC v2 – инновационная технология голосовой конверсии на основе искусственного интеллекта, эволюция оригинальной модели RVC. Она улучшена за счет усовершенствованных алгоритмов, что обеспечивает большую точность и качество клонирования голосов. RVC v2 позволяет переносить чужой голос на собственное исполнение, создавать дуэты с любыми артистами, экспериментировать с вокалом, меняя тембр и стиль [5]. На сегодняшний день RVC v2 применяют для создания каверов на песни, используя голоса популярных исполнителей, а также для изменения голоса в реальном времени.

Несмотря на значительные достижения в области RVC, остается ряд проблем и вызовов, которые необходимо решить для широкого применения и дальнейшего развития этих технологий:

- возможность клонирования голосов вызывает серьезные этические и правовые вопросы;
- текущие модели RVC могут создавать неестественные или искаженные результаты – эта проблема в ближайшем будущем может быть успешно устранена;
- модели RVC часто испытывают сложности при работе с различными акцентами и интонациями – улучшение адаптивности алгоритмов к различным языковым и культурным особенностям остается важной задачей для исследователей.

В ходе исследования была поставлена задача определить, какие трудовые и временные затраты необходимы для имитации голоса средствами нейросети RVC v2 с использованием вычислительных мощностей домашнего персонального компьютера. В качестве испытуемого выступил один из студентов-исследователей Владимир. В проведенном исследовании можно выделить несколько этапов.

Этап 1. Подготовка большого количества аудио-•  
материала для нейросети.

Этап 2. Загрузка и установка программы RVC v2 [6].•

Этап 3. Обучение нейросети (рис. 2).

Обучение производилось на основе небольшой  
инструкции и содержало следующие шаги:

- установка названия проекта;
- определение числа процессов ЦП, используе-  
мых для «вытаскивания» тональностей и обработки•  
данных, например: если имеется 8 ядер и 16 потоков,  
то можно указать значение близкое к 16 (рис. 1);

выбор папки с аудиофайлами человека, голос которого будет имитировать нейросеть (рис. 2);  
проработка данных в течение некоторого времени;  
• выбор нужного алгоритма обучения – «вытаскивание  
черт» (рис. 2);  
• тренировка нейросети – тренировка модели и индекса  
черт с указанием нужных настроек (частота сохране-  
ния, полное количество эпох) (рис. 3);  
просмотр и анализ статистики процесса тренировки  
модели с учетом данных по каждой эпохе (рис. 4).

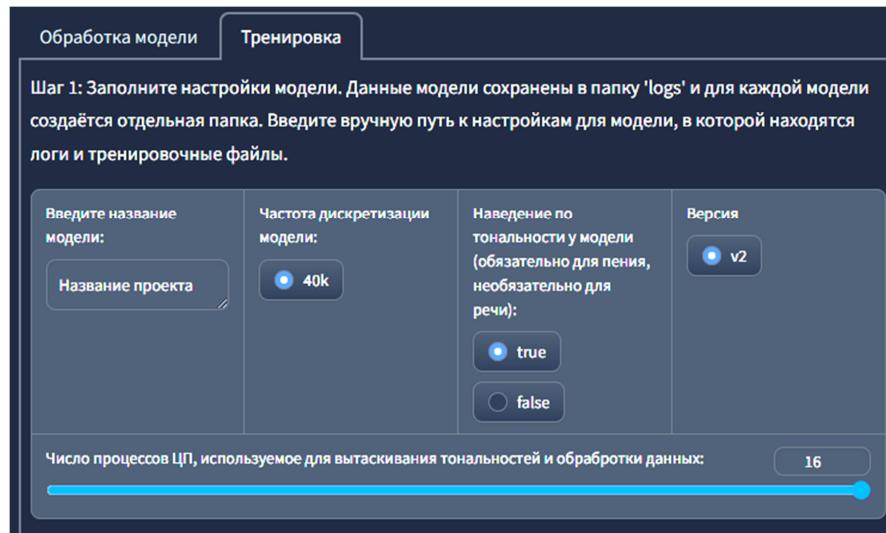
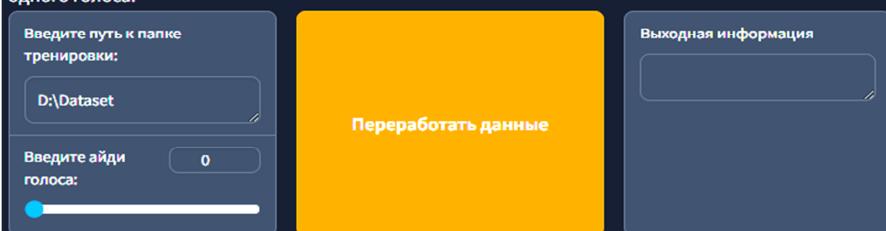


Рис. 1. Определение числа процессов ЦП

Шаг 2а: Автоматически пройтись по всем аудиофайлам в папке тренировки и нормализовать  
куски. Создаст 2 папки wav в папке модели. В данный момент поддерживается тренировка только  
одного голоса.



Шаг 2б: Вытащить тональности с помощью процессора (если в модели есть тональности), вытащить  
черты с помощью видеокарты (выберите какой):



Рис. 2. Выбор папки с аудиофайлами и выбор алгоритма обучения

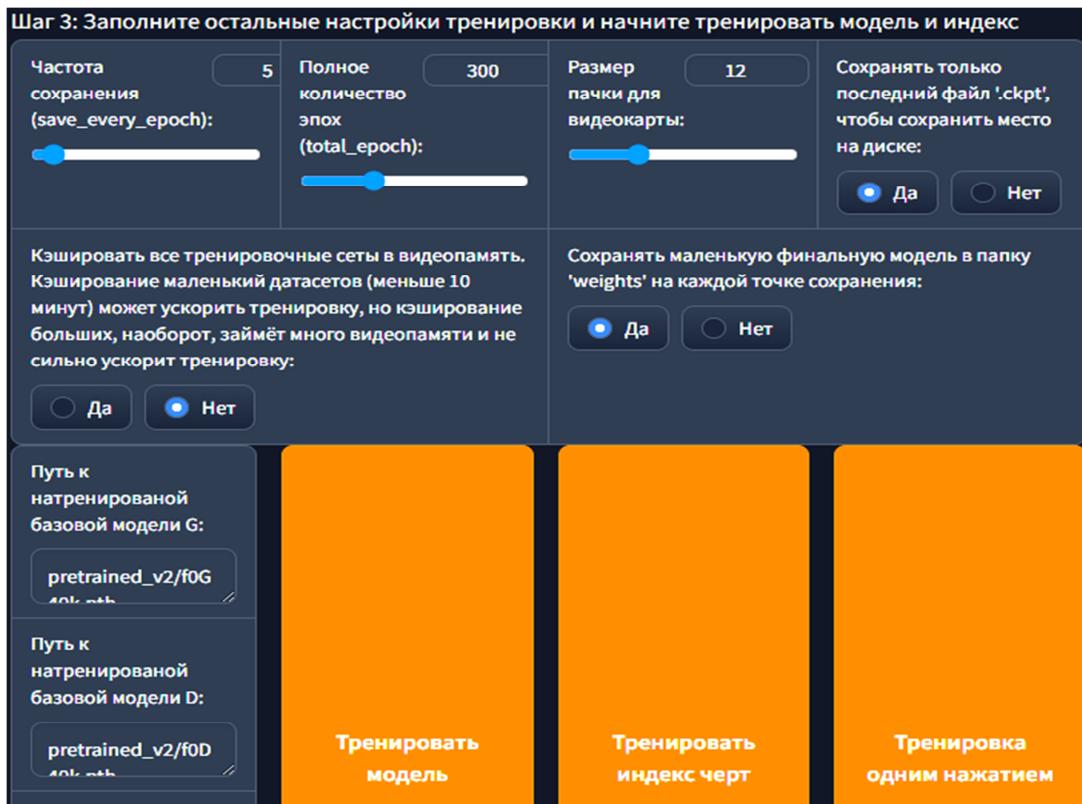


Рис. 3. Тренировка нейросети в программе RVC v2

```
F0:StarostaVovan:Saving model and optimizer state at epoch 10 to ./logs\StarostaVovan\G_2333333.pth
F0:StarostaVovan:Saving model and optimizer state at epoch 10 to ./logs\StarostaVovan\D_2333333.pth
F0:StarostaVovan:saving ckpt StarostaVovan_e10:Success.
F0:StarostaVovan:====> Epoch: 10 [2024-05-17 16:06:26] | (0:01:29.370525)
F0:StarostaVovan:====> Epoch: 11 [2024-05-17 16:07:51] | (0:01:24.432717)
F0:StarostaVovan:Train Epoch: 12 [49%]
F0:StarostaVovan:[1000, 9.98501030820433e-05]
F0:StarostaVovan:loss_disc=4.031, loss_gen=3.201, loss_fm=8.646, loss_mel=19.939, loss_kl=1.856
F0:StarostaVovan:====> Epoch: 12 [2024-05-17 16:09:15] | (0:01:23.980102)
```

Рис. 4. Информация о процессе тренировки нейросети

| Model Slot Configuration  |  |   |
|---|--|---|
|  | Info: 10, 40000, 256, pyTorchRVC, 0, 0, 0.5<br>[14]<br>model: StarostaVovan_e300_s26100<br>index: added_IVF3111_Flat_n...<br>info: f0, 40000, 768, pyTorchRVCv2, 0, 0, 0.5 | <input type="button" value="Edit"/><br><input type="button" value="upload"/><br><input type="button" value="DL sample"/><br><input type="button" value="edit"/> |
| [15]  | blank  | <input type="button" value="upload"/><br><input type="button" value="DL sample"/><br><input type="button" value="edit"/>  |
| [16]  | blank  | <input type="button" value="upload"/><br><input type="button" value="DL sample"/><br><input type="button" value="edit"/>  |
|   | blank  |   |

Рис. 5. Результаты обучения нейросети

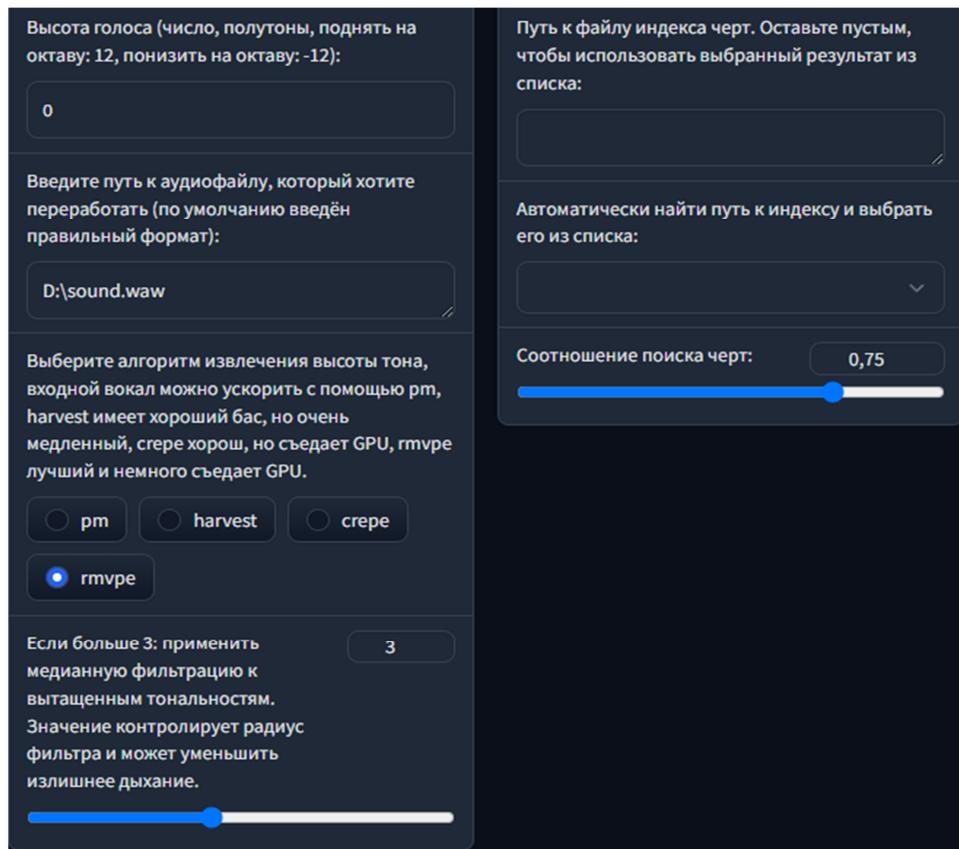


Рис. 6. Установка настроек для обработки вокала на основе полученной модели

Этап 4. Оценка временных и производственных затрат.

Нейросеть прошла 300 эпох. На 1 эпоху пришлось примерно 1,5 минуты. В результате была получена модель голоса Владимира и его индекс. Было потрачено примерно 8 часов, без учета времени на знакомство с программой и подбор нужных настроек.

Нагрузка на вычислительные устройства была не очень значительна:

- загрузка центрального процессора (AMD Ryzen 5700G) – 50 %;
- нагрузка на видеокарту (Nvidia GeForce RTX3060) – 70 %.

Параллельно с обучением нейросети была возможность выполнять низкозатратные процессы. Тренировка нейросети не мешала выполнению рутинных работ: просмотр фильмов, работа с приложениями MS Office, например MS Word или MS PowerPoint, прослушивание музыки и т.д. Вместе с тем использование других программ приводило к перезапуску системы.

Этап 5. Анализ результатов обучения нейросети.

Полученная обученная модель и индекс предоставили возможность говорить голосом Владимира в программе Voice Changer [7] (рис. 5). То есть первоначальный результат был достигнут – создана возможность что-то сказать или отправить голосовое сообщение симитированным голосом.

Улучшение имеющихся результатов возможно путем проведения дополнительных эпох обучения нейросети.

Этап 6. Применение обученной нейросети.

Следующим этапом исследования являлось применение нейросети для имитации вокала Владимира в известном музыкальном хите:

- с помощью программы Ultimate Vocal Remover [8] выполнено разделение инструментальной и вокальной составляющих песни;
- обработан вокал в программе RVC v2 на основе полученных модели и индекса с применением различных настроек – конвертирование было проведено неоднократно с разными настройками для достижения оптимального результата (рис. 6);
- загрузка обработанного вокала;
- сведение вокала с инструментальной частью песни с использованием соответствующего программного сервиса [9] и получение кавер-версии от нейросети.

Ознакомиться с полученными результатами имитации голоса можно по ссылке: [https://drive.google.com/drive/folders/1zbeHVE\\_4oz8RylAMlV5D4O9NbIW8A9hM?usp=sharing](https://drive.google.com/drive/folders/1zbeHVE_4oz8RylAMlV5D4O9NbIW8A9hM?usp=sharing).

Этап 7. Подведение итогов.

По результатам исследования было определено, что для использования чужого голоса не требуется чрезвычайно много ресурсов и времени. Действительно, менее чем за 24 часа при наличии исходного материала (Dataset), можно с помощью нейросети симитировать голос любого человека.

С уверенностью можно сказать, что развитие технологий RVC открывает широкие возможности

для применения нейросетей в области преобразования голоса, предоставляя инновационные инструменты для создания реалистичных и точных голосовых моделей, которые можно применять во многих сферах.

Однако для полноценной реализации потенциала таких технологий необходимо решить ряд значительных этических, технических и правовых проблем. Действительно, описанная технология может использоваться мошенниками для создания преступных схем, в которых голос может быть скопирован и использован в корыстных целях, например для имитации речи популярной личности и обмана людей, которые ей доверяют. Следовательно, необходима разработка четких законодательных норм и правил для регулирования использования нейронных голосовых моделей. При этом технически сложной задачей является сохранение и распознание естественности и уникальности оригинального голоса.

Дальнейшее совершенствование алгоритмов и более детальное изучение различных аспектов RVC позволит минимизировать риски и максимально использовать возможности данной технологии. Разработчики и исследователи должны продолжать сотрудничество в направлении создания более эффективных и безопасных решений, обеспечивая надлежащую защиту данных и этическое использование нейронных голосовых моделей.

### **Литература**

1. Меркулов, П. Д. Аналитическое сравнение методов синтеза звука / П. Д. Меркулов // Молодой учёный. – 2022. – № 16 (411). – С. 31–34. – URL: <https://moluch.ru/archive/411/90535/> (дата обращения: 27.05.2024). – Текст : электронный.

2. Yu, C., Fazekas, G. Singing Voice Synthesis Using Differentiable LPC and Glottal-Flow-Inspired Wavetables / Chin-Yun Yu, & György Fazekas // Proceedings of the 24th International Society for Music Information Retrieval Conference. – 2023 – pp. 667–675. – URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10265377/> (дата обращения: 27.05.2024). – Текст : электронный.

3. Ye, Z., Xue, W., Tan, X., Chen, J., Liu, Q., & Guo, Y. (2023). CoMoSpeech: One-Step Speech and Singing Voice Synthesis via Consistency Model / Z. Ye, W. Xue, X. Tan, J. Chen, Q. Liu, Y. Guo // In MM 2023 – Proceedings of the 31st ACM International Conference on Multimedia (1st ed.). – 2023. – pp. 1831–1839. – URL: <https://doi.org/10.1145/3581783.3612061> (дата обращения: 27.05.2024). – Текст : электронный.

4. Speechify Academy : официальный сайт – URL: <https://studio.speechify.com/dashboard> (дата обращения: 27.05.2024).

5. Данилов, Я. Революция в мире музыки с RVC v2 (Нейросеть) / Ярослав Данилов. – URL: <https://tenchat.ru/media/1502557-revolutsiya-v-mire-muzyki-s-rvc-v2-neyroset> (дата обращения: 27.05.2024). – Текст : электронный.

6. Hugging Face : официальный сайт – URL: <https://huggingface.co/RVC-RU/RVC-Nyamura-RU> (дата обращения: 27.05.2024).

7. Программа Voice Changer – URL: [https://github.com/w-okada/voice-changer/blob/master/README\\_en.md](https://github.com/w-okada/voice-changer/blob/master/README_en.md) (дата обращения: 27.05.2024).

8. Ultimate Vocal Remover : официальный сайт - <https://ultimatevocalremover.com/> (дата обращения: 19.03.2024).

9. Create more content in less time – URL: <https://www.kapwing.com/> (дата обращения: 19.03.2024).

*G.A. Gorshkov, V.M. Zamshev, T.V. Yashchun  
Vologda State University*

### **VOICE IMITATION USING RVC V2 VOICE CONVERSION TECHNOLOGY**

The article offers the results of the analysis of modern voice conversion tools using neural networks, a description of the problems of using these technologies, and the results of a study of one of the methods for simulating voices based on RVC v2. The results of estimating the time and computational costs of the voice imitation process using non-professional computer technology are presented. The results of the experiment confirm the assumption and the wide possibilities of modern neural networks for simulating someone else's voice and raise a number of relevant ethical and legal problems.

Neural networks, artificial intelligence, voice conversion, AI voices, retrieval-based voice conversion, ethical and legal issues.



*A.A. Краснов, Д.В. Кочкин*  
Вологодский государственный университет

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ТЕСТОВ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ

В статье представлены результаты исследования по выбору методов тестирования, применимых при создании системы тестов веб-приложения. Определены методы тестирования веб-приложения. Проведен анализ применимости методов и их порядок выполнения.

Методы тестирования, тестирование веб-приложения, инструменты тестирования.

В настоящее время для большинства современных организаций спрос на разработку веб-приложений стремительно растет. Это связано как с автоматизацией бизнес-процессов организации, так и с текущей политикой внедрения цифровой трансформации [1].

Разработанное веб-приложение должно соответствовать всем техническим и функциональным требованиям, быть удобным в использовании, соответствовать современным техническим стандартам и безошибочно выполнять требуемую бизнес-логику. Зачастую мы можем столкнуться с некачественно реализованным веб-приложением по причинам отсутствия этапа тестирования в жизненном цикле разработки программного обеспечения (ПО), несистематизированном процессе тестирования [2, 4].

