

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.

№ 1 (11) / 2021

СЕРИЯ: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ВОЛОГДА
2021

№ 1 (11) / 2021 / МАРТ. Выходит 4 раза в год.

Научный журнал «Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки» включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ) с 2018 г.

Полнотекстовые версии выпусков научного журнала размещены в свободном доступе на сайте Научной электронной библиотеки (www.elibrary.ru)

Серия: Технические науки

Группы специальностей: 05.02.00 Машиноведение, системы приводов и детали машин;
05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление;
05.23.00 Строительство и архитектура

Учредитель и издатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодский государственный университет»

Свидетельство о регистрации СМИ: ПИ № ФС77-75456 от 05 апреля 2019 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Главный редактор

А.А. Кочкин, доктор технических наук, зав. кафедрой промышленного и гражданского строительства, доцент 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:

А.Н. Алюнов, кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования Вологодского государственного университета,

В.П. Гусев, доктор технических наук, старший научный сотрудник, зав. лабораторией Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН),

И.В. Зефирова, кандидат технических наук, доцент Вологодской государственной молочнохозяйственной академии им. Н.В. Верещагина,

К.В. Кияненко, доктор архитектуры, профессор Вологодского государственного университета,

В.И. Леденёв, доктор технических наук, профессор Тамбовского государственного технического университета,

С.В. Лукин, доктор технических наук, профессор Череповецкого государственного университета,

В.И. Римшин, доктор технических наук, профессор Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН),

А.С. Степанов, кандидат технических наук, доцент Вологодского государственного университета,

С.А. Мясникова, кандидат технических наук, зам. директора Инженерно-строительного института Вологодского государственного университета,

В.А. Шорин, доктор химических наук, профессор Вологодского государственного университета,

И.Л. Шубин, доктор технических наук, директор Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН)

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

Редакторы – *А.И. Ланькова*, *А.П. Митракова*, *Н.Н. Постникова*

Оригинал-макет – *Н.В. Подхомутова*

Адрес редакции: 160000, г. Вологда, ул. Сергея Орлова, д. 6, каб. 202а; тел.: 8 (8172) 76-91-92, 72-11-55
e-mail: vestniktech@vogu35.ru

ISSN 2658-3399

© ФГБОУ ВО «Вологодский
государственный университет», 2021

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. 1 (11) / 2021

SERIES: TECHNICAL SCIENCIES

VOLOGDA
2021

No. 1 (11) / 2021 / MARCH. It is issued 4 times a year.

Scientific Journal "Bulletin of Vologda State University. Series: Technical sciences" has been included into Russian Science Citation Index (RSCI) since 2018.

Full-text versions of the scholarly journal issues are freely available on the website of Scientific Electronic Library (www.elibrary.ru)

Series: Technical Sciences

Academic areas: 05.02.00 Mechanical engineering, drive systems and machine parts;
05.13.00 Computer science, computer engineering and management;
05.23.00 Construction and architecture

Founder and publisher: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Vologda State University

Mass Media Registration Certificate: PI No. FS77-75456 dated of April 05, 2019 was issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technologies and Mass Communications (Roskomnadzor)

Editor-in-Chief

A.A. Kochkin, Doctor of Engineering, Head of the Department of Industrial and Civil Construction, Associate Professor of Vologda State University

Assistant editors:

A.N. Shvetsov, Doctor of Engineering, Professor of Vologda State University

A.E. Nemirovsky, Doctor of Engineering, Professor of Vologda State University

Secretary

V.A. Rakov, Candidate of Engineering, Associate Professor of Vologda State University

Members of the Editorial Board:

A.N. Alyunov, Candidate of Engineering, Associate Professor of the Department of Electrical Equipment of Vologda State University,

V.P. Gusev, Doctor of Engineering, Senior Researcher, Head of the Laboratory of the Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN),

I.V. Zefirov, Candidate of Engineering, Associate Professor of Vologda State Dairy and Economics Academy named after N.V. Vereshchagin,

K.V. Kiyanko, Doctor of Architecture, Professor of Vologda State University,

V.I. Ledenev, Doctor of Engineering, Professor of Tambov State University,

S.V. Lukin, Doctor of Engineering, Professor of Cherepovets State University,

V.I. Rimshin, Doctor of Engineering, Professor of the Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN),

S.A. Myasnikova, Candidate of Engineering, Deputy Director of Civil Engineering Institute of Vologda State University

A.S. Stepanov, Candidate of Engineering, Associate Professor of Vologda State University,