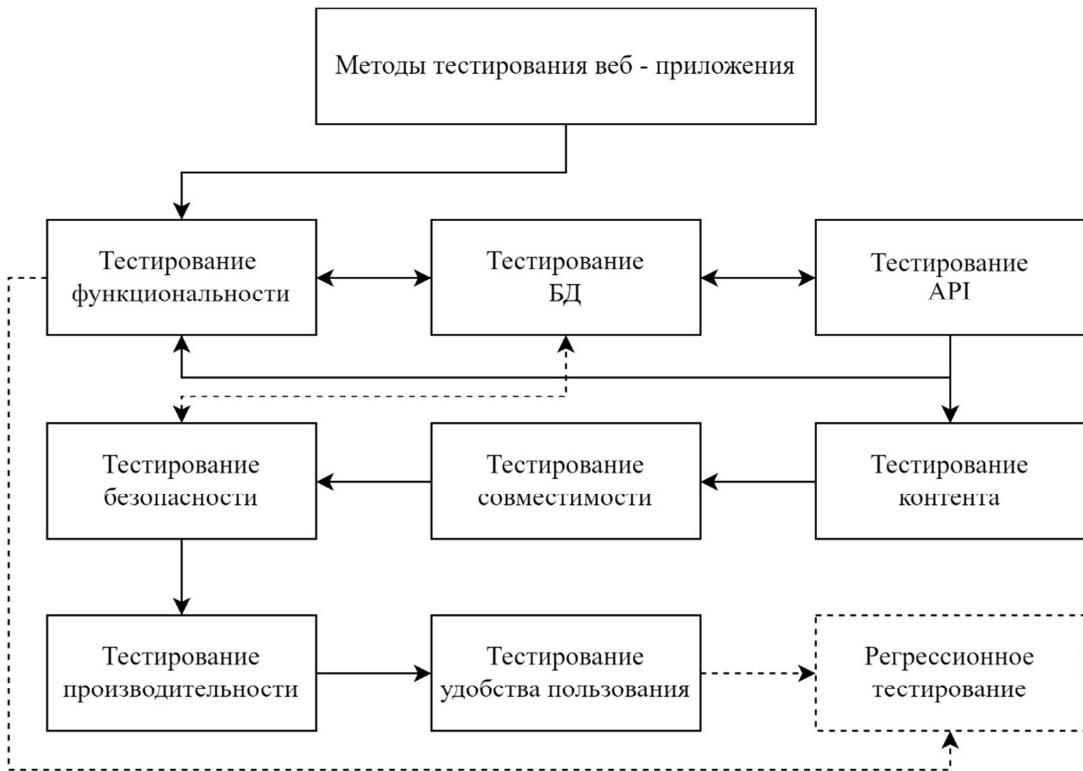
Попытка игнорирования данного этапа с целью экономии бюджета и неправильно выстроенная методика проведения тестирования, как правило, оборачиваются высокой тратой временных и финансовых ресурсов [3, 5]. Кроме этого, нарушения в работе функ-

ционала, бизнес-логики веб-приложения, связано как с репутационными рисками для организации, так и с различными штрафными санкциями.

Разрабатываемые тесты предназначены для единой информационной системы в сфере закупок (ЕИС). Официальный сайт ЕИС в сфере закупок в информационно-телекоммуникационной сети Интернет (рис. 1) предназначен для обеспечения свободного и безвозмездного доступа к полной и достоверной информации о контрактной системе в сфере закупок и закупках товаров, работ, услуг отдельными видами юридических лиц, а также для формирования, обработки и хранения такой информации.

На текущее время существует множество методов тестирования программного обеспечения. Правильный выбор методов в подавляющем большинстве случаев определяет успешность проведения тестирования на проекте в целом [7, 8]. Методы тестирования веб-приложений представлены на рисунке 2.

*Рис. 1. Сайт ЕИС в сфере закупок*



*Рис 2. Методы тестирования веб-приложения*

Исходя из представленной схемы видно, что тестирование функциональности, тестирование базы данных, тестирование API и тестирование контента связаны между собой – эти методы являются первоочередными в начальном этапе тестирования веб-приложения. Выполнение данных методов создаст уверенность, что весь реализованный функционал веб-приложения работоспособен, соответствует требованиям документации и графически корректно отображается на веб-странице.

Следующим шагом проводится тестирование совместимости. Тестирование совместимости создаст уверенность, что веб-приложение правильно загружается и корректно работает в требуемых браузерах, операционных системах и устройствах.

Далее проводится тестирование безопасности. Данный метод может использоваться совместно с тестированием базы данных. Тестирование безопасности обеспечивает гарантию защищенности веб-приложения. После того, как тестирование безопасности выполнено, проводится тестирование производительности. Оно обеспечивает стабильность, надежность и высокую производительность веб-приложения в соответствии с требованиями к системе.

Следующим шагом проводится тестирование удобства пользования. Тестирование удобства пользования позволит определить, насколько веб-сайт привлекателен, комфортен и полезен для пользователя.

Выполнение регрессионного тестирования даст уверенность, что исправления в системе или реализованный новый функционал не привел к наведенным дефектам. Регрессионное тестирование может быть

необязательным в случае, если не ожидается внесение каких-либо изменений в систему веб-приложения.

Если были исправления в системе или реализован новый функционал, который не требует проверок со стороны совместимости, безопасности, производительности и удобства пользования, то после выполнения первоочередных методов тестирования перечисленные методы могут быть пропущены.

Далее рассмотрим более подробно представленные методы тестирования:

1. Тестирование функциональности – является базовым методом тестирования веб-приложения. Функциональное тестирование гарантирует, что реализованный функционал веб-приложения соответствует технической документации и требованиям заказчика.

Метод функционального тестирования содержит выполнение следующих этапов:

1. Модульное тестирование – тестирование отдельных функций, классов, методов классов, взаимодействие классов, небольших библиотек для демонстрации того, что программа выполняется согласно спецификации [12]. Проводится разработчиком при готовности кода какой-либо отдельной подсистемы/модуля.

Примеры инструментов модульного тестирования: JUnit, NUnit, PHPUnit и др. Данные инструменты обеспечивают возможность создания тестовых сценариев и автоматического выполнения тестов.

2. Компонентное тестирование – тестирование небольших отдельных подсистем/модулей веб-приложения для того, чтобы на ранних этапах разработки снизить вероятность появления более серьезных ошибок в дальнейшем. Проводится тестировщи-

ком, когда модульное тестирование выполнено, билд готов и успешно установлен на тестовый стенд. Необходимо убедиться, что функционал подсистемы/модуля работоспособен и полностью соответствует требованиям спецификаций.

Примеры инструментов компонентного тестирования представлены в таблице.

Таблица

### Примеры инструментов компонентного тестирования

| Чек-лист (тест-дизайн)                       | Документ, содержащий в себе список проверок   |
|--|---|
| Техники тест дизайна                         | 1. Классы эквивалентности и граничные значения<br>2. Попарное тестирование<br>3. Таблица принятия решений<br>4. Диаграмма переходов и состояний и др. |
| Баг-трекинговые системы управления проектами | 1. Jira с плагином Zephyr<br>2. Testrail<br>3. Testlink и др.   |
| СУБД   | 1. Oracle SQL<br>2. DBeaver<br>3. MySQL и др.   |

Рассматривая инструменты из таблицы, чек-лист является одним из видов тестовой документации, составляется тестировщиком в соответствии со структурой спецификации и применением указанных в таблице техник тест-дизайна. В ЕИС тест-дизайн составляется при помощи инструмента Google Таблицы и содержит в себе: краткое описание задачи; окружение; трудозатраты; сводная статистика по проверкам, дефектам; перечень выполняемых проверок; время на проверку; приоритет; результат; ID бага / Комментарии QA / Проверяющий; версия спецификации; реализация разработкой и комментарий.

Пример чек-листа (тест-дизайна) представлен на рисунке 3.

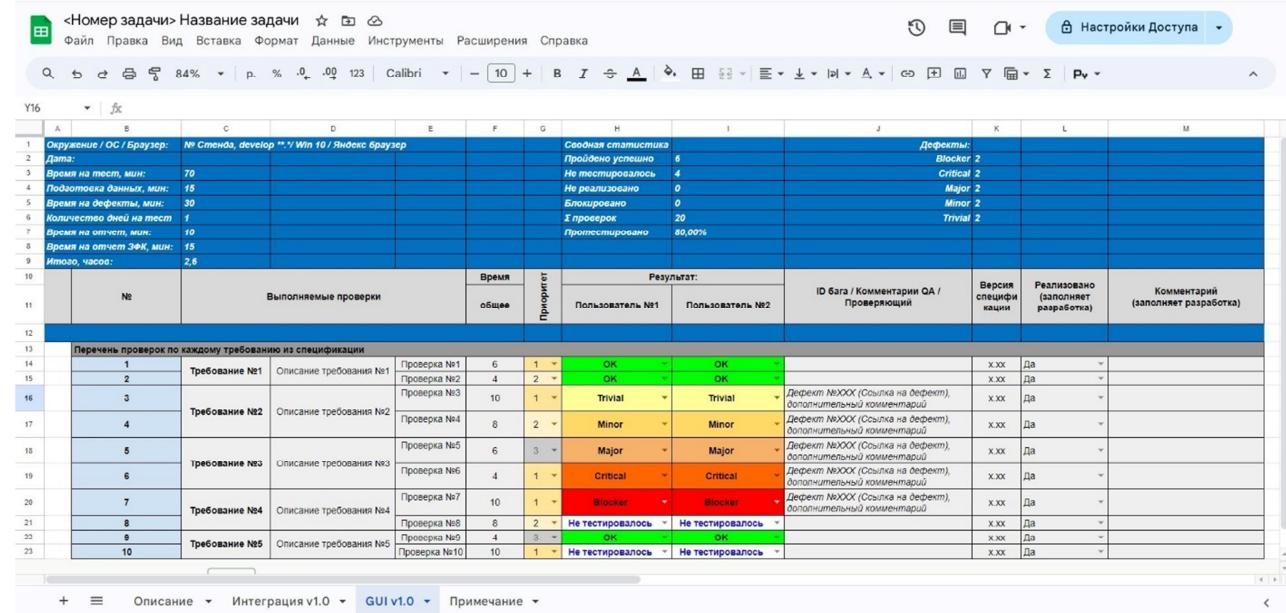
Баг-трекинговые системы позволяют управлять разработкой веб-приложения, оформлять дефекты, создавать тест-кейсы, коллекции с прогонами тест-кейсов определенных подсистем. В ЕИС используется Jira с плагином Zephyr, где проводится работа по управлению проектом, реализации доработок, дефектам и инцидентам. Осуществляется работа с тест-кейсами и тестовыми прогонами.

При помощи СУБД проверяется соответствие требованиям реализованных таблиц, их атрибутов и типов данных. Для ЕИС используются инструменты СУБД: Oracle SQL и DBeaver.

3. Интеграционное тестирование – тестирование взаимодействий отдельных подсистем/модулей веб-приложения между собой. Проводится при готовности нескольких взаимосвязанных подсистем/модулей. Необходимо убедиться, что подсистемы между собой работают корректно, без ошибок и данные успешно передаются из одной подсистемы в другую.

Инструменты интеграционного тестирования: интеграционные схемы; приложения: SoupUI, Postman; интеграционная шина; брокеры сообщений: Apache Kafka, RabbitMQ, ActiveMQ и др.

Интеграционные схемы позволяют составить интеграционный пакет, проверить валидность и соответствие элементов пакета интеграционным схемам. Инструменты SoupUI, Postman необходимы для проведения тестирования веб-сервисов и передачи интеграционных пакетов через протокол HTTP(S). Интеграционная шина является набором программных модулей, входящих в подсистему интеграции, реализующий функционал взаимодействия между подсистемами и внешними системами. Брокеры сообщений позволяют отслеживать отправку, маршрут и доставку сообщения от отправителя к получателю.



The screenshot shows a Google Sheets document with the following structure:

- Row 1:** Headers for basic information: Окружение / ОС / Браузер: № Стенда, develop \*\* У Win 10 / Яндекс браузер, Дата: 01.01.2024, Время на тест, мин: 70, Подготовка данных, мин: 15, Время на дефекты, мин: 30, Количество дней на тест: 1, Время на отчет, мин: 10, Время на отчет ЭФК, мин: 15, Итого, часов: 2,6.
- Row 2:** Section header: Выполняемые проверки.
- Row 3:** Headers for the 'Выполняемые проверки' section: № (row index), Время общее, Приоритет.
- Row 4:** Headers for the 'Результат:' section: Пользователь №1, Пользователь №2.
- Row 5:** Section header: Дефекты: Blocker, Critical, Major, Minor, Trivial.
- Row 6:** Section header: Сообщенная статистика: Пройдено успешно, Не протестировано, Не реализовано, Блокировано, И проверок, Протестировано.
- Row 7:** Detailed test case rows (e.g., Требование №1, Описание требования №1, Проверка №1, etc.) with columns for status (OK, Trivial, Minor, Major, Blocker) and comments (Defect №XXXX).
- Row 8:** Summary row for requirements (e.g., Требование №2, Описание требования №2, etc.) with columns for status (OK, Trivial, Minor, Major, Blocker) and comments (Defect №XXXX).
- Row 9:** Summary row for requirements (e.g., Требование №3, Описание требования №3, etc.) with columns for status (OK, Trivial, Minor, Major, Blocker) and comments (Defect №XXXX).
- Row 10:** Summary row for requirements (e.g., Требование №4, Описание требования №4, etc.) with columns for status (OK, Trivial, Minor, Major, Blocker) and comments (Defect №XXXX).
- Row 11:** Summary row for requirements (e.g., Требование №5, Описание требования №5, etc.) with columns for status (OK, Trivial, Minor, Major, Blocker) and comments (Defect №XXXX).
- Row 12:** Summary row for requirements (e.g., Требование №6, Описание требования №6, etc.) with columns for status (OK, Trivial, Minor, Major, Blocker) and comments (Defect №XXXX).
- Row 13:** Summary row for requirements (e.g., Требование №7, Описание требования №7, etc.) with columns for status (OK, Trivial, Minor, Major, Blocker) and comments (Defect №XXXX).
- Row 14:** Summary row for requirements (e.g., Требование №8, Описание требования №8, etc.) with columns for status (OK, Trivial, Minor, Major, Blocker) and comments (Defect №XXXX).
- Row 15:** Summary row for requirements (e.g., Требование №9, Описание требования №9, etc.) with columns for status (OK, Trivial, Minor, Major, Blocker) and comments (Defect №XXXX).
- Row 16:** Summary row for requirements (e.g., Требование №10, Описание требования №10, etc.) with columns for status (OK, Trivial, Minor, Major, Blocker) and comments (Defect №XXXX).

Рис. 3. Чек-лист (тест-дизайн)

В ЕИС используются инструменты тестирования, такие как: интеграционные схемы; приложения: SoupUI, Postman; интеграционная шина и брокер сообщений ActiveMQ.

4. Дымовое тестирование – тестирование критически важных функций, в случае неработоспособности которых дальнейшее тестирование проводить нецелесообразно. Выполняется после модульного, компонентного и интеграционного тестирования, когда уже готова первая версия приложения или выполнено обновление приложения. Проводится посредством прогонов тест-кейсов дымового уровня, когда тест-кейсы написаны только на основной бизнес-процесс веб-приложения.

Инструменты дымового тестирования: багтрекинговые системы управления проектами, которые указаны в таблице.

В ЕИС дымовое тестирование применяется после стабилизации версии (отладки системы) и при выпуске хотфиксса.

II. Тестирование БД – тестирование баз данных гарантирует, что созданные таблицы с атрибутами, их связи между собой, соответствуют требованиям. Значения корректно сохраняются в БД и успешно производится репликация данных. Этот метод осуществляется совместно с компонентным и интеграционным тестированием.

Примеры инструментов тестирования БД перечислены в таблице.

III. Тестирование API – тестирование набора правил, с помощью которых веб-приложения обмениваются/общаются между собой.

Этапы тестирования API: тестируются методы API; тестируется взаимодействие API с другим API; проверяется доступ к API при авторизации/автентификации; проверяется обработка ошибок при некорректных данных; тестируется производительность API и безопасность.

Данный метод проводится совместно с тестированием функциональности и тестированием БД.

Инструменты тестирования API: Postman, SoupUI и др. SoupUI позволяет осуществить взаимодействие с веб-приложением по SOAP-протоколу. Postman позволяет осуществить взаимодействие с веб-приложением как по SOAP-протоколу, так и по REST-архитектурному стилю.

В ЕИС используется SOAP протокол и инструменты: SoupUI, Postman.

IV. Тестирование контента – процесс проверки текстов, изображений, видео, аудио и других мультимедийных элементов на веб-странице. Данный метод проводится совместно с тестированием функциональности.

Инструменты тестирования контента: Grammarly, W3C Markup Validation Service, ImagesLoaded, DevTools и др. Данные инструменты позволяют проверить корректность и валидность HTML-кода веб-страницы, CSS стилей внешнего вида веб-страницы. С помощью DevTools в ЕИС осуществляется просмотр параметров элемента веб-страницы (шрифт, размер,

цвет и т.д.) и сравнение параметров элемента с макетами спецификаций.

V. Тестирование совместимости – тестирование на предмет проверки корректной работы веб-приложения в различных средах, таких как операционные системы, браузеры, устройства или сетевые условия.

Этапы тестирования совместимости: определить, на каких операционных системах, браузерах и устройствах должно работать веб-приложение; осуществить выбор подходящего инструмента тестирования совместимости; провести тестирование; выявить и осуществить валидацию дефектов.

Инструменты тестирования совместимости: DevTools, BrowserStack, CrossBrowserTesting, LambdaTest и др. Данные инструменты позволяют тестировать веб-приложение на различных браузерах и устройствах без необходимости наличия всех этих конфигураций физически.

В ЕИС тестирование совместимости проводится на веб-браузерах Яндекс.Браузер и Chromium GOST, операционных системах Windows, Linux, Android, iOS.

По итогу проведения функционального тестирования, БД, API, контента, совместимости формируется отчет. Он содержит в себе: общую информацию о тестировании (окружение, стенд, дата проведения тестирования, тестировщики); тестовое покрытие; информация по проблемам (качество в %, актуальные дефекты); все найденные дефекты и уточнения; проблемы при тестировании.

VI. Тестирование безопасности – важный этап тестирования веб-приложения. Необходимо убедиться, что веб-приложение выдерживает попытки взлома, несанкционированного доступа к информации.

Этапы тестирования безопасности: проводится сканирование уязвимостей на наличие известных сигнатур уязвимостей специальным инструментом ПО; выявляются слабые стороны сети и системы; имитируется атака на веб-приложение; выявляются и валидируются дефекты; повторно имитируется атака на веб-приложение; оцениваются риски, проводится аудит безопасности и оценка состояния системы; формируется отчет о проведенном тестировании.

Тестирование безопасности может проводится совместно с тестированием БД.

Инструменты тестирования безопасности: Burp Suite, Metasploit, Wireshark и др. Данные инструменты позволяют сканировать уязвимости веб-приложения, произвести взлом сессии, перехват и анализ трафика, модификацию запросов.

VII. Тестирование производительности – тестирование на предмет оценки быстроты работы веб-приложения под определенной нагрузкой. Воздействие производится на веб-сервер, сервер БД, балансировщик. Метод включает в себя: нагрузочное, стресс, тестирование стабильности и масштабируемости.

Этапы тестирования производительности представлены на рисунке 4. Основываясь на схеме этапов

тестирования в первую очередь необходимо выявить требования по производительности к веб-приложению. На этом этапе определяется, что именно необходимо проверить в процессе тестирования, например: максимальную нагрузку или время отклика. Проводится анализ инструментов, наиболее применимых к системе. Следующим шагом подготавливаются тестовые сценарии и настраивается тестовая среда в соответствии с выбранным инструментом тестирования [6, 9]. Далее производится запуск тестов и анализ полученных результатов.



Рис. 4. Этапы тестирования производительности

В случае, если были обнаружены ошибки во время тестирования, то необходимо завести дефекты и после их исправлений, повторно запускаются тесты. Анализируются результаты до тех пор, пока все дефекты не будут исправлены и в полученных результатах отсутствуют ошибки. Если при анализе полученных результатов все тесты прошли успешно, то выполняется переход к заключительному этапу – написанию отчета о проведенном тестировании.

Инструменты тестирования производительности: JMeter, LoadRunner, Gatling и др. Данные инструменты позволяют смоделировать доступ к веб-приложению определенного количества пользователей.

VIII. Тестирование удобства пользования – это установление степени удобства использования, обучаемости, понятности и привлекательности для пользователей веб-приложения в контексте заданных условий.

Этапы тестирования удобства пользования: необходимо определить, с помощью какого сервиса будет проводится тестирование; необходимо разместить проект на выбранный сервис и запустить тестирование; по представленному отчету от сервиса, анализируются результаты тестирования, документируются выявленные недостатки и предоставляются проектной команде на дальнейший анализ.

Сервисы тестирования удобства пользования: Usabilitylab, Точка качества, UsabilityHub, Hotjar, UserTesting. Данные сервисы позволяют провести тестирование интерфейса веб-приложения на представителях целевой аудитории для оценки удобства пользования.

IX. Регрессионное тестирование – это проверка ранее реализованного функционала при внесении в него изменений. В случае, если были внесены изменения в систему, то необходимо проверить, что функционал по-прежнему работоспособен, отсутствуют какие-либо наведенные ошибки и сбои. Тестирование производится ручным или автоматизированным методом по тест-кейсам дымового уровня. По окончании тестирования составляется отчет.

Инструменты регрессионного тестирования: багтрекинговые системы управления проектом, TestComplete, Selenium, Soap UI, Postman, Appium, RFT, QTP/UFT, UI Automator. Данные инструменты позволяют создать коллекции ручных или автоматизированных тестов GUI и API, запуск автотестов и отчет о проведении тестирования.

Для ЕИС в сфере закупок регрессионное тестирование проводится во время стабилизации версии – отладки системы. Создаются тестовые прогоны по подсистемам в Jira Zephyr. Прохождение тест-кейсов осуществляется как ручным, так и автоматизированным способом. По окончании тестирования составляется отчет, где указывается: общее качество системы; статус и качество всех задач, выпущенных за версию; перечень актуальных дефектов и уточнений; полный перечень всех заявленных дефектов и уточнение; статистика по дефектам и уточнениям в виде графика.

Таким образом, применение указанных методов на этапе тестирования позволит удостовериться, что разработанное веб-приложение соответствует предъявляемым к нему требованиям и готово к выпуску [10, 11].

В статье проведено исследование на тему разработки системы тестов для тестирования веб-приложения. Для достижения данной цели были выполнены следующие задачи: рассмотрены виды и методы тестирования программного обеспечения; проведен анализ видов и методов тестирования в целях применения их для тестирования веб-приложения; определен порядок выполнения методов тестирования; приведено описание методов с примерами инструментов тестирования.

## Литература

- Сертифицированный тестировщик. Программа обучения Базового уровня: сайт / Rstqb – URL:

/https://www.rstqb.org/ru/ (Дата обращения 17.02.2024).

Текст: электронный.

2. Kochkin, D. V. Моделирование информационно-телекоммуникационной системы предприятия раскрашенными сетями Петри / D. V. Kochkin, B. A. Gorbunov // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2024. – № 1(118). – С. 48–58.

3. Kochkin, D. V. Проектирование и конструирование программного обеспечения : учебное пособие / D. V. Kochkin, A. N. Shvetsov. – Вологда : Вологодский государственный университет, 2023. – 127 с.

4. Kulikov, C. S. Тестирование программного обеспечения. Базовый курс / C.S. Kulikov. – URL: https://svyatoslav.biz/software\_testing\_book (Дата обращения 26.02.2024). Текст: электронный. – С. 67–110.

5. Интеллектуальные информационно-телекоммуникационные системы / A. N. Shvetsov, A. A. Sukonshikov, I. A. Andrianov [и др.]. – Вологда : Вологодский государственный университет, 2023. – 127 с.

6. Shagina, A. A. Разработка специализированной программы по обучению медицинского персонала работе в медицинской информационной системе / A. A. Shagina, D. V. Kochkin // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2023. – № 1(19). – С. 67–70.

7. Модели и методы построения нейро-нечетких интеллектуальных агентов в информационно-телекоммуникационных системах / A. A. Sukonshikov, I. A. Andrianov, C. V. Dianov [и др.]. – Курск :

Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2021. – 152 с.

8. Принципы построения самоорганизующихся информационно-телекоммуникационных систем / A. A. Sukonshikov, A. N. Shvetsov, I. A. Andrianov, D. V. Kochkin // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2021. – № 1(100). – С. 56–67.

9. Building self-organizing information and telecommunications systems / A. A. Sukonshikov, A. N. Shvetsov, I. A. Andrianov, D. V. Kochkin // Journal of Physics: Conference Series, Krasnoyarsk, Russian Federation, 25 сентября – 04 2020 года. Vol. 1679. – Krasnoyarsk, Russian Federation: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 32013.

10. Modeling the Elements of an Enterprise Information System Using Colored Petri Nets / A. Sukonshikov, D. Kochkin, A. Shvetsov [et al.] // Conference of Open Innovations Association, FRUCT. – 2020. – No. 26. – P. 660–666.

11. Kochkin, D. V. Информационные сети и телекоммуникации / D. V. Kochkin, A. A. Sukonshikov. Том часть 1. – Курс : Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2016. – 233 с.

12. Duplicate and Plagiarism Search in Program Code Using Suffix Trees over Compiled Code / I. Andrianov, S. Rzheutskaya, A. Sukonshikov [et al.] // Conference of Open Innovations Association, FRUCT. – 2020. – No. 26. – P. 16–22.

*A.A. Krasnov, D.V. Kochkin*  
Vologda State University

## DEVELOPMENT OF TEST SYSTEM FOR WEB APPLICATION TESTING

The article presents the results of a study on the choice of testing methods used to create a test system for a web application. The methods of testing the web application are defined. The analysis of the applicability of the methods and their execution procedure is carried out.

Testing methods, web application testing, testing tools.

# **Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования**

УДК 001.891.572



**M.I. Вольников**

Пензенский государственный технологический университет

## **МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЙ ЗАЩИТЫ ГЕТЕРОСТРУКТУР МЕХАТРОНИКИ**

Актуальность обусловлена недостаточно изученностью и разработанностью моделей динамики технических систем при импульсных воздействиях. Современные мехатронные системы, состоящие из сложных гетерогенных структур, часто работают в экстремальных условиях, обусловленных импульсными воздействиями. Для создания надежной системы защиты сложных гетероструктур от импульсных воздействий необходимо построение соответствующих математических моделей, позволяющих с достаточной степенью адекватности описывать процессы, происходящие в гетероструктурах. Целью работы является изучение и развитие моделей гетероструктур, базирующихся на уравнениях динамики точки под действием импульсных нагрузок при наличии и отсутствии внутреннего трения в гетероструктурах.

Импульсные воздействия, теория, модели динамики гетероструктур.

Сложные системы, в большинстве случаев представляющие собой гибридные гетероструктуры, постоянно подвергаются внешним воздействиям, в том числе в виде импульсов силы, подвергая систему значительным перегрузкам, способных вызвать необратимые деградационные процессы в материалах гетероструктур, приводящие к образованию трещин, расслоению печатных плат, нарушению паяных контактов, разрушению сварных швов и т.п.

Для динамических перемещений используются фундаментальные модели гетероструктур без учета и с учетом внутреннего трения, позволяющие анализировать результаты воздействий импульсных нагрузок на изделие мехатроники.

В простейшем случае это гетероструктуры с одной, а в общем случае с несколькими степенями свободы, для которых требуется составления систем линейных или нелинейных дифференциальных уравнений.

Разработка моделей сложных систем под действием импульсных нагрузок посвящена данная статья.

### **Воздействие одиночного импульса**

Дифференциальное уравнение движения системы под действием некоторой силы  $P(t)$  без учета внутреннего трения имеет вид

$$m\ddot{z}(t) + cz(t) = P(t), \quad (1)$$

где  $z$  – перемещение системы;  $m$  – ее масса;  $c$  – коэффициент жесткости.

Ищем решение при нулевых начальных условиях  $z(0) = 0, \dot{z}(0) = 0$ .

Для интервала времени  $0 \leq t \leq \tau$  решение имеет вид

$$z = \frac{P_0}{mp_0} \int_0^t f(t') \sin p_0 (t - t') dt', \quad (2)$$

и для  $t > \tau$

$$z = \frac{P_0}{mp_0} \int_0^\tau f(t') \sin p_0 (t - t') dt', \quad (3)$$

где  $P_0$  – максимум силы;  $t$  – момент времени, для которого определяется перемещение;  $\tau$  – продолжительность действия силы;  $p_0$  – круговая частота свободных незатухающих колебаний системы.

$$p_0 = \sqrt{\frac{c}{m}} = \frac{2\pi}{T_1},$$

где  $T_1$  – период.

Наиболее часто используемые формы  $f(t')$  импульсных нагрузок представлены в [1, 2]. При подстановке выражений для  $f(t')$  в (2) и (3) и обозначив  $p_0 t = \xi, p_0 \tau = \alpha, \frac{P_0}{c} = z_c$  получаем формулы для определения  $z(t)/z_c$  для шести форм импульсов. Здесь  $z_c$  – статический прогиб системы под действием силы  $P_0$ .

Амплитудные значения перемещений –  $z_d$ , выраженные в зависимости от соотношения

$$z_d = \chi \left( \frac{\tau}{T_1} \right) z_c,$$

где  $\chi$  – динамический коэффициент.

Вычислив статически прогиб  $z_c$  по формуле  $\frac{P_0}{c} = z_c$  и коэффициент динамичности  $\chi$  из графиков [3, 4] можно определить амплитудные значения системы  $z_d = z_c \chi$ , имеющие максимумы от 0,5 до 1,0 отношения  $\frac{\tau}{T_1}$ .

### **Воздействие периодических импульсов**

При определении движения системы под действием периодических импульсов учтем внутреннее трение в системе [5], которое в задачах о свободных коле-

баниях диссипативных систем реализуется с использованием гипотезы комплексной жесткости [3, 6]

$$m\ddot{Z}(t) + (a + ib)cZ(t) = 0, \quad (4)$$

где  $Z(t)$  – комплексное перемещение системы;  $i$  – мнимая единица,

$$a = \frac{(1 - \alpha^2)}{(1 + \alpha^2)}, b = \frac{2\alpha}{(1 + \alpha^2)}, \alpha = \frac{\gamma}{2},$$

где  $\gamma$  – коэффициент внутреннего трения, связанный с коэффициентом потерь

$$\eta = \gamma/(1 - \gamma^2/4).$$

Подставив  $Z = Ae^{pt}$  в (4) получим характеристическое уравнение

$$p^{*2}(a + ib)p_0^2, \text{ где } p_0 = \sqrt{\frac{c}{m}},$$

решение которого имеет вид

$$p^* = \pm i(1 + i\alpha)p, \text{ где } p = (1 + \alpha^2)^{-1/2} \cdot p_0.$$

Тогда

$$Z = (A - iB)e^{-\alpha pt}e^{ipt},$$

из которого получим вещественное решение  $z = Re(Z)$ :

$$z = e^{-\frac{\gamma}{2}pt}(A \cos p t + B \sin p t). \quad (5)$$

Круговая частота затухающих колебаний и логарифмический декремент  $\delta$ , не зависящий от частоты,

$$p = \frac{p_0}{\sqrt{1+\gamma^2/4}}, \quad \delta = \pi\gamma. \quad (6)$$

При начальных условиях  $z(0) = z_0, \dot{z}(0) = v_0$  решение примет вид

$$z = e^{-\frac{\gamma}{2}pt}\left(z_0 \cos p t + \left(\frac{v_0}{p} + \frac{\gamma z_0}{2}\right) \sin p t\right). \quad (7)$$

Подставляя в (7) начальные условия  $z_0 = 0, v_0 = S_0 m^{-1}$ , соответствующие приложению импульса  $S_0$  к неподвижной системе в момент  $t = 0$ , получим

$$z = \frac{S_0}{mp_0} e^{-\frac{\gamma}{2}pt} \sin p t. \quad (8)$$

Для конечного числа  $n + 1$  периодических импульсов с периодом  $T_0$  решение ищем методом наложения функций (8) с разными началами отсчета времени

$$z_n = \frac{S_0}{mp_0} \sum_{r=0}^n e^{-\frac{\gamma}{2}p(t-rT_0)} \sin p(t - rT_0), \quad (9)$$

где  $z_n$  – перемещение спустя  $n$  периодов  $T_0$ ,  $nT_0 \leq t(n+1)T_0$ ,  $n$  – число повторений импульсов; при  $n = 0$  соответствует одному импульсу.

Введем относительное время

$$t^* = \frac{t - nT_0}{T_1} \quad (0 \leq t^* \leq \theta),$$

(9) примет вид

$$z_n = \frac{S_0}{mp_0} e^{-\gamma\pi t^*} (A_n \sin 2\pi t^* + B_n \cos 2\pi t^*), \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} A_n &= \sum_{k=0}^n e^{-b'k} \cos a' k = \\ &= \frac{e^{b'} - \cos a' - e^{-nb'} \cos(n+1)a' + e^{-(n+1)b'} \cos(n+1)a'}{2(\sinh b' - \cos a')} \\ B_n &= \sum_{k=0}^n e^{-b'k} \sin a' k = \\ &= \frac{\sin a' - e^{-nb'} \sin(n+1)a' + e^{-(n+1)b'} \sin(n+1)a'}{2(\sinh b' - \cos a')} \end{aligned} \quad (11)$$

$$a' = 2\pi\theta, \quad b' = \gamma\pi\theta, \quad n - r' = k.$$

При небольшом  $n$  выражение (9) описывает неустановившиеся колебания системы. Амплитуда колебаний равна

$$z_n^{max} = \frac{S_0}{mp_0} e^{-\gamma\pi t_0^*} \sqrt{(A_n^2 + B_n^2)},$$

где  $t_0^*$  – наименьшее положительное значение, полученное из выражения

$$t^* = \frac{1}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{2A_n - \gamma B_n}{2B_n + \gamma A_n}.$$

При малой диссипации  $\gamma \leq 0,1$  получим

$$z_n^{max} = \frac{S_0}{mp_0} \sqrt{(A_n^2 + B_n^2)}. \quad (12)$$

Глобальный максимум устанавливается при анализе  $n$  – значений  $z^{max}$ .

При  $\frac{T_0}{T} = N$  на частоте собственных колебаний наступает импульсный резонанс, амплитуда которого приближенно можно определить по формуле

$$z_n^{max} \approx \frac{S_0}{mp_0} \frac{1 - e^{-\gamma\pi N(n+1)}}{1 - e^{-\gamma\pi N}}. \quad (13)$$

Наибольший максимум  $z_n^{max}$  соответствует  $N = 1$ .

При большом  $n$  колебания будут установившимися. Тогда в этом случае, при  $n \rightarrow \infty$

$$z_n^{max} = \frac{S_0}{mp_0} \frac{e^{b^{1/2}} e^{-\gamma\pi t_0^*}}{\sqrt{2(\sinh b' - \cos a')}}.$$

При малой диссипации ( $\gamma \leq 0,1$ ) решение можно представить приближенно в виде

$$z_n^{max} \approx \frac{S_0}{mp_0} \frac{e^{b^{1/2}}}{\sqrt{2(\sinh b' - \cos a')}}.$$

При  $\frac{T_0}{T} = N$  наступает импульсный резонанс.

Резонансную амплитуду можно определить по формуле

$$z_{\text{рез}}^{max} = \frac{S_0}{mp_0} \frac{1}{1 - e^{-\gamma\pi N}}. \quad (14)$$

Разработанные модели могут найти широкое применение в технике и технологиях. Одним из применением являются строительные балочные и стержневые конструкции, мачтовые сооружения. Немаловажным является возможность моделировать поведение диссипативных систем с учетом трения. Модели позволяют исследовать динамические процессы, проходящие под действием импульсных нагрузок.

Развита теория построения моделей гетероструктур специальной мехатроники. Предложены фундаментальные математические модели гетероструктур мехатроники. Построены модели гетероструктур при наличии воздействия в виде периодической и импульсной нагрузок. Представлены результаты моделирования гетероструктур под воздействием динамических нагрузок различных типов. Описаны общая модель многослойных гетероструктур и со множеством степеней свободы. Разработан алгоритм решения вариационной задачи, предложена методика ее решения.

### Литература

1. Здания и сооружения, подверженные динамическим воздействиям. Правила проектирования: свод правил СП 413.1325800.2018. – Москва : Стандартинформ, 2019.
2. Динамика гетерогенных структур. Виброударо-защита гетерогенных структур. Том 3. Смогунов В. В., Климинов И. П., Вдовкина О. А., Вольников М. И. / Под редакцией В. В. Смогуна – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005.– 497 с.
3. Справочник проектировщика / Под ред. В. Г. Коренева, И. М. Рабиновича. – Москва : Стройиздат, 1984. – 304 с.
4. Инженерные методы исследования ударных процессов / Г. С. Батуев и др. – Москва : Машиностроение, 1977. – 240 с.
- 5 Вольников, М. И. Учет трения в математических моделях диссипативных систем / М. И. Вольников, В. В. Смогунов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2022. – № 2. – С. 110–118.
- 6 Вольников, М. И. Математические модели динамики гетероструктур с трением / М. И. Вольников, В. В. Смогунов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 3 (55). – С. 98–108. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-3-10.

*M.I. Volnikov  
Penza State Technological University*

### MODELS OF PROTECTION TECHNOLOGIES FOR MECHATRONICS HETEROSTRUCTURES

The article is devoted to the study and development of models of heterostructures based on the equations of the dynamics of a point under the influence of pulsed loads in the presence and absence of internal friction in heterostructures. The relevance is due to the insufficiently studied and developed models of the dynamics of technical systems under pulsed influences. Modern mechatronic systems, consisting of complex heterogeneous structures, often operate in extreme conditions due to pulsed influences. To create a reliable system for protecting complex heterostructures from impulsive influences, it is necessary to build appropriate mathematical models that allow a sufficient degree of adequacy to describe the processes occurring in heterostructures.

Pulse influences, theory, models of heterostructure dynamics.



*A.A. Рахимов*  
Политехнический институт Таджикского технического университета  
имени академика М.С. Осими

## ПРОГРАММНОЕ И СИСТЕМНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКЕ ОБУЧАЮЩИХСЯ В ТЕХНИЧЕСКОМ ВУЗЕ

В статье рассматриваются вопросы системного и программного представления компьютерного моделирования процесса математической подготовки студентов в техническом вузе, а также проанализированы различные компьютерные программы, такие как Wolfram Alpha, онлайн-калькулятор и другие программы. Для вычисления задач численными методами предложена другая версия разработки программного обеспечения, разработанная в среде программы JavaScript. Эти программы смогут помочь в обучении математике студентам, ученикам, а также преподавателям на всех ступенях образования.

Программное обеспечение, компьютерное моделирование, модель, математика, компьютерные программы, программа Wolfram Alpha, онлайн-калькулятор, C++, Python, JavaScript.

Компьютерные системы, программы и технологии, которые они позволяют использовать, играют все более важную роль в работе и повседневной жизни. Таким образом, способность использовать компьютеры для решения задач является важной компетенцией, которую студенты должны развивать, чтобы преуспеть в современном цифровом мире. Даже люди, которые не планируют карьеру в области вычислительной техники, могут получить пользу от развития навыков решения вычислительных задач, поскольку эти навыки улучшают понимание и решение широкого спектра проблем, выходящих за рамки информатики.

«Решение численными методами» – это итеративный процесс разработки вычислительных решений проблем, которые выражаются в виде логических последовательностей шагов (т.е. алгоритмов), где каждый шаг точно определен, чтобы его можно было выразить в форме, которую может выполнить компьютер [2].

В работах таких российских ученых, как М.А. Наруменко (о преподавании математики с помощью технических средств и использования компьютерного моделирования), Т.А. Иванова, Д.Л. Егоренков, О.А. Таракова, Э.Т. Селиванова [12], К.А. Федулова, Ж.И. Солодовиченко, Штофф В.А., Л.А. Шкутина и Т.В. Чернякова, обоснованы методы обучения математике посредством компьютерного моделирования, использования технологических и информационных средств, использования компьютерных программ при обучении геометрии, математических моделей в обучении будущих инженеров.

В работах современных таджикских исследователей С.Г. Гуломнабиева [3], З.А. Аминовой [5], М. Нутмонова [4], Н.С. Абдуллоева [6] и А.А. Рахимова [1–2, 14] рассмотрены вопросы использования компьютерных программ, применения математического и компьютерного моделирования, а также ис-

пользование технических средств в процессе обучения.

Следует отметить, что в настоящее время описано использование компьютерных программ в процессе обучения математике [7–11], использование программы Maple и программы JavaScript на теоретических и практических занятиях, что позволяет эффективно внедрять компьютерное моделирование в процессе обучения студентов технических вузов математике.

Постановка задачи заключается в разработке программного и системного обеспечения для решения задач вычислительного метода с использованием компьютерных программ и технологий. Основной целью работы является создание удобного и функционального инструмента, который позволит пользователям эффективно решать задачи, связанные с численными методами, и внедрять вычислительное моделирование в процесс математической подготовки студентов технических направлений вузов.

Создание программного обеспечения для решения задач вычислительного метода представляет собой инновационный подход, который будет вносить существенный вклад в образовательное пространство. Разработка таких программ обеспечит студентов и начинающих специалистов необходимыми инструментами для эффективного освоения и применения численных методов в обучении математике. Более того, данное программное решение будет способствовать развитию вычислительного мышления и повышению уровня компетенций в области программирования и математики.