V.A. Shorin, Doctor of Chemistry, Professor of Vologda State University,

I.L. Shubin, Doctor of Engineering, Director of the Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN)

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

Editors – *A.I. Lankova*, *A.P. Mitrakova*, *N.N. Postnikova*

Original layout – *N.V. Podhomutova*

Editorial office: 160000, Vologda, Sergeya Orlova st., 6, office 202a; tel.: 8 (8172) 76-91-92, 72-11-55
e-mail: vestniktech@vogu35.ru

Содержание

МАШИНОВЕДЕНИЕ, СИСТЕМЫ ПРИВОДОВ И ДЕТАЛИ МАШИН

<i>Петряшов И.С., Булавин В.Ф.</i> ИНЖЕНЕРНОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ В МАЛЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ	7
<i>Попов И.П.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАНТОВ И ОСОБЕННОСТЕЙ ОКОЛОРЕЗОНАНСНЫХ ЯВЛЕНИЙ В МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ	12
<i>Попов И.П.</i> ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОЙ МАССЫ ДЛЯ БАЛАНСИРОВКИ МЕХАНИЗМОВ	19
<i>Порядина Т.Д., Степанов А.С., Фролов С.А., Яхричев В.В.</i> ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЦИФРОВЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАТКИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ УЗЛОВ И ДЕТАЛЕЙ КОЗЛОВЫХ КРАНОВ	22
<i>Яняк С.В., Комиссарова И.И.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОСТОЙКОСТИ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА	27

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

<i>Корнеев А.П.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ ПРИ ПОМОЩИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА	32
<i>Суконщиков А.А., Коппалина А.А.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОММУТАТОРОВ QoS	35
<i>Суконщиков А.А., Коппалина А.А.</i> ПРИМЕНЕНИЕ АППАРАТА СЕТЕЙ ПЕТРИ СО СВОЙСТВАМИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ СППР	39
<i>Суконщиков А.А., Уткин Д.Е.</i> РАЗРАБОТКА СППР ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ РАКА ЛЕГКОГО	42

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

<i>Вихарева Н.Н., Сафронова Е.С.</i> УСПЕНСКИЙ СОБОР И МЕСТНАЯ ИКОНА «БОГОМАТЕРЬ ОДИГИДРИЯ»	46
<i>Гудков А.Г., Колобова С.В., Павлов М.В., Карпов Д.Ф.</i> РАСЧЕТ КАНАЛИЗАЦИОННЫХ КОЛЛЕКТОРОВ С НЕРАВНОМЕРНЫМ ТЕЧЕНИЕМ ВОДЫ	49
<i>Кузнецов Д.В., Левичев Е.В., Якунина В.А.</i> ОПЫТ И ПРОБЛЕМАТИКА ПРИМЕНЕНИЯ BIM –МОДЕЛЕЙ В ПЕРИОД ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗДАНИЯ	54
<i>Лохвинская Т.И., Вудвуд Е.Р.</i> АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	58
<i>Никитина Е.М.</i> ЗНАЧЕНИЕ ОГРАД В ДИЗАЙН-КОДЕ ИСТОРИЧЕСКОГО ПОСЕЛЕНИЯ ГОРОД ВОЛОГДА	61
<i>Огородов Л.И., Шапкина В.А.</i> РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ПРИ ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ ДВУХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПОЛИМЕРНОЙ ОСНОВЕ С ДИСПЕРСНЫМ АРМИРОВАНИЕМ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ	66
<i>Соловьева Е.В., Сурикова А.Н.</i> ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВТОРИЧНОГО ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА	69
<i>Шорин В.А., Вельсовский А.Ю.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ПГМ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ	71
<i>Сведения об авторах</i>	75

CONTENTS

MACHINING, DRIVE SYSTEMS AND MACHINE PARTS

<i>Petryashov I.S., Bulavin V.F.</i> ENGINEERING SUPPORT IN SMALL ENTERPRISES	7
<i>Popov I.P.</i> STUDY OF OPTIONS AND FEATURES OF CIRCULAR RESONANT PHENOMENA IN MECHANICAL SYSTEMS	12
<i>Popov I.P.</i> APPLICATION OF ARTIFICIAL MASS FOR BALANCING MECHANISMS	19
<i>Poryadina T.D., Stepanov A.S., Frolov S.A., Yakhrichev V.V.</i> EFFICIENCY OF DIGITAL TOOLS FOR DESIGNING TECHNOLOGICAL EQUIPMENT FOR MANUFACTURING CRANES UNITS AND PARTS	22
<i>Ianiak S.V., Komissarova I.I.</i> STUDY OF HARD ALLOYS HEAT RESISTANCE BY DIFFERENTIAL THERMAL ANALYSIS METHOD	27

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

<i>Korneev A.P.</i> STUDY OF SYSTEMS WITH DISTRIBUTED PARAMETERS IN THE TIME DOMAIN USING AN EXPERIMENTAL STAND	32
<i>Sukonshchikov A.A., Koppalina A.A.</i> SIMULATION OF QoS SWITCHES FUNCTIONING	35
<i>Sukonshchikov A.A., Koppalina A.A.</i> APPLICATION OF PETRI NETWORKS APPARATUS WITH NEURAL NETWORKS PROPERTIES FOR CONSTRUCTION OF DSS	39
<i>Sukonshchikov A.A., Utkin D.E.</i> DSS DEVELOPMENT FOR LUNG CANCER DIAGNOSIS	42

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

<i>Vikhareva N.N., Safronova E.S.</i> THE ASSUMPTION CATHEDRAL AND THE LOCAL ICON "HODEGETRIA"	46
<i>Gudkov A.G., Kolobova S.V., Pavlov M.V., Karpov D.F.</i> CALCULATION OF SEWAGE COLLECTORS WITH NON-UNIFORM FLOW OF WASTE WATER	49
<i>Kuznetsov D.V., Levichev E.V., Yakunina V.A.</i> EXPERIENCE AND PROBLEMS OF USING BIM MODELS DURING BUILDING OPERATION	54
<i>Lohvinskia T.I., Vudvud E.R.</i> ANALYSIS OF FACTORS THAT DETERMINE THE CHARACTERISTICS OF THERMAL INSULATION MATERIALS	58
<i>Nikitina E.M.</i> SIGNIFICANCE OF FENCES IN DESIGN CODE OF VOLOGDA HISTORICAL SETTLEMENT	61
<i>Ogorodov L.I., Shapkina V.A.</i> RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES AND PREDICTION OF LONG-TERM STRENGTH AT UNIAXIAL TENSION OF TWO POLYMER-BASED COMPOSITE MATERIALS WITH DISPERSED REINFORCEMENT AT INCREASED TEMPERATURES	66
<i>Solovyeva E.V., Surikova A.N.</i> DEFORMATION PARAMETERS OF THE SECONDARY POLYVINYL CHLORIDE	69
<i>Shorin V.A., Velsvsky A.Y.</i> INVESTIGATION OF CHEMICAL PGMS EFFECT ON CHARACTERISTICS OF AUTOMOBILE ROADS BED	71
<i>Information about the authors</i>	75

УДК 681.7.068



И.С. Петряшов, В.Ф. Булавин
Вологодский государственный университет

ИНЖЕНЕРНОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ В МАЛЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Машиностроительный сектор Северо-Западного региона последовательно реализует внедрение цифровых технологий на основе САПР продуктов. Комплексное применение идеологии CAD/CAM/CAPP/CAE находится в стадии становления, хотя отдельные его компоненты нашли широкое применение на предприятиях всех уровней. В статье рассматриваются результаты формирования компетенций в области CAE/CAO проектирования, обеспечивающих объединение передовых производственных технологий и бизнес-моделей для их распространения в сфере малых и средних машиностроительных предприятий. Выпуск изделий для рынков с новыми качествами и создание высокотехнологичных направлений в промышленности приводят к производству глобально конкурентоспособной продукции.

Цифровое проектирование, топологический инжиниринг, оптимизация, цифровой двойник, малое машиностроительное предприятие.

Экономика нового технологического этапа предусматривает интеграцию средних и малых машиностроительных предприятий в цифровое поле виртуальных предприятий на основе стратегии перехода к цифровому производству в рамках нацпроектов и инициативы «Технет» [1–2]. Содержанием цифрового конструкторско-технологического обеспечения подготовки производства являются: проектирование и моделирование в 3D-формате, автоматизированная технологическая поддержка и инжиниринговый анализ отдельных изделий и всей конструкции [3–6].

Топологический инжиниринг (CAO) как составная часть цифрового проектирования реализует стратегию определения геометрии изделия, при которой для несущих нагрузку зон путем перераспределения материала и уменьшения ее массы обеспечивается сохранение прочностных характеристик. Использование деталей с оптимизированной формой актуально для машиностроительной и автомобилестроительной отраслей, где важно сохранение функционала изделия с одновременным снижением массы.