Статья включает анализ существующих исследований, проведение экспериментов для тестирования программного обеспечения, проектирование интерфейса и модулей. Комбинация этих методов позволит получить полное понимание разрабатываемого программного решения и оценить его эффективность.

Численные (вычислительные) методы – методы решения математических задач в численном виде. Представление как исходных данных в задаче, так и ее решения – в виде числа или набора чисел.

Многие численные методы являются частью библиотек математических программ. В системе подготовки инженеров технических специальностей они являются важной составляющей.

Основами для вычислительных методов являются:

- решение систем линейных уравнений;
- интерполярование и приближенное вычисление функций;
- численное интегрирование;
- численное решение системы нелинейных уравнений;
- численное решение обыкновенных дифференциальных уравнений;
- численное решение уравнений в частных производных (уравнений математической физики);
- решение задач оптимизации.

Проводится анализ популярных языков программирования, которые широко используются в веб-разработке. Эти языки включают в себя такие инструменты, как Python, Java, C++, Fortran и JavaScript. Рассмотрим их особенности и преимущества при разработке программного обеспечения для решения задач численного метода.

Python, пользующийся широкой популярностью среди научного сообщества, предоставляет удобные средства для работы с численными методами. Его мощные библиотеки для символьных вычислений, численного решения уравнений и визуализации делают его привлекательным выбором для научных исследований.

SymPy – это библиотека Python для символьных вычислений, позволяющая проводить аналитическое решение задач.

SciPy – это ключевая библиотека для научных вычислений в Python, предоставляющая множество функций для численного решения дифференциальных уравнений, включая различные методы, такие как метод Эйлера и метод Рунге – Кутты.

FiPy – специализированная библиотека Python для решения частных дифференциальных уравнений.

Эти библиотеки делают Python мощным инструментом для работы с численными методами и научными вычислениями.

Библиотека Numeric предоставляет решения для разнообразных численных задач в JavaScript. Несмотря на то, что JavaScript не является прямым выбором для сложных вычислительных задач, в некоторых случаях его производительность достаточна. Numeric содержит более сотни функций для численной математики, включая операции с векторами и матрицами, решение задач линейной алгебры, работу с разреженными матрицами, комплексными числами и решение систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Графическое представление результатов осуществляется с помощью библиотеки Flot.

Fortran изначально разрабатывался для решения сложных вычислительных задач и по-прежнему остается популярным выбором для научных и инженерных приложений, особенно на параллельных вычислительных системах. Он предлагает мощные средства для численных вычислений и оптимизации, и его компиляторы входят в список значимых достижений в области информатики.

C++ является универсальным объектно-ориентированным языком программирования. Он широко используется в различных областях – от системного программирования до создания приложений с графическим интерфейсом пользователя. Помимо возможностей, которые дает C, C++ предоставляет гибкие и эффективные средства определения новых типов – объектов. При правильном использовании этот метод позволяет сокращать программный код, создавать программы, легкие для понимания и контроля.

Исходя из изученных материалов и имеющих навыков в области языков программирования, для проектной части исследовательской работы были выбраны язык разметки HTML, язык стилей CSS и интерактивный язык JavaScript.

Решение задач вычислительного метода включает в себя применение математических и алгоритмических методов для моделирования и решения различных задач, таких как численное интегрирование, решение дифференциальных уравнений, решение линейных уравнений и другие. Существует множество веб-сайтов и приложений, которые предоставляют инструменты и ресурсы для решения таких задач.

На рисунке 1 показано решение системы линейных уравнений с помощью программы Maple. Оно было совершено с помощью оператора *solve*. Нужно выделить, что использование всех возможностей Maple может потребовать времени и усилий для изучения, особенно для новичков в программировании и математике, что является его главным минусом. Также Maple предоставляет свой собственный язык программирования, что может усложнить работу пользователям, привыкшим к другим языкам программирования, таким как Python или Matlab.

Для эффективной работы Maple требует мощные компьютеры с большим объемом оперативной памяти. Maple является коммерческим программным обеспечением, и для его использования требуется приобрести лицензию. Это может быть препятствием для студентов и небольших организаций с ограниченным бюджетом.

Таким образом, Maple является мощным инструментом для математического вычисления, которая очень полезна для студентов и профессионалов.

Wolfram Alpha – это онлайн-программа, предназначенная для решения математических, инженерных и научных задач. Она позволяет получить информацию о математических объектах, решать математические задачи, строить график функций и поверхностей. Доступна как бесплатная версия с ограниченными возможностями, так и платная с расширенным функционалом.

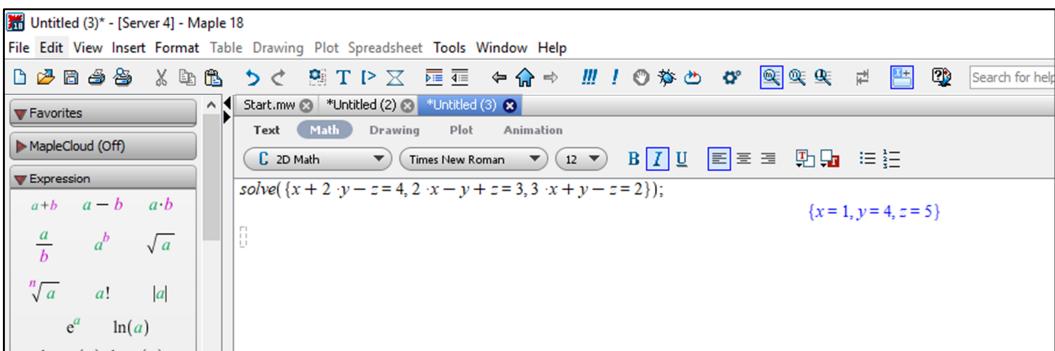


Рис. 1. Решение систем линейных уравнений в Maple

The screenshot shows the Wolfram Alpha search interface. The query `solve y'' = 6x, y(0)=0, y(1)=1` is entered. The input interpretation shows the differential equation  $y''(x) = 6x$  and boundary conditions  $y(0) = 0$  and  $y(1) = 1$ . The result is  $y(x) = x^3$ . Below it, the Euler-Cauchy equation  $y''(x) = 6x$  is listed. The ODE classification is second-order linear ordinary differential equation. A link to "Step-by-step solution" is present.

Рис. 2. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений

Программа охватывает множество разделов математики, включая высшую математику технического вуза, и предоставляет готовые ответы, что полезно для обучения и самопроверки.

На рисунке 2 показано решение обыкновенного дифференциального уравнения. Система решила его, предоставила результат и определила тип уравнения – линейное обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка. Пошаговое решение недоступно в бесплатной версии, его нужно купить. Важно отметить, что Wolfram Alpha поддерживает только английский язык.

Wolfram Alpha предоставляет широкий спектр возможностей, включая поиск информации, решение уравнений, построение графиков, дифференцирование, интегрирование, а также готовые результаты, что упрощает процесс получения информации. Программа имеет удобный интерфейс, с которым легко взаимодействовать: при наборе первых символов выдается похожий запрос, и выбрав готовый шаблон, можно изменить его под свои данные. В отличие от специализированных математических программ, таких как Matlab, Maple, Mathcad, она разработана специально

для использования в онлайн-режиме, не требуя установки на компьютер.

#### *Анализ онлайн-калькуляторов для решения задач вычислительного метода*

Выше описанные программы, Maple и Wolfram Alpha, хоть и предоставляют мощные возможности для вычисления, обладают интерфейсом, который может быть сложным для восприятия и повседневного использования неспециалистом. Пользователям, не имеющим глубоких знаний в области математики и программирования, может быть трудно использовать эти программы эффективно. Для решения данной задачи существуют более доступные и удобные онлайн-калькуляторы для решения задач вычислительного метода. Они подходят для широкого круга пользователей и имеют простой интерфейс, который позволяет быстро и удобно выполнять различные вычисления.

Онлайн-калькулятор Math (<https://math.semestr.ru/>) можно использовать для проверки своего решения по многим математическим и экономическим дисциплинам. Результат решения – это отчет в формате Word (и Excel при необходимости), содержащий ход решения с комментариями, исходные формулы и выводы.

**ИНСТРУКЦИЯ:** Для получения онлайн решения необходимо выбрать количество переменных: 3 и количество строк 3

**Смысл метода:** последовательно исключаем переменную за переменной, пока в одной из строк не будет однозначно определена переменная  $x_i$ . Идею можно проиллюстрировать на простом примере:  
 $x_1 - x_2 = 3$   
 $-x_1 + 2x_2 = 1$   
----- (складываем строки)  
 $-x_2 + 2x_2 = 3 + 1 = 4$  или  $x_2 = 4$   
Откуда,  $x_1 = 7$

**Суть метода можно понять, проанализировав пример решения.**

**ПРИМЕР:**  
 $2x_1 - x_2 = 0$   
 $-x_1 + x_2 + 4x_3 = 13$

Рис. 3. Решение СЛАУ методом Гаусса с помощью онлайн-калькулятора Math (шаг 1)

Данный ресурс предоставляет решение по таким направлениям вычислительной математики, как методы поиска нулей функции, методы минимизации функций, итерационные методы решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), прямые методы решения СЛАУ, численное интегрирование функций, вычисление определителей.

На рисунке 3 представлен первый шаг решения СЛАУ методом Гаусса, где сначала нужно выбрать количество переменных и количество строк. Важно отметить, что тут показаны такие возможности веб-ресурса, как видеоИнструкция и оформления решение СЛАУ в Word, а также описывается смысл метода, пример решения и вывод.

На рисунке 4 продемонстрирован второй шаг решения СЛАУ, где необходимо заполнить коэффициенты перед переменными и выбрать метод решения. При заполнении необходимых данных выводится пошаговое решение и результат. Как видно, онлайн-калькулятор имеет простой интерфейс, который упрощает ввод данных.

В целом онлайн-калькулятор Math представляет собой полезный инструмент для решения математических и экономических задач с простым интерфейсом, подробными шагами решения и возможностью генерировать отчеты. Однако следует учитывать его ограничения по функциональности и необходимость доступа в интернет для использования.

Исходя из проведенных анализов можно сделать вывод, что для разработки программы для решения задач вычислительного метода, важно учесть принципы, выделенные в данном разделе. Программа должна предоставлять понятный интерфейс, обеспечивать высокую точность результатов, работать эффективно и надежно, а также быть доступной в интернете.

#### Моделирование прецедентов использования

Существует несколько методов визуализации, использующихся для моделирования поведения системы, – диаграмма прецедентов использования, диаграмма

| Матрица А |   |   | Результат В |
|-----------|---|---|-------------|
| 0         | 0 | 0 | 0           |
| 0         | 0 | 0 | 0           |
| 0         | 0 | 0 | 0           |

Метод решения: Гаусса | Вычислительная схема | Единственного деления

Преобразовать к виду  
 Нули выше побочной диагонали       Нули ниже главной диагонали  
 ← или →

Создать шаблон решения в Excel. Округление до 3 разряда после запятой

Рис. 4. Решение СЛАУ методом Гаусса с помощью онлайн-калькулятора Math (шаг 2)

последовательностей, диаграмма коммуникации и диаграмма деятельности.

Диаграмма вариантов прецедентов – это тип поведенческой диаграммы UML, который позволяют визуализировать различные типы ролей в системе и то, как эти роли взаимодействуют с системой.

Данная диаграмма вариантов прецедентов описывает взаимодействие между пользователем и системой. Описание действия каждого актеров:

1. Выбор методов вычислительного метода (пользователь): пользователь может выбрать методы для решения конкретных задач из имеющего списка.

2. Ввод данных для вычисления (пользователь): после выбора метода пользователь вводит необходимые данные для расчета.

3. Просмотр результата (пользователь): после завершения расчета пользователь может рассматривать результат

4. Обработка запроса и решение задачи (система): в данном этапе система обрабатывает данные в соответствии с данными, которые вводил пользователь. Далее выполняется необходимые шаги для получения результата.

Таким образом, диаграмма вариантов прецедентов по данной теме описывает поведение основных актеров: пользователя и системы.

Модель деятельности описывает поведение, в котором участвуют несколько элементов системы. Это может быть поведение, которое участвует в выполнении конкретной задачи, или части функциональности, которую можно использовать в разных частях системы.

Диаграмма деятельности показывает шаги вычисления. Каждый шаг деятельности называется действием. Действия нельзя разбить на более мелкие части. Диаграмма деятельности описывает, какие шаги выполняются последовательно, а какие – параллельно. Передача управления от одного состояния вида деятельности к другому называется потоком управления.

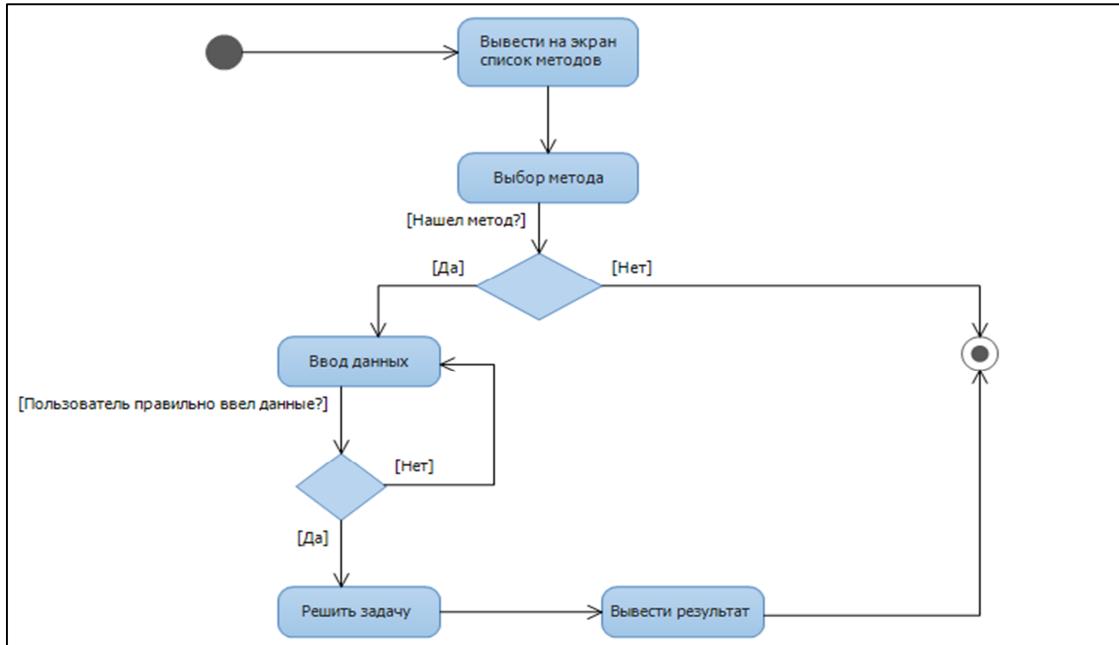


Рис. 5. Алгоритм деятельности программного обеспечения

Выше представлен алгоритм деятельности для исследуемой темы (рис. 5).

Алгоритм деятельности для темы «Разработка программы для решения задач вычислительного метода» начинается с блока «Начало», которая означает старт процесса. От этого блока линия идет к блоку «Вывести на экран список методов», где будут отображаться доступные методы.

Далее идет блок «Выбор метода», где пользователь выбирает метод для решения своей задачи. В зависимости от выбора пользователя процесс идет к блоку условия. Если пользователь не нашел метод, процесс заканчивается блоком «Конец». Если нашел метод для решения своей задачи, то идет линия к блоку «Ввод данных», где пользователь должен вводить данные, для того чтобы система решила задачу. Здесь устанавливается условие: если ввод данных неверен, сообщается ошибка о вводе данных и процесс заново идет к блоку «Ввод данных».

В блоке «Решить задачу» выполняются необходимые алгоритмы на основе выбранного метода и введенных значений. Результат задачи будет отображаться с помощью блока «Вывести результат». Процесс заканчивается с помощью блока «Конец».

Таким образом, алгоритм деятельности отображает собой основные шаги и условия, которые выполняются в процессе работы программы.

Рассмотрим один раздел из численного метода – элементарную теорию погрешностей. Построим блок-схему, алгоритм решения и реализуем с помощью компьютерного моделирования JavaScript.

**Определение 1.** Приближенным значением некоторой величины  $a$  называется число  $a_p$ , которое не значительно отличается от точного значения этой величины. Пусть  $a$  – точное значение некоторой величины, а  $a_p$  – ее приближенное значение.

**Определение 2.** Абсолютной погрешностью  $\Delta$  приближенного значения называется модуль разности между точным и приближенным значениями этой величины:

$$\Delta = |a_p - a|. \quad (1)$$

**Определение 3.** Относительной погрешностью приближенной величины  $a_p$  называется отношение абсолютной погрешности приближенной величины к абсолютной величине ее точного значения:

$$\delta = \frac{|a_p - a|}{a} = \frac{\Delta}{|a|}. \quad (2)$$

Это равенство можно записать в другой форме:  $|a|\delta$ .

Таким образом, алгоритм нахождения абсолютной и относительной погрешности представлен ниже на рисунке 6:

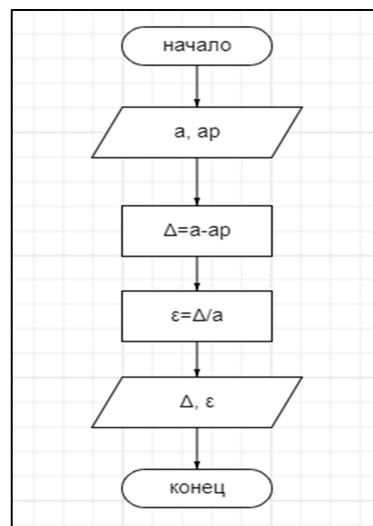


Рис. 6. Блок-схема нахождения абсолютной и относительной погрешности

Алгоритм решения:

1. Ввод  $a$ ,  $a_p$ (приближенное значение).
2. Вычисление абсолютной погрешности:  $\Delta = a - a_p$ .
3. Вычисление относительной погрешности:  $\epsilon = \Delta / |a_p|$ .
4. Вывод результатов абсолютной и относительной погрешности.

*Реализация программы с учетом выбранного языка*

Рассматриваются примеры кода и демонстрируются специфические возможности языка, которые использовались для реализации программы.

Для раздела вычислительного метода «Элементарная теория погрешностей» была разработана программа, которая предназначена для вычисления абсолютной и относительной погрешностей между фактическим и приближенным значениями. Веб-сайт состоит из HTML-разметки, CSS-стиля и JavaScript-кода.

HTML-разметка определяет форму для ввода фактического и приближенного значений, а также кнопку для запуска расчета погрешностей. Результаты расчета отображаются в специальном контейнере.

JavaScript-код выполняет расчеты погрешностей при нажатии на кнопку. Функция calculateErrors() получает значения из полей ввода, проверяет их на корректность, а затем вычисляет абсолютную и относительную погрешности. Результаты отображаются в виде текста с помощью innerText.

Программа также предусматривает обработку ситуации, когда введены некорректные значения или когда введено нечисловое значение. В этом случае выводится соответствующее сообщение о необходимости ввода корректных значений.

Ниже представлен скрипт, который используется для вычисления абсолютной и относительной погрешностей:

```
<script>
function calculateErrors() {
    const actualValueParseFloat = document.getElementById('actualValue').value;
    const approximateValue = parseFloat(document.getElementById('approximateValue').value);
    if (isNaN(actualValue) || isNaN(approximateValue)) {
        document.getElementById('result').innerText = 'Пожалуйста, введите корректные значения.';
        return;
    }
    const absoluteError = Math.abs(actualValue - approximateValue);
    const relativeError = Math.abs((actualValue - approximateValue) / actualValue) * 100;
    const resultMessage = `Абсолютная погрешность: ${absoluteError.toFixed(5)}
    <br>Относительная погрешность: ${relativeError.toFixed(5)}`;
    document.getElementById('result').innerHTML = resultMessage;
}</script>
```

Функция начинается с извлечения значений фактического и приближенного из HTML-элементов с

помощью метода getElementById(). Затем проверяется, являются ли введенные значения числами с помощью isNaN(). Если хотя бы одно из значений не является числом, выводится сообщение об ошибке.

В случае корректных введенных значений, функция вычисляет абсолютную погрешность, вычитая приближенное значение из фактического и применяя функцию Math.abs() для получения абсолютного значения. Затем вычисляется относительная погрешность делением абсолютной погрешности на фактическое значение, умноженное на 100 для получения процентного значения.

Затем создается строка resultMessage, содержащая результаты расчетов. Данные выводятся в HTML-элементе с идентификатором 'result' с помощью свойства innerHTML, чтобы отобразить разметку HTML, которая включает в себя вычисленные значения абсолютной и относительной погрешностей.

Код является примером простого и понятного интерактивного веб-сайта для расчета погрешностей, который может быть легко встроен на веб-страницу для использования конечными пользователями.

1. В ходе данной работы была проведена обширная аналитическая работа, направленная на изучение предметной области вычислительного метода и анализа существующих программных продуктов в этой области.

2. В результате исследования были рассмотрены элементарная теория погрешностей, алгебра матриц, методы решения систем линейных уравнений, нелинейных уравнений, а также методы решения дифференциальных уравнений. Также проведен обзор техник и технологий создания и разработки программного обеспечения, что является важным для дальнейшего развития программного продукта в современном мире.

3. Также были рассмотрены прецеденты использования, моделирование деятельности, классов, взаимодействия и моделирование прецедентов использования, что позволило разработать более полное представление о функциональности и структуре программного продукта.

4. Описана реализация программы для решения задач вычислительного метода математики. Были рассмотрены основные этапы реализации программы с учетом выбранного языка программирования. Также проведено сравнение результатов задач, решенных с использованием разработанной программы, с результатами, полученными с использованием других программных продуктов.

На основе выполненной работы можно сделать вывод о том, что разработанная программа представляет собой эффективный инструмент для решения различных задач вычислительного метода раздела математики, процесса математической подготовки студентов технических направлений вузов. Сравнение результатов с другими программами подтверждает корректность работы программы и ее потенциал в решении математических задач. Разработка веб-интерфейса также обеспечивает удобство использования программы для широкого круга пользователей.

В дальнейшем планируется расширение функциональности программы, улучшение интерфейса и предоставление пошагово решения пользователям.

### Литература

1. Рахимов, А. А. Компьютерное моделирование как один из способов повышения эффективности обучения по высшей математике в техническом вузе // Вестник Костромского государственного университета. Серия: Педагогика. Психология. Социокинетика. – 2023. – Т. 29. – № 2. – С. 132–143.
2. Рахимов, А. А. Компьютерное моделирование как один из способов математической подготовки студентов в техническом вузе / А. А. Рахимов, Ф. Джалилов, М. М. Комилов // Психологопедагогические и лингвокультурологические исследования: от теории к практике : Материалы XII Всероссийской научно-практической конференции, Москва, 08 июня 2023 года. – Москва : ООО «Академ-пресс», 2023. – С. 122–128. – EDN AWQSGO.
3. Гуломнабиев С. Г. Оид ба истифодай барномаи Maple дар раванди таълим / С. Г. Гуломнабиев // Вестник Педагогического университета. Серия 2: Педагогики и психологии, методики преподавания гуманитарных и естественных дисциплин. – 2023. – № 4–1(18). – С. 148–157.
4. Нугмонов, М. Методическое обеспечение самостоятельной работы студентов по высшей математике в техническом вузе в условиях кредитной технологии обучения / М. Нугмонов, А. А. Рахимов // Вестник Педагогического университета. 2013. – № 5–2(54). – С. 200–205.
5. Аминова, З. А. Методика использования занимательных заданий в процессе обучения математике в 5 классе / З. А. Аминова, А. А. Рахимов // Вестник Челябинского государственного педагогического университета. – 2012. – № 7. – С. 11–20.
6. Абдуллоев, Н. С. Дифференциация обучения высшей математике при интеграции в него информационных технологий в технических вузах / Н. С. Абдуллоев, А. А. Рахимов // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2012. – № 3-2(41). – С. 137–139.
7. Численные методы. Примеры и задачи. Учебно-методическое пособие по курсам «Информатика» и «Вычислительная математика». / Сост.: Ф. Г. Ахмадиев, Ф. Г. Габбасов, Л. Б. Ермолаева, И. В. Маланичев. – Казань : КГАСУ, 2017. – 107 с.
8. Глазырина, Л. Л. Введение в численные методы: учебное пособие / Л. Л. Глазырина, М.М. Карчевский. – Казань : Казан. ун-т, 2017. – 122 с.
9. Киясов Сергей Николаевич, Шурыгин Вадим Вадимович. Дифференциальные уравнения. Основы теории, методы решения задач: Учебное пособие / С. Н. Киясов, В. В. Шурыгин. – Казань : Казанский федеральный университет, 2011. – 112 с.
10. Рахимов, А. А. Использование компьютерного моделирования AUTOCAD в образовательном процессе для студентов технических направлений вуза / А. А. Рахимов // Наука и практика в образовании: электронный научный журнал. – 2024. – Т. 5, № 2. – С. 43–48. – DOI 10.54158/27132838\_2024\_5\_2\_43. – EDN CMTUEX.
11. Рахимов, А. А. Компьютерное моделирование один из способов повышения эффективности обучения по высшей математике в техническом вузе / А. А. Рахимов // Вестник Ботхарского государственного университета имени Носира Хусрава. Серия гуманитарных и экономических наук. – 2023. – № 1–1(107). – С. 147–159. – EDN EISATE.
12. Селиванова, Э. Т. Методика обучения основам компьютерного моделирования в педагогическом вузе и школе: Дисс...канд.пед.наук [Текст] / Э. Т. Селиванова. – Новосибирск, 2000. – 144 с.

A.A. Rakhimov

Polytechnic Institute of Tajik Technical University named after the academician M. Osimi

### SOFTWARE AND SYSTEM REPRESENTATION OF COMPUTER MODELING FOR MATHEMATICAL TRAINING OF STUDENTS AT A TECHNICAL UNIVERSITY

This article discusses the issues of system and software representation of computer modeling of the process of mathematical training of students at a technical university. In addition, various computer programs such as Wolfram Alpha, online calculator and other programs are analyzed in this work. Another version of software development made in the JavaScript program environment is proposed for solving tasks by numerical methods. The use of computer modeling in the process of teaching mathematics increases the quality of education and students' interest in the subject. These programs will be able to help students and teachers at all levels of education in teaching Mathematics.

Software, computer modeling, model, Mathematics, computer programs, Wolfram Alpha program, online calculator, C++, Python, JavaScript.

# МАШИНОСТРОЕНИЕ

## Технология машиностроения

УДК 681.7.068



**Д.А. Воробьев, В.Ф. Булавин, Т.Г. Булавина**  
Вологодский государственный университет

### ЦИФРОВОЕ КОНСТРУКТОРСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

В работе показана реализация конструкторских CAD/CAE решений для узлов оптических систем. Обеспечение стабильной работы в широком диапазоне температур информационных оптических приборов контроля окружающей среды и измерения физических параметров достигается на конструкторском уровне снижением влияния тепловых деформаций. Это достигается путем оптимизации геометрии опорных узлов и выбора материала заготовки. Автоматизация конструкторско-технологических проектов осуществляется на базе CAD-/CAE-платформ.

Цифровое производство, инжиниринг, информационные системы, тепловые деформации.

Цифровое производство опирается на развитие экономики в направлении положений идеологии «Индустрія 4.0/5.0» [1, 2]. Ключевая роль в подготовке материального производства отводится системам интеллектуального проектирования в ходе конструкторско-технологических этапов. Такие системы базируются на CAD-/CAPP-/CAM-/CAE-/CAO-платформах.

Цель работы – продемонстрировать реализацию цифровых производственных технологий в среде малых и средних приборостроительных предприятий и масштабирование компетенции в области CAD-/CAE-моделирования и проектирования.

Для оптических информационно-измерительных систем предъявляются жесткие требования к механическим узлам, что обусловлено необходимостью обеспечения геометрической точности для всех поверхностей деталей и их взаимной ориентации между собой. Одним из наиболее важных технологических аспектов в процессе изготовления и эксплуатации изделия является стабильность конструктивных форм и геометрических размеров узлов и деталей при воздействии различных климатических факторов [3, 4].

Узел оптического прибора представлен платформой излучающей системы (рис. 1). На базовую поверхность детали «Основание» устанавливаются составные части из общей сборки измерительного канала. Деталь имеет сложную топологическую геометрию, что определяется особенностью конструктивной схемы прибора. На поверхности изделия имеются опорные пластины, технологические и конструктивные элементы. Крепление узла в общую сборку прибора осуществляется тремя цилиндрическими винтами, для чего в опорной части предусмотрены соответствующие отверстия.

Вырез A (рис. 1) является областью расположения светоизлучающих оптоэлектронных компонентов. Термоабберрация светового потока в этой области, связанная с климатическими факторами, обуславливает возникновение погрешности в работе информационного оптического канала [3, 4].

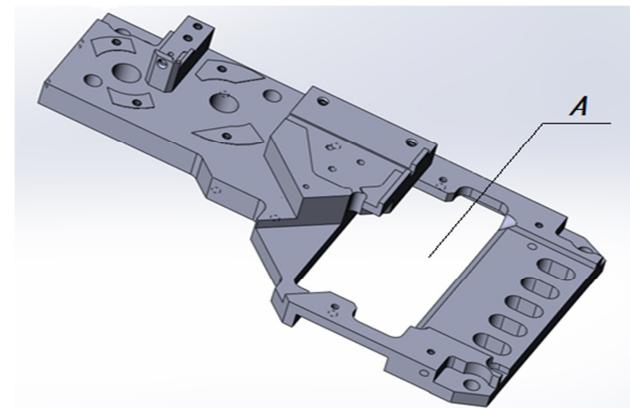


Рис. 1. Основание излучающей системы

**Методы проектирования.** Цифровой формат выполнения проектов при конструкторско-технологическом сопровождении предполагает: разработку 3D-двойников деталей, визуализацию узлов и сборок изделий, автоматизированное технологическое обеспечение. Методология проектирования – реализация методов 3D-визуализации и моделирования, а также инжиниринг через функционал CAD-/CAPP-/CAO-/CAE-приложений [5–12].

В ходе выполнения проекта обязательным условием является инженерное обеспечение для прочностного и термодеформационного моделирования деталей и узлов. Для оценки распределения тем-

пературных деформаций в объеме детали необходимо провести имитационные испытания с применением САЕ-системы [5–12].

**САЕ-моделирование.** Составной частью конструкторского этапа подготовки является создание 3D-прототипов всех деталей с формированием рабочих чертежей и отображением всех сопровождающих атрибутов [5–12]. На рисунке 1 представлен 3D-двойник детали «Основание».

Физические свойства материалов в элементах конструкции при заданных габаритах и конфигурации могут отличаться от тех, которые планировались на этапе технического задания. Как следствие, получаемые прочностные свойства детали оказываются ниже тех, что предсказаны по стандартным механическим характеристикам. К числу мероприятий, позволяющих решить проблемы термодеформаций, относятся конструктивные изменения деталей, использование специальных сплавов и элементов охлаждения и компенсации перемещений [3, 4].

Алгоритм виртуального эксперимента в САЕ-модуле включает в себя: импорт трехмерной модели детали из CAD-системы; задание основных физических свойств материала; закрепление исследуемой детали в местах фиксации детали в реальном приборе; приложение нагрузок и настройка системы измерения; разбиение модели на конечные элементы (КЭ) с созданием сетки; анализ полученных результатов.

Заданные параметры сетки (max и min размеры КЭ, тип сетки, используемое разбиение) и высокая плотность разбиения в областях детали, где возможны максимальные деформации, позволяют получить приемлемые результаты. Конечно-элементная модель де-

тали «Основание», полученная в САЕ-платформе, представлена на рисунке 2. Достоверность эксперимента напрямую зависит как от постановки задачи, так и от параметров сетки.

При формулировании математической модели приняты во внимание следующие допущения: расчет производится при условии равномерного нагрева; предполагается изотропность материала; отсутствуют остаточные напряжения в материале детали [5–12].

Результат инженеринга визуализируется полем, характеризующим распределение напряжений, деформаций и перемещений с лентой числовых значений. На рисунках 3 и 4 представлены данные моделирования при температуре  $t=-50^{\circ}\text{C}$  детали «Основание».

Результаты свидетельствуют о том, что значения термонапряженй находятся в зоне допустимых (меньше предела текучести) величин, а цветовая легенда деформаций в модели позволяет выявить наиболее опасное сечение в детали. Выводы находят подтверждение из данных по эквивалентным перемещениям в области расположения светозадающих элементов прибора.

Значение максимальной деформации наблюдаем из рисунка 4: максимальная величина составляет  $\sim 0,00335$ , а минимальная  $\sim 0,00003$ .

Значение максимального перемещения 0,054 мм. Минимальное перемещение наблюдается около наружных граней, там, где деталь конструктивно наиболее надежна. Значение минимального перемещения 0,001 мм. Все изображения модели на рисунках показаны в масштабе деформируемого состояния.

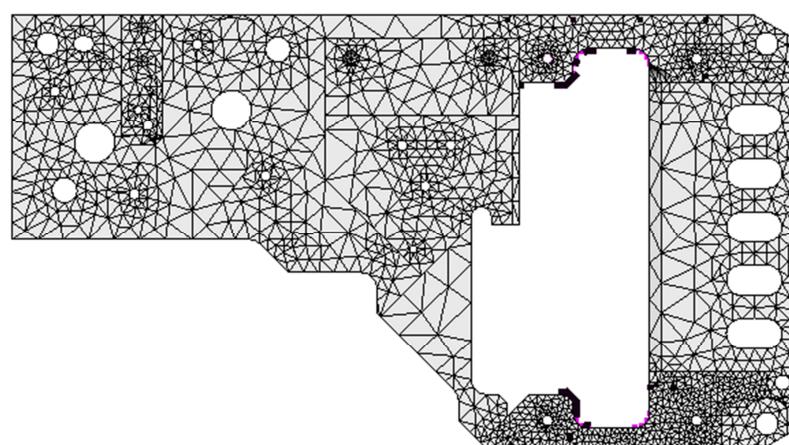


Рис. 2. Результат разбиения модели на конечные элементы



Рис. 3. Карта распределения напряжений в изделии (сплав АМГ-6)

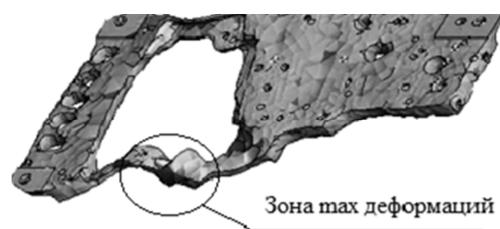


Рис. 4. Карта распределения деформаций в изделии (сплав АМГ-6)

## Результаты инженерного анализа базовой конфигурации детали

| $t, (^{\circ}\text{C})$ | -50   | -40   | -30   | -20   | -10  | 10    | 20    | 30    | 40    | 50    |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| URES max, (мм)          | 0,052 | 0,040 | 0,032 | 0,026 | 0,02 | 0,008 | 0,002 | 0,003 | 0,009 | 0,015 |

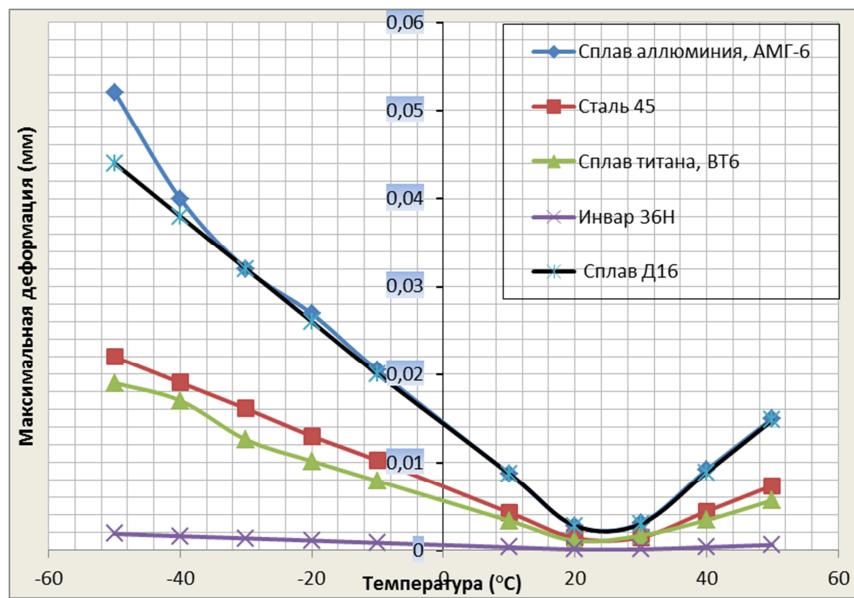


Рис. 5. Результаты исследования деформаций в опасном сечении при различных материалах исполнения детали «Основание»

Для представления полной картины возникающих искажений в опасной зоне необходимо моделирование термодеформаций детали во всем температурном диапазоне ( $-50^{\circ}\text{C} \div +50^{\circ}\text{C}$ ). Шаг, с которым проводились испытания, составляет  $10^{\circ}\text{C}$ . Результаты исследования приведены в таблице.

В первой строке записана температура, при которой проводилось моделирование. Вторая строка представляет значения максимального перемещения в точке наибольших температурных деформаций.

На основании проведенного инженерного анализа в САЕ-модуле делаем следующее заключение:

- ✓ в результате температурного воздействия изначальная геометрия детали «Основание» нарушается;
- ✓ наблюдаем максимальные деформации и перемещения на участке расположения источника излучения;
- ✓ нестабильность в геометрии формы детали в этой зоне приведет к оси светового потока и погрешности на выходе измерительного канала;
- ✓ материал (сплав АМГ-6) является неприемлемым в базовой конфигурации детали прибора при воздействии температурных нагрузок.

**Подбор материала заготовки.** Вопрос выбора материала заготовки изделия может быть решен путем многовариантного САЕ-моделирования для базовой геометрии детали, выполненной из сплавов с различными коэффициентами температурного расширения [5–12]. На рисунке 5 даны кривые, полученные

при симуляции тепловых деформаций в температурном диапазоне  $-50^{\circ}\text{C} \div +50^{\circ}\text{C}$ .

Анализ показывает, что наибольшая прецизионность наблюдается в конструкции, выполненной из инварного сплава 36Н. При этом значение максимального перемещения составляет 0,0018 мм, что в  $\sim 30$  раз меньше результатов в базовом варианте. Удаление максимального значения деформации до минимальной величины составляет  $\sim 0,0005$  мм, что в сравнении с предыдущими материалами показывает наилучшую размерную стабильность.

**Минимизация температурных и остаточных деформаций.** Требования к постоянству геометрической формы и размеров деталей должны обеспечиваться при длительной эксплуатации во всем температурном диапазоне работы прибора. Решение такой задачи сопровождается конструкторско-технологическими средствами. К ним относятся: усиление ослабленных зон путем добавления ребер жесткости, разбиение базового варианта детали на части с целью исключения областей, в которых наблюдаются максимальные деформации, использование сплавов с меньшим коэффициентом температурного расширения и высокой стабильностью фазового и структурного состояния. Далее, при технологических операциях использование специальных методов стабилизирующей обработки, применение операций для снятия остаточных напряжений внутри деталей, возникающих при механической обработке, и комбинирование сочетаний всех перечисленных мер [3, 4].

Наконец, снижение вредных остаточных напряжений увеличивает срок службы деталей и их надежность во время использования [13].

**Конструктивная доработка детали.** Жесткость деталей является одним из показателей качества оптических приборов. Недостаточная жесткость приводит к потере точности при металлообработке, что влияет на рабочие свойства прибора. Повышение этого параметра без существенного увеличения массы возможно следующими конструктивными методами: замена изгиба растяжением/сжатием; увеличение моментов инерции критических сечений; усиление зон перехода от одного сечения к другому; расстановка опорных стенок для деталей, работающих на изгиб; введение поперечных и диагональных связей [3, 4].

Упрочнение деталей конструкции за счет снижения внутренних напряжений можно достичь за счет применения ребер жесткости в наиболее нагруженных областях. Ребра жесткости дают возможность обеспечить размерную стабильность детали без существенных доработок и без дополнительных трудозатрат. Эти конструктивные элементы используются в целях стабильности основных эксплуатационных свойств, уменьшения напряжений в тонкостенных деталях. Ребра жесткости распределяют нагрузки по длине и площади, обеспечивают равностенность детали, что важно при технологическом процессе механообработки. При этом наблюдается несущественное увеличение массы изделия [3, 4].

Соблюдая требования по конфигурации, осуществлена модификация геометрии детали «Основание» в зонах наибольших деформаций. Результат конструкторских доработок представлен на рисунке 6.

Рис. 6. Модифицированная геометрия детали «Основание» с усилением деформируемых зон

Данное конструктивное решение не влечет изменений приборного узла измерительного комплекса, изменения заготовки детали, также не приводит к пересмотру технологии процесса сборки и юстировки блока. Предлагаемый вариант усиленной конструкции не нарушает критерия технологичности.

Результаты моделирования модифицированного варианта детали с позиции максимальных деформаций во всем температурном диапазоне представлены на рисунке 7. Отмечается снижение на ~30 % критического показателя в области низких температур для сплава АМГ-6.

| Температура (°C) | Максимальная деформация (Усиленный вариант) (мм) | Максимальная деформация (Базовый вариант) (мм) |
|------------------|--|--|
| -50              | 0,035  | 0,055  |
| -40              | 0,030  | 0,045  |
| -30              | 0,028  | 0,035  |
| -20              | 0,025  | 0,028  |
| -10              | 0,018  | 0,022  |
| 0                | 0,012  | 0,015  |
| 10               | 0,005  | 0,008  |
| 20               | 0,002  | 0,005  |
| 30               | 0,002  | 0,003  |
| 40               | 0,008  | 0,010  |
| 50               | 0,015  | 0,025  |

Рис. 7. Результаты инженеринга усиленного и базового вариантов конструкции (сплав АМГ-6)

62

Доработка изделия с уровня конструкторского сопровождения продолжается на этапе технологического обеспечения. Несмотря на приемлемые показатели для некоторых материалов при окончательном выборе сплава заготовки необходимо принять во внимание технологические, стоимостные и другие факторы. Окончательный выбор материала детали может быть сделан после испытаний в климатической камере как отдельного светоформирующего блока, так и всего измерительного комплекса. С технологической точки наиболее перспективным, вероятно, является сплав Д16.

### Заключение

1. Выполненные исследования по моделированию и контролю термической стабильности при производстве элементов информационных оптических приборов демонстрируют эффективные подходы на основе интеллектуальных инженерных САЕ-платформ.

2. Углубление компетенций в области цифрового проектирования и моделирования конструкторов и технологов приводят к повышению автоматизации и интеллектуализации труда, позволяют выполнять проекты в более короткие сроки и с улучшенными техническими показателями.

3. В рамках решения исходной задачи наглядность полученных результатов добавляет к методологии инжиниринга прецизионных узлов оптических измерительных систем дополнительную универсальность.

### Литература

1. Боровков, А. И., Рябов, Ю. А. Перспективные направления развития передовых производственных технологий в России // Материалы XVII Апрельской междунар. науч. конф. по проблемам развития экономики и общества, Москва, 19–22 апр. 2016 г. – Москва : НИУ ВШЭ, 2017. – Т. 3. – С. 381–389.

2. Цифровое производство. Методы, экосистемы, технологии. Рабочий доклад Департамента корпоративного обучения Московской школы управления «Сколково», ноябрь 2017. – URL: [http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/11\\_november/17/tsifrovoe\\_proizvodstvo\\_112017.pdf](http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/11_november/17/tsifrovoe_proizvodstvo_112017.pdf) (дата обращения: 27.03.2024).

3. Латыев, С. М. Конструирование точных (оптических) приборов : кнчебное пособие. – Санкт-Петербург : Политехника, 2007. – 579 с.

4. Латыев, С. М. Компенсация погрешностей в оптических приборах. – Ленинград : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 248 с.

5. Булавин, В. Ф. Политика цифровых технологий на малых машиностроительных предприятиях / В. Ф. Булавин, В. В. Яхричев, А. С. Степанов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2019, № 9. – С. 35–45, DOI: 10.18698/0536-1044-2019-9-35-45.

6. Булавин, В. Ф. Цифровой формат подготовки приборостроительного производства. Ч. II. Технологический этап / В. Ф. Булавин, Т. Г. Булавина, В. В. Яхричев, А. С. Степанов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение, 2020, № 3. – С. 250–256. doi.org/10.17586/0021-3454-2020-63-3-250-256

7. Bulavin, V. F. Digital design and technological innovation in the small machine building sector / V. F. Bulavin, T. G. Bulavina, V. V. Yahrlichev, A. S. Stepanov, N. S. Grigoriev // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series, 2020, vol. 939, pp. 012016, DOI:10.1088/1757-899X/939/1/012016.

8. Bulavin, V. F. Digital Space of Small Enterprises in Engineering / V. F. Bulavin, T. G. Bulavina, A. S. Stepanov // Lecture notes in networks and systems (Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020)). – 2021. – V. 2– P. 462-468. doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9\_54.

9. Булавин, В. Ф. САО/САЕ-инженерное сопровождение производства малых предприятий / Т. Г. Булавина, Д. В. Кошутин, И. С. Петряшов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2022, – № 8. – С. 47–54. DOI: 10.18698/0536-1044-2022-8-47-54.

10. Булавин, В. Ф. Цифровые технологические инновации в малых машиностроительных предприятиях / В. Ф. Булавин, Т. Г. Булавина // Вестник Вологодского государственного университета. – 2024. – № 2 (24). – С. 55–58.

11. Булавин, В. Ф. CAD-автоматизация проектирования на малых предприятиях / В. Ф. Булавин, Т. Г. Булавина // Вестник Вологодского государственного университета. – 2022. – № 2 (16). – С. 48–50.

12. Булавин, В. Ф. Цифровое проектирование в малых машиностроительных предприятиях / В. Ф. Булавин, Т. Г. Булавина // Вестник Вологодского государственного университета. – 2022. – № 4 (18). – С. 50–52.

13. Цифровые интеллектуальные экосистемы в экономике и промышленности: монография под ред. д-ра экон. наук, проф. А. В. Бабкина. – Санкт-Петербург : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – 398 с.

**D.A. Vorobyov, V.F. Bulavin, T.G. Bulavina**  
Vologda State University

### DIGITAL DESIGN SUPPORT FOR INSTRUMENT MANUFACTURING

The paper shows the implementation of CAD/CAE design solutions for optical system nodes. Ensuring stable operation in a wide temperature range of information optical devices for environmental monitoring and measurement of physical parameters is achieved at the design level by reducing the influence of thermal deformations. This is achieved by optimizing the geometry of the support nodes and choosing the material of the workpiece. Automation of design and technological projects is carried out on the basis of CAD/CAE platforms.

Digital manufacturing, engineering, information systems, thermal deformations.

## ***Наземные транспортно-технологические средства и комплексы***

УДК 665.7.035



**Л.М. Воропай, Н.В. Курилова,**

**М.А. Назарова, О.Л. Белков**

*Вологодский государственный университет*

### **ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ОТРАБОТАННЫХ МОТОРНЫХ МАСЕЛ НА СПОСОБ ИХ УТИЛИЗАЦИИ**

Представлены результаты определения качества моторного масла по фракционному составу и установлено влияние химического состава масла на его эксплуатационные характеристики. Для анализа использовали образцы отработанного и свежего масел марки 10W40 производителя «Лукойл». Установлено, что при эксплуатации масел изменяется фракционный состав и наблюдается уменьшение содержания низкокипящих фракций. По изменению фракционного состава рекомендуется выбирать способ рециклинга отработанных масел.

Масло, фракционный состав, рециклинг, вязкость, щелочное число, йодное число, диспергирующие свойства, температура вспышки.

Эксплуатационные характеристики моторных масел зависят от многих факторов, включая способы их получения, условия эксплуатации. В зависимости от способов получения и от химического состава выделяют четыре вида масел: минеральные, органические, синтетические и полусинтетические [1]. На рынке Вологодской области чаще используют синтетические и полусинтетические моторные масла, которые получают в результате катализитического крекинга нефтепродуктов. Продуктами крекинга являются фракции предельных ароматических и непредельных углеводородов. Алканы и ароматические углеводороды не склонны к реакциям окисления в условиях эксплуатации транспорта. Напротив, алкены легко окисляются с образованием нагаров на поверхности металлов, что вызывает преждевременное старение и коррозию. За счет окисления также изменяется химический состав масел и эксплуатационные характеристики: вязкость, щелочное и йодное числа, температура вспышки, диспергирующие свойства, фракционный состав, содержание влаги и зольных примесей [2].

Для определения срока и условий эксплуатации моторных масел, для выбора способов их переработки и утилизации определяют качество. Одним из важнейших показателей качества масел, который отсутствует в ГОСТе, является фракционный состав. Именно по изменению относительного содержания фракций алканов, аренов и алкенов можно определить качество масел и сделать вывод о возможности его дальнейшего использования или способов рециклинга [3–7].

В связи с этим была поставлена цель – определить качество моторного масла по фракционному составу и установить влияние химического состава масла на его эксплуатационные характеристики. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1) определить основные эксплуатационные характеристики моторных масел и сравнить их с показате-

лями ГОСТа: кинематическую вязкость, индекс вязкости, наличие механических примесей и воды, щелочное число, температуру вспышки, моющие диспергирующие свойства;

2) методом фракционной перегонки установить и сравнить изменение фракционного состава свежих масел и масел, бывших в эксплуатации;

3) установить зависимость фракционного состава масел и эксплуатационных характеристик.

Работа по определению качества эксплуатационных материалов выполнялась совместно с организацией «Центр судебно-экспертной помощи».

Для анализа в лабораторию Вологодского государственного университета поступили образцы отработанного и свежего масел марки 10W40 производителя «Лукойл», которые являются предметом исследования.

Объект исследования – изменение фракционного состава масел при его эксплуатации.

При выполнении эксперимента пользовались следующими методами: вискозиметрический, гравиметрический, титриметрический, метод фракционной перегонки, метод определения температуры вспышки и хроматографический метод.

Анализ масел проводился по следующим показателям: кинематическая вязкость при температурах 100, 50, 40 °C; индекс вязкости; наличие механических примесей и воды; щелочное число, температура вспышки, моющие диспергирующие свойства; наличие посторонних компонентов (изопропанола, этиленгликоля).

Кинематическую вязкость определяли по формуле:

$$\nu_t = \frac{\eta_t}{\rho_t}, \quad (1)$$

где  $\nu_t$  – кинематическая вязкость;

$\rho_t$  – плотность.

С учетом показателя кинематической вязкости рассчитывают по номограмме индекс вязкости.

Наличие механических примесей находят методом разбавления масла в бензине с последующим перемешиванием и отстаиванием. Для определения содержания воды в пробах масел используют безводный сульфат магния, который в присутствии воды легко гидратируется с выделением теплоты. По изменению температуры масел при добавлении к ним соли рассчитывают содержание воды. Щелочное и йодное число находят методом титрования. Оценку содержания энергетических компонентов в масле определяют по температуре вспышки в приборе «ТВЗ-2-ПХП». Моющие диспергирующие свойства исследуют хроматографическим анализом. По диаметру масляного пятна анализируют степень окисления, загрязнения и моющие свойства масла. Наличие посторонних компонентов в масле определяют методами титрования и фотоэлектроколориметрии. Результаты эксперимента оценки качества масел представлены в таблице 1.

Анализ полученных результатов свидетельствует, что после эксплуатации масел меняется значение кинематической вязкости, увеличивается щелочное число, уменьшаются диспергирующие свойства, а также

фракционный состав. Поэтому для рециклинга отработанных масел рекомендуется добавлять низкомолекулярные и среднемолекулярные фракции углеводородов, которые присутствуют в свежих маслах.

Наиболее точным показателем изменения качества моторного масла является фракционный состав углеводородов. Поэтому на втором этапе определяли фракционный состав масел, используя аппарат для перегонки нефтепродуктов. По температурам перегонки (до 70, 70–120, 120–200, более 200 °C) выделяем 4 фракции масел и определяем их объем. Результаты представлены в таблице 2.

В анализируемых свежих маслах преобладают фракции углеводородов с температурами кипения выше 120 °C. Именно эти фракции определяют смазывающие и стабилизирующие свойства масел. Результаты свидетельствуют, что при перегонке выделяют три жидкые фракции и одну густую фракцию, которая остается на дне и при стоянии образует твердый остаток – карбост. Он состоит из высокомолекулярных соединений, а также окисленных углеводородов. В нем всегда присутствуют добавки, которые вводят в масла для придания им определенных свойств.

Таблица 1

#### Эксплуатационные характеристики моторных масел

| Характеристики   | Масло свежее 10W40 | Масло отработанное, 10W40 (1000 км) | Масло отработанное, 10W40 (3000 км) |
|--|--------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Вязкость кинематическая при температуре 100 °C, мм <sup>2</sup> /с | 15,3               | 14,2                                | 13,8                                |
| Вязкость кинематическая при температуре 50 °C, мм <sup>2</sup> /с  | 98,7               | 95,8                                | 95,4                                |
| Вязкость кинематическая при температуре 40 °C, мм <sup>2</sup> /с  | 107,2              | 102,8                               | 102,3                               |
| Индекс вязкости  | 110                | 71                                  | 70                                  |
| Содержание воды по номограмме, %                                   | 0,5                | 10–11                               | 9–10                                |
| Наличие механических примесей                                      | -                  | +                                   | +                                   |
| Щелочное число, мг/г   | 1,1                | 1,52                                | 1,6                                 |
| Температура вспышки, °C  | 238                | 212–214                             | 212                                 |
| Диспергирующие свойства по методу капельной пробы                  | 0,72               | 0,45                                | 0,43                                |
| Остаточное содержание спиртов, %                                   | -                  | 0,79                                | 0,82                                |

Таблица 2

#### Результаты эксперимента по определению фракционного состава масел

| № опыта                             | Объем фракций при температурах, % |           |            |
|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------|------------|
|                                     | до 70 °C                          | 70–120 °C | 120–200 °C |
| Масло свежее 10W40                  |                                   |           |            |
| 1                                   | 12,6                              | 32,4      | 52,8       |
| 2                                   | 11,8                              | 33,5      | 49,6       |
| 3                                   | 12,4                              | 31,82     | 53,71      |
| Масло отработанное, 10W40 (1000 км) |                                   |           |            |
| 1                                   | 11,42                             | 33,67     | 53,26      |
| 2                                   | 10,84                             | 34,72     | 50,14      |
| 3                                   | 10,32                             | 33,87     | 54,72      |
| Масло отработанное, 10W40 (3000 км) |                                   |           |            |
| 1                                   | 5,4                               | 36,72     | 49,8       |
| 2                                   | 6,1                               | 36,82     | 48,4       |
| 3                                   | 6,3                               | 37,24     | 47,72      |

При эксплуатации масел изменяется фракционный состав. Наблюдается уменьшение содержания низкокипящих фракций и увеличение содержания высококипящих. Этот процесс называется «усадкой масел» и они происходят не только за счет испарения, но и за счет реакций окисления, димеризации и полимеризации. Уменьшение содержания низкокипящих фракций вызывают изменение эксплуатационных характеристик и их постепенное старение. После старения масел встает вопрос их способов рециклинга или утилизации. Выбор способов определяется по химическому составу. На практике используют следующие способы рециклинга:

1) физический – отстаивание, фильтрация, отгон топливных фракций, центрифugирование, промывка водой, вакуумная перегонка и др.;

2) физико-химический – коагуляция загрязнений поверхностно-активными веществами, контактная очистка отбеливающими глинами, селективная очистка пропаном, фенолом, фурфуролом и др.;

3) химический – сернокислый, щелочной, гидрогенизационный.

Наиболее доступным способом рециклинга отработанных масел является физический способ. Однако он имеет ограничения и используется только в тех случаях, если вязкость масел изменяется в сравнении с исходным значением при изменении температуры на 10–15 °С. При увеличении этого показателя выше представленного значения нельзя подвергать рециклингу масло физическим способом.

Рекомендуется рециклинг проводить ультразвуковым способом обработки отработанных масел. Ультразвук вызывает диспергирование, гомогенизацию, повышение температуры, уменьшения вязкости. При этих процессах также меняется химический состав – уменьшается содержание плохо растворимых веществ и осадка. Этот способ регенерации не требует дорогостоящего оборудования, больших производственных площадей и имеет преимущество перед другими способами.

Таким образом, на основании выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

1) при эксплуатации моторных масел наблюдается изменение их фракционного состава и эксплуатационных характеристик;

2) по изменению фракционного состава моторных масел можно определить способ их рециклинга.

### Литература

1. Итинская, Н. И. Топливо, масла и технические жидкости [Текст] / Н. И. Итинская, Н. А. Кузнецов. – Москва : Агропромиздат, 1989. – 205 с.

2. Кириченко, Н. Б. Автомобильные эксплуатационные материалы : практикум [Текст] / Н. Б. Кириченко. – Москва : Академия, 2004. – 96 с.

3. ГОСТ 33-2016. Нефть и нефтепродукты. Прозрачные и непрозрачные жидкости. Определение кинематической и динамической вязкости [Текст]. – Взамен ГОСТ 33-2000 ; введ. 2018-01-07. – Москва : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации ; М. : Российский институт стандартизации, 2021. – 36 с. – (Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу)

4. ГОСТ 25371-2018. Нефтепродукты. Расчет индекса вязкости по кинематической вязкости [Текст]. – Взамен ГОСТ 25371-97 ; введ. 2019-01-07. – Москва : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации ; М. : Стандартинформ, 2018. – 12 с. – (Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу)

5. ГОСТ 4333-2021. Нефтепродукты. Методы определения температур вспышки и воспламенения в открытом тигле [Текст]. – Взамен ГОСТ 4333-2014 ; введ. 2022-01-07. – Москва : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации ; М. : Российской институт стандартизации, 2021. – 20 с. – (Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу)

6. ГОСТ 11362-96. Нефтепродукты и смазочные материалы. Число нейтрализации. Метод потенциометрического титрования [Текст]. – Взамен ГОСТ 11362-76; введ. 1997-01-07. – Минск : Межгосударственный стандарт ; Москва : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1997. – 16 с. – (Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу).

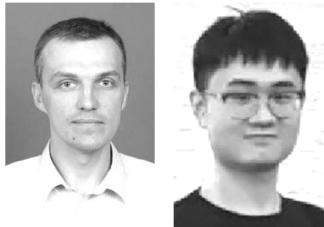
7. ГОСТ 3900-2022. Нефть и нефтепродукты. Методы определения плотности [Текст]. – Взамен ГОСТ 3900-85; введ. 2023-01-01. – Москва : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации ; М. : Российский институт стандартизации, 2023. – 134 с. – (Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу).

*L.M. Voropai, N.V. Kurilova, M.A. Nazarova, O.L. Belkov  
Vologda State University*

## INFLUENCE OF WASTE MOTOR OILS CHEMICAL COMPOSITION ON THEIR DISPOSAL METHOD

The results of determining the quality of motor oil by fractional composition are presented and the influence of the chemical composition of the oil on its performance characteristics is established. Samples of used and fresh oils of the 10W40 brand from the manufacturer "Lukoil" were used for the analysis. It was found that during the operation of oils, the fractional composition changes and a decrease in the content of low-boiling fractions is observed. It is recommended to select a recycling method for used oils based on the change in fractional composition.

Oil, fractional composition, recycling, viscosity, base number, iodine number, dispersing properties, flash point.



*А.П. Корнеев<sup>1</sup>, Итонг Ню<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Белорусско-Российский университет,*

<sup>2</sup>*Universiti Sains Malaysia*

## ВОПРОСЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

В настоящее время электромобили являются одними из наиболее перспективных альтернативных транспортных средств, которые способны снизить зависимость от нефтепродуктов и уменьшить выбросы вредных веществ в атмосферу. Рассмотрены история возникновения и развития электромобилей; причины, по которым автомобили с внутренним сгоранием вытеснили электромобили в начале XX века; причины популярности электромобилей в настоящее время. Представлены опасности, которые могут возникать при использовании электромобилей, которые требуют дополнительного изучения и регулирования. Рассмотрены основные аспекты безопасности и экологической устойчивости электромобилей.

Электромобиль, безопасность, экологическая устойчивость, пожары, батарея, зарядные станции, электромагнитное поле, инфраструктура.

Электромобили становятся все более популярными благодаря своей экологической устойчивости и эффективности. Однако прежде чем широко внедрять электромобили в повседневную жизнь, необходимо изучить и оценить потенциальные риски и опасности, связанные с их использованием. В данной статье представлен обзор основных факторов, которые могут повлиять на безопасность и экологическую устойчивость электромобилей.

Самый экологичный вид автомобиля сегодня – это электромобиль. Электромобили не выбрасывают вредные выбросы в атмосферу, так как они работают на электрической энергии, а не на горючем топливе. Они также обладают высокой энергоэффективностью и могут быть заряжены от возобновляемых источников энергии, таких как солнечная или ветровая энергия. Электромобили также имеют более низкий уровень шума и вибрации, что делает их более комфортными для пассажиров и окружающей среды.

История возникновения и развития электромобилей начинается задолго до появления автомобилей с внутренним сгоранием.

Разработки электродвигателей такими личностями, как Бенджамин Франклайн, привели к появлению идей для электромобилей [1]. Изобретение первой модели электромобиля приписывают разным людям. В 1828 году венгерский священник и физик Аньеш Едлик изобрел первый тип электрического двигателя и создал небольшую модель автомобиля, приводимого в действие его новым мотором. Между 1832 и 1839 годами шотландский изобретатель Роберт Андерсон также изобрел примитивный электрический экипаж. В 1835 году профессор Сибрандус Стратинг из Гронингена, Нидерланды, и его помощник Кристофер Беккер из Германии также создали небольшой электромобиль, работающий на неперезаряжаемых первичных элементах [2].

Примитивные электрические экипажи были впервые изобретены в конце 1820–1830-х годов. В 1828 году французский изобретатель Годфри Киффер разработал первый электрический автомобиль, который был оснащен электрическим двигателем и свинцово-кислотными аккумуляторами. Однако в то время технологии были несовершенными, и электромобили не получили широкого распространения.

Вероятно, первый электромобиль для перевозки людей с собственным источником питания был испытан на парижской улице в апреле 1881 года французским изобретателем Гюставом Труве. В 1880 году Труве улучшил эффективность небольшого электродвигателя, разработанного компанией Siemens (по проекту, приобретенному у Иоганна Кравогля в 1867 году) и, используя недавно разработанную аккумуляторную батарею, установил ее на английский трехколесный велосипед Джеймса Старли, таким образом, изобретя первый в мире электромобиль. Хотя он был успешно протестирован 19 апреля 1881 года на улице Валуа в центре Парижа, он не смог его запатентовать. Труве быстро адаптировал свой мотор на батарейках к морской тяге; чтобы упростить транспортировку своего морского оборудования в мастерскую на близлежащей реке Сене и обратно, Труве сделал его портативным и снимаемым с лодки, таким образом изобретя подвесной мотор. 26 мая 1881 года прототип 5-метровой лодки Trouvé, названный Le Téléphone, развил скорость 3,6 км/ч (2,2 мили в час) вверх по течению и 9,0 км/ч (5,6 миль в час) вниз по течению [3].

В самом начале позапрошлого века было несколько попыток создания электромобиля, но успеха они не имели. Этим делом занимался даже небезызвестный изобретатель Никола Тесла, но вот ему это тоже не сильно удалось. А вот российский изобретатель Ипполит Владимирович Романов смог построить вполне подходивший для массовой эксплуатации автомо-

биль, хотя он тоже не стал массовым, но не потому, что не подходил по своим эксплуатационным характеристикам, а просто потому, что бензиновые двигатели оказались более практичными и экономическими.

Первый электрический самодвижущийся аппарат, готовый к массовому использованию, появился в 1889 году, когда Романов продемонстрировал на публике двухместный самодвижущийся экипаж. Работы финансировал предприниматель Петр Фрезе, благодаря которому имелась возможность не только создать несколько модификаций, но и спустя 10 лет построить первый коммерческий электрический автобус (по-тогдашнему – омнибус). Этот экипаж мог принять 15 пассажиров, весил в снаряженном состоянии чуть больше 1,5 тонны, разгонялся до 11 км/ч и «заправки» аккумуляторных батарей хватало на 70 километров. Предполагалось устраивать «электрические заправки» по всему городу на конечных станциях.

Однако и этой идеи, как и в случае с первым трамваем, в России воплотиться было не суждено. Полный цикл испытаний в городских условиях был закончен в 1901 году, и когда Романов обратился к городским властям Петербурга о выделении финансовых средств, чиновники отказались поддержать проект. Правда, Городская Дума не препятствовала Романову запустить сеть пассажирских омнибусов за его собственные деньги или деньги акционерного общества, однако выдвинула такие кабальные условия, что проект пришлось свернуть и больше к нему не возвращаться. После революции Романов иммигрировал в США, где смог воплотить некоторые свои проекты по разработке электрического транспорта [4].

В начале XX века высокая стоимость, низкая максимальная скорость и малый радиус действия электромобилей с батареями по сравнению с автомобилями с двигателями внутреннего сгорания привели к всемирному сокращению их использования в качестве личного автотранспорта. Электромобили продолжали использоваться для погрузки грузового оборудования и для общественного транспорта, особенно железнодорожного.

Автомобили с двигателем внутреннего сгорания (ДВС) вытеснили электромобили в начале XX века по некоторым причинам:

1. Дальность хода: в то время, электромобили имели ограниченную дальность хода из-за ограниченной емкости аккумуляторов. Автомобили с ДВС могли проехать гораздо большую дистанцию без необходимости перезарядки или замены топлива.

2. Доступность топлива: бензин, необходимый для работы автомобилей с ДВС, был гораздо более доступным и широко распространенным, чем электричество. В то время инфраструктура для зарядки электромобилей была практически отсутствующей.

3. Стоимость: в начале XX века производство автомобилей с ДВС было дешевле, чем производство электромобилей. Это делало автомобили с ДВС более доступными для широкой аудитории.

4. Технологический прогресс: в то время технологии, связанные с ДВС, развивались быстрее, чем технологии электромобилей. Это привело к улучшению производительности и эффективности автомобилей с ДВС.

В 1970-х годах, в связи с необходимостью сокращения выбросов вредных веществ и поиска альтернативных источников энергии, электромобили снова начали привлекать внимание. Они стали интересными для многих автопроизводителей и правительств, которые начали инвестировать в разработку новых технологий и инфраструктуры для электромобилей [6].

В 1990-х годах с развитием литий-ионных аккумуляторов электромобили стали более эффективными и имели большую дальность хода. Крупные автопроизводители, такие как Tesla, Nissan и Chevrolet, начали выпускать электромобили массового производства.

В начале XXI века интерес к электромобилям и транспортным средствам на альтернативном топливе в частном автотранспорте возрос из-за: растущей озабоченности по поводу проблем, связанных с транспортными средствами, работающими на углеводородном топливе, включая ущерб окружающей среде, причиняемый ими выбросами; устойчивости существующей транспортной инфраструктуры, основанной на углеводородах; и усовершенствований в технологии электромобилей.

С 2010 года совокупные продажи полностью электрических автомобилей и микроавтобусов общего назначения достигли 1 миллиона единиц, поставленных по всему миру в сентябре 2016 года, на конец 2019 года в эксплуатации находилось 4,8 миллиона электромобилей, а совокупные продажи легких электромобилей с подключаемыми модулями достигли рубежа в 10 миллионов единиц к концу 2020 года. Мировое соотношение между годовыми продажами электромобилей на батарейках и подключаемых гибридов выросло с 56: 44 в 2012 году до 74: 26 в 2019 году и упало до 69: 31 в 2020 году. По состоянию на август 2020 года полностью электрическая Tesla Model 3 является самым продаваемым в мире подключаемым электрическим легковым автомобилем за все время, насчитывающим около 645 000 единиц [7].

Сегодня электромобили становятся более популярными благодаря своей экологичности и низким операционным расходам. Многие страны внедряют программы по стимулированию продажи электромобилей, включая субсидии и налоговые льготы.

Вместе с развитием электромобилей развивается и инфраструктура для зарядки. В городах и на автомагистралях строятся зарядные станции, а также разрабатываются новые технологии быстрой зарядки.

Будущее электромобилей обещает быть все более перспективным. С развитием батарейных технологий возможно увеличение дальности хода и сокращение времени зарядки. Также ожидается увеличение числа моделей электромобилей и улучшение их производительности.

История развития электромобилей демонстрирует, что они имеют потенциал стать будущим главным

видом транспорта, который поможет уменьшить выбросы вредных веществ и снизить зависимость от нефти.

Однако с развитием технологий и изменением климатических и экологических проблем, интерес к электромобилям возродился. Сегодня многие страны и автопроизводители активно инвестируют в разработку электромобилей и создание соответствующей инфраструктуры.

При использовании электромобилей могут возникать следующие опасности [8]:

#### 1. Пожары.

Существует проблема возникновения пожаров в электромобилях и связанные с ней риски. Основные причины возникновения пожаров – короткое замыкание, перегрев аккумуляторов и аварии. Существующие методы предотвращения пожаров – системы безопасности и контроля температуры аккумуляторов, а также технологии, используемые для минимизации риска возгорания. В случае аварии или неправильного использования аккумуляторов электромобилей, может произойти их перегрев или короткое замыкание, что может привести к возгоранию или пожару.

#### 2. Батареи.

Существует проблема управления и утилизации аккумуляторов электромобилей. Состав и химические вещества, содержащиеся в аккумуляторах, и их потенциальное воздействие на окружающую среду при неправильной обработке или утилизации. Аккумуляторы электромобилей содержат редкие металлы и химические вещества, которые могут быть опасными при неправильной обработке или утилизации. Неконтролируемая выработка и выброс этих веществ может нанести вред окружающей среде.

#### 3. Зарядные станции.

Существует проблема безопасности и эффективности зарядных станций для электромобилей. Меры предосторожности, принимаемые при проектировании и эксплуатации зарядных станций, чтобы предотвратить такие ситуации, включают использование защитных систем и контроль нагрузки. При использовании зарядных станций для электромобилей существует риск перегрузки электрической сети, что может привести к пожару или повреждению оборудования.

#### 4. Электромагнитные поля.

Необходимо рассматривать вопросы, связанные с воздействием электромагнитных полей, создаваемых электромобилями, на здоровье человека. Существуют результаты исследований, проведенных в этой области, и обсуждены возможные риски для людей, которые испытывают чувствительность к электромагнитным полям. Некоторые люди могут быть чувствительны к электромагнитным полям, которые создаются электромобилями. Длительное воздействие на эти поля может вызвать негативные последствия для здоровья. Для таких людей есть рекомендации по минимизации рисков и защите от воздействия электромагнитных полей.

#### 5. Инфраструктура.

Существует проблема развития инфраструктуры для зарядки электромобилей. В данное время текущее состояние инфраструктуры и проблемы, с которыми сталкиваются пользователи электромобилей, включают недостаток зарядных станций и неудобство их использования. Есть меры по улучшению инфраструктуры, чтобы обеспечить удобство и безопасность пользователей электромобилей, включая расширение сети зарядных станций и улучшение доступности и надежности. Недостаточная развитость инфраструктуры для зарядки электромобилей может привести к неудобствам и ограничениям в использовании этих транспортных средств.

Затраты и количество редких металлов, необходимых для создания аккумулятора электромобиля, могут варьироваться в зависимости от модели и производителя. Однако основными редкими металлами, используемыми в аккумуляторах литий-ионного типа, являются литий, никель, кобальт и алюминий [9].

При создании аккумулятора для электромобиля большая часть затрат связана с добычей и обработкой этих редких металлов. Например, для производства литий-ионного аккумулятора емкостью около 40 кВт·ч может потребоваться около 10 кг лития, 40 кг никеля, 20 кг кобальта и 5 кг алюминия.

Стоимость этих металлов может значительно варьироваться в зависимости от спроса и предложения на рынке. Кроме того, развитие новых технологий и появление альтернативных материалов может влиять на стоимость и использование редких металлов в аккумуляторах электромобилей [10].

Электромобили представляют собой перспективное решение для снижения выбросов вредных веществ и уменьшения зависимости от нефтепродуктов. Однако безопасность и экологическая устойчивость этих транспортных средств требуют дополнительного изучения и регулирования. В данной статье представлены основные аспекты безопасности и экологической устойчивости электромобилей, а также рекомендации по их оптимальному использованию. Дальнейшее исследование в этой области поможет обеспечить безопасность и эффективность использования электромобилей в будущем.

Однако современные электромобили проходят строгие испытания и соответствуют международным стандартам безопасности, чтобы минимизировать риски и обеспечить безопасность как для водителей, так и для окружающей среды.

### Литература

1. Jutt, V. E. Electric vehicles and vehicles with combined power plants. Calculation of speed characteristics: textbook. allowance / V. E. Yutt, V. I. Stroganov. – Москва: MADI, 2016. – 108 p.
2. Purcell, Edward M. Electricity and Magnetism / Edward M. Purcell, David J. Morin // Cambridge University Press, 2004. – 868 p.
3. Pistoia, Gianfranco Electric Vehicle Technology Explained: Enabling Technologies, Infrastructure, and

- Sustainable Energy Systems / Gianfranco Pistoia and Lorenzo Tosti // Elsevier, Amsterdam, 2009. – 392 p.
4. Нартов, Г. Монорельсовая дорога Москва – Париж – Нью-Йорк // Юный техник: журнал. – Москва, 1962. – № 12. – С. 46.
5. Franke, Thomas Electric Vehicle Charging Infrastructure: Guidelines for Future-proof Urban Development / Thomas Franke and Rik De Doncker //
6. Larminie, J. Electric Vehicle Technology Explained / James Larminie and John Lowry // John Wiley & Sons, Ltd, 2003 – 345 p.
7. Sandeep, Dhameja Electric Vehicle Battery Systems / Elsevier, 2001 - 252 p.
8. Кашкаров Андрей Современные электромобили. Конструкция, отличия, выбор для российских дорог / ДМК Пресс, 2017. – 118 с.
9. Lin, James C. Electromagnetic Fields in Biological Systems / Location Boca Raton Imprint CRC Press, 2012 – 458 p.
10. Трекова, Ю. В. Электромобили и экология. Перспективы использования электромобилей / Ю. В. Трекова. Текст: оригиналный // Молодой ученый. – 2016. – № 12 (116). – С. 563–575.

*A.P. Korneev<sup>1</sup>, Yitong Niu<sup>2</sup>*  
*<sup>1</sup>Belarusian-Russian University, <sup>2</sup>Sains Malaysia University*

## **SAFETY AND ENVIRONMENTAL ASPECTS OF USING ELECTRIC VEHICLES**

Currently, electric vehicles are one of the most promising alternative vehicles that can reduce dependence on petroleum products and reduce emissions of harmful substances into the atmosphere. The history of the emergence and development of electric vehicles is considered. The reasons why internal combustion vehicles replaced electric vehicles at the beginning of the 20th century, are considered. The reasons for the popularity of electric vehicles at present are considered. The dangers that may arise when using electric vehicles, which require additional study and regulation, are presented. The paper discusses the main aspects of the safety and environmental sustainability of electric vehicles.

Electric vehicle, safety, environmental sustainability, fires, battery, charging stations, electromagnetic field, infrastructure.



**П.И. Смирнов**  
Вологодский государственный университет

## ПОДХОДЫ К ПОВЫШЕНИЮ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДВЕСКИ АВТОМОБИЛЕЙ

Долговечность системы подвески и ее отдельных элементов является ключевым компонентом процесса разработки транспортного средства, поскольку она последовательно, постоянно и непосредственно выдерживает большие динамические нагрузки, когда транспортное средство находится в движении. В процессе длительной эксплуатации в сложных дорожных и климатических условиях на первое место выходят показатели усталостной прочности и сопротивления старению материала. Как показало статистическое исследование причин отказа в продолжении эксплуатации автомобилей на долю неисправностей, напрямую связанных с эластичными элементами ходовой части, приходится свыше 16 %, а для автомобилей старше 10 лет – порядка 35 %. Прочность и долговечность этих элементов напрямую влияет на безопасность движения транспортных средств. При этом исследованы основные причины повреждений эластичных элементов подвески. В статье приведен обзор основных направлений и путей улучшения этих показателей. В большинстве случаев исследователи пытаются повысить долговечность систем подвески транспортных средств, изменяя форму деталей и конструктивные параметры подвески, однако наилучшим способом является комбинация модернизации конструктивных характеристик узла с применением современных материалов-эластомеров с предварительным компьютерным моделированием характеристик готового изделия на основе применения численных методов решения нелинейных краевых задач.

Эластомеры, напряжение при кручении, вязкоупругость, эластомерная втулка, элементы подвески.

Эластомерные втулки (айлентблоки) – это конструктивные элементы, которые используются в системах подвески автомобилей и других транспортных средств для поглощения колебаний и уменьшения передаваемых вибраций с одновременной возможностью передачи усилий в нужных направлениях. Втулка представляет собой полый цилиндр из эластомера, прикрепленный к металлической втулке по его внутренней поверхности и металлической втулке (корпусу) по внешней поверхности. Стальная втулка и корпус соединены с элементами подвески автомобиля и используются для передачи усилий и крутящих моментов от колес через эластомерный материал к шасси. Эластомерная подушка также гасит колебания в соединении, когда оно деформируется из-за относительного движения вала и втулки. При этом соотношение между силой или моментом, приложенным к валу или втулке, и относительными смещениями или вращению нелинейно и демонстрирует вязкоупругие свойства эластомера.

При анализе систем подвески, содержащих втулки, инженеры используют отработанные практические решения, инструменты автоматизированного проектирования, используемые во многих отраслях машиностроения и обрабатывающей промышленности, и особенно стандартный подход, используемый в прикладной механике для определения соотношения сила-смещение резинометаллических шарниров.

Модель, используемая для определения поведения эластомерного материала втулки в ответ на

нагружение, основанная на уравнениях равновесия и уравнениях деформационного смещения для определения соответствующей краевой задачи дает приемлемый результат. Однако из-за нелинейности деформации и реакции эластомера эта процедура обычно не приводит к установлению явной взаимосвязи между силой и смещением. Если сила или смещение изначально заданы, то другое значение определяется путем решения численной краевой задачи. Соотношение «сила-смещение» определяется при этом неявно. Использование этой модели требует многократных численных решений краевой задачи. Это требует значительное количество вычислительных ресурсов, и поэтому нежелательно включать в моделирование динамики нескольких айлентблоков одновременно. Было обнаружено ограниченное число работ по исследованию определения соотношений «сила-перемещение» для эластомерных втулок в открытом доступе. Эластомерные втулки, представляющие интерес для данного исследования, используются в автомобильных подвесках и относятся к прессованному типу. Из-за природы эластомерного материала соотношение между силами и моментами и их соответствующими перемещениями, и вращениями составляет нелинейный и зависящий от времени. Было также обнаружено, что существуют и другие нелинейности из-за связи между различными режимами деформации. В работе Kadlowec, J et al. [1] продемонстрирован экспериментальный подход к испытаниям эластомеров по отклику системы айлентблока по одиночным и свя-

занным режимам деформации, а также сравнение упругой деформации втулки с результатами метода конечных элементов для изучения поведение эластомерной втулки. Экспериментальная программа проводилась с целью определения характера силового отклика на радиальные, крутильные и комбинированные деформации. В исследовании [2] Wineman et al. рассматривали это представление как реакцию на соотношение сила-смещение для одинарного отклика эластичной втулки.

Этот подход сочетает в себе нелинейные зависимости от смещения с зависимостью вязкоэластичности от времени и выражается через силу как функцию от релаксации – свойство втулки, представляющее силу, которая возникает, когда втулка подвергается внешнему воздействию. Представлен метод определения функции релаксации силы в экспериментальной программе, в которой втулка подвергается последовательной серии нагрузений. В работе [4] развили указанные теоретические модели и предложили метод анализа долговечности для компонентов подвески из вулканизированной резины, применимый для прогнозного установления долговечности изделий на начальной стадии производства. При этом параметры ресурса изделий (деформации, усталостные показатели) определяются методом FEA (конечного элементного анализа). В работе приведена методика отбора показателей, необходимых для моделирования для конкретных автомобильных компонентов, подвески и приведены результаты экспериментального определения усталостных свойств этих деталей.

Кроме того, оценка долговечности эластомерных втулок часто проводилась качественно и производилась путем простой фиксации изменений в стандартных значениях тестовых свойств компонентов и сравнения с более ранними данными [P. M. Lewis, 1980]. Несмотря на то, что этот подход дает определенные результаты, тем не менее он обычно не подходит для критических автомобильных компонентов, требующих количественной оценки срока службы, чтобы прогнозировать ресурс и обеспечить требуемый уровень безопасности. Помимо механических нагрузок и изменения химического состава, экологические проблемы являются еще одним фактором, влияющим на общий срок службы компонентов эластомерных втулок. Воздействие на материалы, работающие в различных средах, может привести к изменению механических свойств, что в конечном итоге повлияет на срок их службы. При оценке общей долговечности эластомерного компонента следует учитывать механические эффекты усталостного разрушения и прочности, а также устойчивость к окружающей среде, связанную с эксплуатационными температурами и давлениями, продемонстрированные Zhang et al.

Продолжение совершенствования имеющихся математических моделей эластомерных втулок связано с активным применением в них интеллектуальных композитных материалов из магнитореологических эластомеров MRE, которые позволяют создавать компоненты подвески с изменяемыми вязкопластичными и

вязкоупругими свойствами. В целом реологические и механические свойства, характерные для эластомеров MRE, были кратко рассмотрены Kwon et al. Главный результат их работы – исследование динамических колебаний с использованием реометра, в установке, использующей регулируемый источник магнитного поля. Характеристики MRE были представлены с изменением развертки амплитуды деформации и развертки угловой частоты. Развертка амплитуды деформации определяла область линейной вязкоупругости (LVE), которая в дальнейшем использовалась в teste на развертку по частоте. Предел LVE может быть определен на основе теста, а динамическое поведение MRE может быть проанализировано как в линейных, так и в нелинейных условиях. MRE в этом случае представляют из себя вязкоупругие материалы, обладающие способностью накапливать и рассеивать часть энергии во время деформации. Таким образом, динамическое испытание MRE полезно для определения эластичности (модуля упругости) и вязкости (модуля потерь), которые, по сути, описывают реологические свойства MRE. В работе также обсуждалось явление ползучести. Испытание на ползучесть было проведено для анализа зависимости деформации от времени, в течение которого затем была представлена информация о поведении материалов при обратном восстановлении после снятия нагрузки. С точки зрения проектирования упругих элементов подвески особенно важен вопрос моделирования их ресурса, а для этого необходимо наличие точных и хорошо согласованных моделей для определения усталостной прочности изделий, эксплуатирующийся в различных условиях. В первую очередь определение результата влияния на долговечность эластомерных материалов изменения температур, влажности, солнечного света, дорожных противогололедных реагентов, воды, масла и прочих эксплуатационных автомобильных материалов. Полученные в таких исследованиях данные представляют из себя ценный результат для практического проектирования упругих втулок из MRE. Также можно исследовать различные воздействия окружающей среды на отказ прочности.

Существующие исследования воздействия на окружающую среду были проведены многими исследователями [1–3], однако они были получены в результате испытаний, проведенных в лабораторных условиях. Экспериментальные условия симулировали различные реальные факторы, способствующие развитию старения материала, однако возможности чрезмерного старения образцов в отличие от реальных действующих факторов являются неоспоримыми. Поэтому интерес представляет получение большого количества репрезентативных данных об изменении свойств эластомеров, применяемых в автомобильных компонентах подвески, с целью получения достоверных методик расчета параметров долговечности и усталостной прочности этих узлов.

С целью определения наиболее часто встречающихся неисправностей подвески легковых автомобилей были обобщены и проанализированы неисправно-

сти, обнаруженные при проведении государственного технического осмотра автомобилей в России за период 2018–2020 год, приведенные в ежегодных отчетах и бюллетенях. Результаты распределения неисправностей, связанных с техническим состоянием упругих втулок и сайлентблоков, приведены в таблице 1.

По результатам обследования было вычислено среднее значение частоты появления неисправностей в зависимости от срока эксплуатации автомобиля. Из таблицы 1 видно, что на автомобилях со сроком эксплуатации до 4 лет самыми слабыми местами являются шаровые шарниры подвески, при этом для автомобилей старше 6 лет и более наибольшая доля неисправностей приходится уже на элементы тормозной системы из эластомеров (пыльники поршня тормозного суппорта, направляющие пальцы тормозной скобы и упругое кольцо поршня), а также на сайлентблоки и упругие втулки (рычаги, подрамник, крепеж амортизаторов).

Основной интерес представляют собой причины появления указанных неисправностей и выделение

факторов и условий, приводящих к их появлению. Для изучения действующих причин было проведено изучение технического состояния замененных и выбракованных деталей подвески легковых автомобилей класса В и С в научно-исследовательской лаборатории диагностики автомобилей Вологодского государственного университета на материале, предоставленном официальными дилерами Toyota и Nissan, а также независимыми станциями по ремонту автомобилей. Причины выхода из строя деталей определялись визуально путем осмотра, возраст и пробег автомобилей были получены по данным технических центров.

Примеры повреждений сайлентблоков и упругих втулок даны на рисунках 1–3. Распределение причин неисправности сайлентблоков подвески легковых автомобилей дано в таблице 2 и на рисунке 2, а зависимость вероятности неисправности сайлентблоков подвески от возраста и пробега для легковых автомобилей в таблицах 3 и 4.

Таблица 1

**Распределение доли легковых автомобилей, у которых обнаружены неисправности шасси (в %)**

| Неисправность                    | Описание   | Возраст легкового автомобиля, лет |     |     |      |      |          | Последствия   |
|----------------------------------|--|-----------------------------------|-----|-----|------|------|----------|---|
|                                  |  | До 2                              | 2–4 | 4–6 | 6–8  | 8–10 | Свыше 10 |   |
| Углы установки колес             | Значения не соответствуют спецификации   | 0,7                               | 0,9 | 1,2 | 3,6  | 4,2  | 8,6      | Износ шин, ухудшение устойчивости и управляемости   |
| Неисправности подвески           | Люфт в шарнирах, трещины чехлов шарниров, повреждения сайлентблоков и упругих втулок | 0,4                               | 1,8 | 4,7 | 15,3 | 16,1 | 18,9     | Ухудшение устойчивости и управляемости, вероятность поломки, повышенный износ шин, колебания в рулевом управлении |
| Шарниры привода и карданные валы | Чехлы негерметичны   | 0,5                               | 0,9 | 1,7 | 1,9  | 1,4  | 2,1      | Повышенный износ шарниров, опасность внезапной поломки и блокировки колеса  |
| Детали тормозной системы         | Повреждены, разгерметизированы, изменили размеры детали из эластомеров               | 0,2                               | 0,8 | 2,6 | 5,8  | 5,7  | 6,3      | Ухудшение показателей торможения, перерасход топлива, возможность блокировки колеса, увод автомобиля              |

Таблица 2

**Распределение причин неисправности сайлентблоков подвески легковых автомобилей (в %)**

| Неисправность               | Вероятность (%) |
|-----------------------------|-----------------|
| Усталостные трещины         | 87,6            |
| Отрывание внутренней втулки | 14,3            |
| Отрывание наружной втулки   | 0,8             |
| Разрушение эластомера       | 3,5             |



Рис. 1. Примеры повреждений упругих опор рычага подвески легкового автомобиля



Рис. 2. Усталостные разрушения опоры рычага подвески (6 лет и 84 тыс. км пробега)



Рис. 3. Старение упругой втулки нижнего крепления амортизатора, приведшее к отрыву эластомера от металла втулки (10 лет и 142 тыс. км пробега)

Таблица 3

**Распределение причин неисправности сайлентблоков подвески легковых автомобилей (в %)**

| Возраст автомобиля, лет                                 | До 2 | 2–4 | 4–6 | 6–8  | 8–10 | Свыше 10 |
|---|------|-----|-----|------|------|----------|
| Вероятность возникновения неисправности сайлентблока, % | 0,4  | 1,8 | 4,7 | 15,3 | 16,1 | 18,9     |

Таблица 4

**Распределение причин неисправности сайлентблоков подвески легковых автомобилей (в %)**

| Пробег транспортного средства, тыс. км    | До 30 | 30–50 | 50–70 | 70–90 | 90–120 | Свыше 120 |
|---|-------|-------|-------|-------|--------|-----------|
| Вероятность неисправности сайлентблока, % | 0,7   | 3,4   | 9,8   | 18,4  | 26,4   | 34,6      |

По итогам проведенных статистических исследований, а также исследования технического состояния сайлентблоков подвески легковых автомобилей можно сделать вывод, что наибольшее значение на вероятность выхода из строя и ограничивает ресурс этих элементов подвески именно возраст автомобиля, влияние пробега более линейно и не дает скачкообразного ухудшения технического состояния указанных выше элементов шасси. При этом рубежным моментом является для исследованных легковых автомобилей достижение пробега в 50–70 тыс. км и возраста 5–6 лет.

Эти данные, наряду с данными визуального осмотра неисправных элементов подвески, подтверж-

жают факт, что основной причиной выхода из строя является наличие усталостного разрушения материала эластомера упругой втулки или сайлентблоков, при этом для оригинальных деталей подвески этот процесс начинает прогрессировать с 5–6 лет эксплуатации.

При этом данные реальной эксплуатации все же расходятся с результатами лабораторных исследований [4, 5] потому, что в указанных работах практически отсутствовали сведения об отрыве вулканизации эластомера от внутренней или/и внешней втулки и сквозных разрывах, следует также дополнительно исследовать сопоставление данных моделирования изменения виброупругих свойств сайлентблоков и дан-

ных компьютерного моделирования. В этой связи следует развить модель, предложенную в работе [1], на основе данных калибровки ее на практическом материале и введения дополнительных факторов, учитывающих влияние внешних агрессивных явления (влажностно-температурные режимы и влияние дорожных реагентов).

### Литература

1. Kadlowec, J., Wineman, A. & Hulbert, G. Elastomer bushing response: experiments and finite element modeling. *Acta Mechanica* 163, 25–38 (2003). <https://doi.org/10.1007/s00707-003-1018-1>.
2. Lee, S.B., Wineman, A. A model for nonlinear viscoelastic torsional response of an elastomeric bushing. *Acta Mechanica* 135, 199–218 (1999). <https://doi.org/10.1007/BF01305752>.
3. Pipkin, A. C., & Rogers, T. G. (1968). A non-linear integral representation for viscoelastic behaviour. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 16(1), 59–72. doi:10.1016/0022-5096(68)90016-1.
4. Математическая модель процесса функционирования сайлентблока на основе элементов Гука и Сен-Венана / Д. А. Тихов-Тинников, В. С. Баадиев, А. И. Федотов, А. В. Алексеев // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2019. – Т. 16, № 6(70). – С. 706–716. – DOI 10.26518/2071-7296-2019-6-706-716.
5. Федотов, А. И. Эмпирические и теоретические предпосылки математической модели процесса функционирования сайлентблоков подвески АТС / А. И. Федотов, Д. А. Тихов-Тинников, В. С. Баадиев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22, № 10(141). – С. 239–247. – DOI 10.21285/1814-3520-2018-10-239-247.

*P.I. Smirnov*  
Vologda State University

### APPROACHES TO INCREASING FATIGUE STRENGTH AND DURABILITY OF CARS ELASTIC SUSPENSION ELEMENTS

The durability of the suspension system and its individual components is a key component of the vehicle development process, as it consistently, continuously and directly withstands high dynamic loads when the vehicle is in motion. In the process of long-term operation in difficult road and climatic conditions, the indicators of fatigue strength and resistance to aging of the material come out in the first place. As shown by a statistical study of the reasons for the refusal to continue operating cars, the share of malfunctions directly related to the elastic elements of the chassis accounts for over 16%, and for cars older than 10 years are about 35%. The strength and durability of these elements directly affects the safety of vehicles. At the same time, the main causes of damage to the elastic suspension elements are investigated. The article provides an overview of the main directions and ways to improve these indicators. In most cases, researchers are trying to increase the durability of vehicle suspension systems by changing the shape of parts and structural parameters of the suspension, but the best way is to combine the modernization of the structural characteristics of the assembly using modern elastomer materials with preliminary computer modeling of the characteristics of the finished product based on the use of numerical methods for solving nonlinear boundary value problems.

Elastomers, torsional stress, viscoelasticity, elastomer bushing, suspension elements.

## **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Батаков Андрей Сергеевич**

студент Инженерно-строительного института Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
andrejbatakov80@gmail.com

**Белков Олег Леонидович**

кандидат технических наук, начальник инновационной работы ООО «Центр СЭП» (Вологда, Россия)  
avtoexpert35@yandex.ru

**Булавин Вячеслав Федорович**

доцент кафедры технологии машиностроения Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
bulavin35@mail.ru

**Булавина Тамара Георгиевна**

доцент кафедры электрооборудования Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
bulavinatg@vogu35.ru

**Вельсовский Анатолий Юрьевич**

кандидат технических наук, заведующий кафедрой автомобильных дорог Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
vau@vogu35.ru

**Вольников Михаил Иванович**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация и управление» Пензенского государственного технологического университета (Пенза, Россия)  
vmi1972@yandex.ru

**Воробьев Дмитрий Алексеевич**

магистрант кафедры технологии машиностроения Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
tms@vogu35.ru

**Воропай Людмила Михайловна**

кандидат технических наук, доцент кафедры биологии и химии Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
kafbio@vogu35.ru

**Габибов Нурулла Наджаф оглы (Наджафович)**

кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных дорог Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
Nurulla1962@yandex.ru

**Горшков Глеб Алексеевич**

студент Института управления, экономики и юриспруденции Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
gleb02072005@gmail.com

**Замшев Владимир Максимович**

студент Института управления, экономики и юриспруденции Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
ggohn12@gmail.com

**Каперейко Юлия Васильевна**

преподаватель кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Брестского государственного технического университета (Брест, Беларусь)  
yulya.kapereyko@mail.ru

**Котов Алексей Алексеевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры строительства, энергетики и транспорта Мурманского арктического университета (Мурманск, Россия)  
akot53@yandex.ru

**Копейкин Олег Евгеньевич**

лаборант кафедры промышленного и гражданского строительства Вологодского государственного университета  
(Вологда, Россия)  
oleg.copeickin@yandex.ru

**Кочкин Дмитрий Валерьевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры автоматики и вычислительной техники Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
kochkindv@bk.ru

**Корнеев Андрей Петрович**

старший преподаватель кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Белорусско-Российского университета (Могилев, Беларусь)  
AnKorg@tut.by

**Краснов Антон Алексеевич**

студент кафедры автоматики и вычислительной техники Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
krasnovanton@vk.com

**Курилова Наталия Владимировна**

старший преподаватель кафедры автомобилей и автомобильного хозяйства Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
natalivzo@mail.ru

**Лукина Анастасия Васильевна**

кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (Владимир, Россия)  
pismo.33@yandex.ru

**Назарова Марина Александровна**

кандидат биологических наук, доцент кафедры биологии и химии Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
nazarovama@vogu35.ru

**Ню Итонг**

аспирант школы промышленных технологий Universiti Sains Malaysia (Джорджтаун, Малайзия)  
itong\_niu@163.com

**Рахимов Амон Акпарович**

кандидат педагогических наук, старший преподаватель кафедры высшей математики и информатики политехнического института Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими (Республика Таджикистан, Душанбе)  
amon\_rahimov@mail.ru

**Репин Александр Владимирович**

студент Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (Владимир, Россия)  
skia2000@mail.ru

**Смирнов Владимир Александрович**

кандидат технических наук, доцент кафедры строительной и теоретической механики Московского государственного строительного университета (Москва, Россия)  
belohvost@list.ru

**Смирнов Петр Ильич**

кандидат технических наук, доцент кафедры автомобилей и автомобильного хозяйства Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
petrsm@bk.ru

**Соловьева Анастасия Андреевна**

аспирант кафедры промышленного и гражданского строительства Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
solovevaaa@vogu35.ru

**Степанов Артем Валерьевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и организации строительства Института лесных горных и строительных наук Петрозаводского государственного университета (Петрозаводск, Россия)  
stepanov@petrsu.ru

**Шорин Владимир Александрович**

доктор химических наук, профессор, профессор кафедры автомобильных дорог Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
ad@vogu35.ru

**Шевцов Леонид Сергеевич**

преподаватель кафедры промышленного и гражданского строительства Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
shevcovls@vogu35.ru

**Ящун Татьяна Викторовна**

кандидат технических наук, доцент кафедры автоматики и вычислительной техники Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
iashchuntv@vogu35.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Batakov Andrey Sergeevich**

Student of the Civil Engineering Institute of Vologda State University (Vologda, Russia)  
andrejbatakov80@gmail.com

**Belkov Oleg Leonidovich**

Candidate of Technical Sciences, the Head of innovation work of "Center SEP" LLC (Vologda, Russia)  
avtoexpert35@yandex.ru

**Bulavin Vyacheslav Fedorovich**

Associate professor of the Department of Mechanical Engineering Technology of Vologda State University (Vologda, Russia)  
bulavin35@mail.ru

**Bulavina Tamara Georgievna**

Associate professor of the Department of Electrical Equipment of Vologda State University (Vologda, Russia)  
bulavinatg@vogu35.ru

**Velovsky Anatoly Yuryevich**

Candidate of Technical Sciences, the Head of the Department of Highways of Vologda State University (Vologda, Russia)  
vau@vogu35.ru

**Volnikov Mikhail Ivanovich**

PhD, Associate Professor, Department of Automation and Control, Penza State Technological University (Penza, Russia)  
vmi1972@yandex.ru

**Vorobyov Dmitry Alekseevich**

Master's student, Department of Mechanical Engineering Technology, Vologda State University (Vologda, Russia)  
tms@vogu35.ru

**Voropai Lyudmila Mikhailovna**

PhD, Associate professor, Department of Biology and Chemistry, Vologda State University (Vologda, Russia)  
kafbio@vogu35.ru

**Gabibov Nurulla Najaf oglu (Najafovich)**

PhD in Technical Sciences, Associate professor, the Department of Motorways of Civil Engineering Institute of Vologda State University (Vologda, Russia)  
Nurulla1962@yandex.ru

**Gorshkov Gleb Alekseevich**

Student of the Institute of Management, Economics and Law of Vologda State University (Vologda, Russia)  
gleb02072005@gmail.com

**Zamshev Vladimir Maksimovich**

Student of the Institute of Management, Economics and Law of Vologda State University (Vologda, Russia)  
ggohn12@gmail.com

**Kapereyko Yulia Vasilieva**

Lecturer of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, Brest State Technical University, (Brest, Belarus)  
yulya.kapereyko@mail.ru

**Kotov Aleksey Alekseevich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction, Energy and Transport, Murmansk Arctic University (Murmansk, Russia)  
akot53@yandex.ru

**Kopeykin Oleg Evgenievich**

Laboratory Assistant of the Department of Industrial and Civil Engineering Vologda State University (Vologda, Russia)  
oleg.copeickin@yandex.ru

**Kochkin Dmitry Valerievich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automation and Computer Engineering, Vologda State University (Vologda, Russia)  
kochkindv@bk.ru

**Korneev Andrey Petrovich**

Senior Lecturer, Department of Electric Drive and Automation of Industrial Installations, Belarusian-Russian University, (Mogilev, Belarus)  
AnKorn@tut.by

**Krasnov Anton Alekseevich**

Student, Department of Automation and Computer Engineering, Vologda State University (Vologda, Russia)  
krasnovanton@vk.com

**Kurilova Natalia Vladimirovna**

Senior Lecturer, Department of Automobiles and Automobile Industry, Vologda State University (Vologda, Russia)  
natalivzo@mail.ru

**Lukina Anastasia Vasilievna**

Candidate of Technical Sciences, Associate professor, Department of Building Structures, Vladimir State University named after Alexander Grigorievich and Nikolay Grigorievich Stoletov (Vladimir, Russia)  
pismo.33@yandex.ru

**Nazarova Marina Aleksandrovna**

Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Department of Biology and Chemistry, Vologda State University (Vologda, Russia)  
nazarovama@vogu35.ru

**Niu Yitong**

Postgraduate Student, School of Industrial Engineering, Malaysia University of Science (Georgetown, Malaysia)  
itong\_niu@163.com

**Rakhimov Amon Akparovich**

Candidate of Pedagogical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Higher Mathematics and Informatics of the Polytechnic Institute of the Tajik Technical University named after the academician M.S. Osimi (Republic of Tajikistan, Dushanbe)  
amon Rahimov@mail.ru

**Repin Aleksandr Vladimirovich**

Student of Vladimir State University named after Alexander Grigorievich and Nikolay Grigorievich Stoletov (Vladimir, Russia)  
skia2000@mail.ru

**Smirnov Vladimir Aleksandrovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate professor of the Department of Structural and Theoretical Mechanics of the Moscow State University of Civil Engineering (Moscow, Russia)  
belohvost@list.ru

**Smirnov Petr Ilyich**

Candidate of Technical Sciences, Associate professor of the Department of Automobiles and Automobile Industry of Vologda State University (Vologda, Russia)  
petrsm@bk.ru

**Solovyova Anastasia Andreevna**

Postgraduate student of the Department of Industrial and Civil Engineering, Vologda State University (Vologda, Russia)  
solovevaaa@vogu35.ru

**Stepanov Artem Valerievich**

Candidate of Technical Sciences, Associate professor, Department of Technology and Organization of Construction, Institute of Forestry, Mining and Construction Sciences of Petrozavodsk State University. (Petrozavodsk, Russia)  
stepanov@petrsu.ru

**Shorin Vladimir Aleksandrovich**

Doctor of Chemical Sciences, Professor, Professor of the Department of Highways of Vologda State University (Vologda, Russia)  
ad@vogu35.ru

**Shevtsov Leonid Sergeevich**

Lecturer of the Department of Industrial and Civil Engineering of Vologda State University (Vologda, Russia)  
shevcovls@vogu35.ru

**Yashchun Tatyana Viktorovna**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automation and Computer Engineering of Vologda State University (Vologda, Russia)  
iashchuntv@vogu35.ru