Изготовление сложной по геометрии оптимизированной детали целесообразно в больших партиях при применении методов литья и штамповки. Для малого и среднего предпринимательства характерно мелкосерийное, единичное и позаказное производство. С внедрением аддитивных технологий, связанных с послойным созданием объектов, а не удалением или перераспределением материала, становится целесообразно развивать это направление для изготовления как единичных, так и малых партии деталей сложной топологии. Достигается это за счет быстрого переналадки оборудования, снижения числа технологических операций и других факторов.

Покажем бизнес-процесс CAO инжиниринга на примере детали «Уголок основания», использующейся в настольном 3D-принтере по технологии FDM как связующий элемент основания и направляющих принтера (рис. 1). Технология печати FDM применяется как при прототипировании, так и в промышленном производстве с материалами ABS, PLA, HIPS, SBS, PVA.

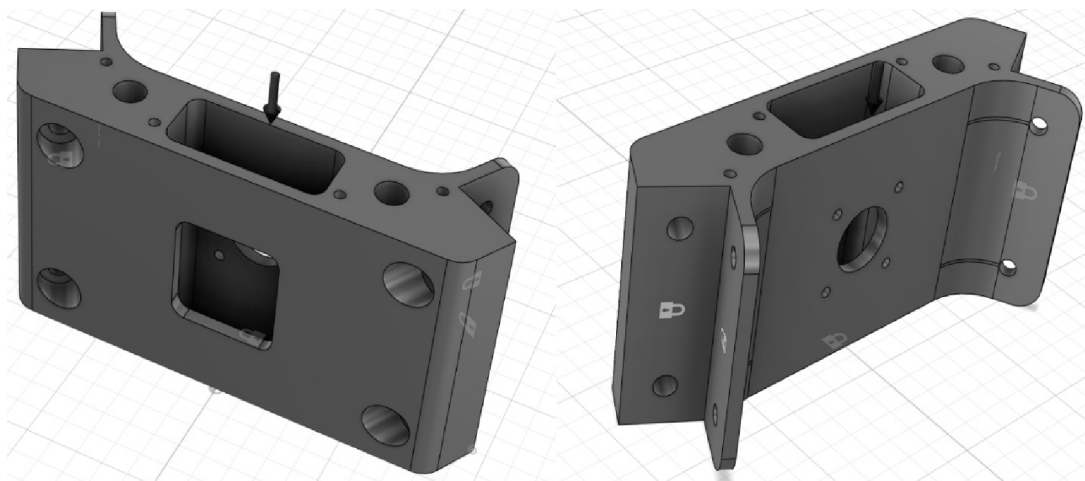


Рис. 1. Деталь «Уголок основания» (исходная конфигурация)

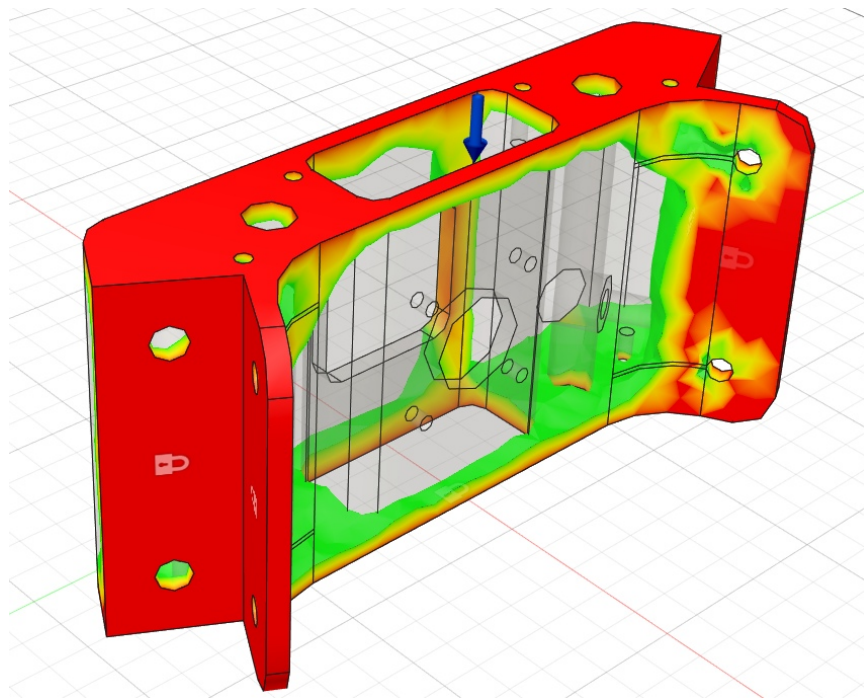


Рис. 2. Результат оптимизации для некорректного указания базовых поверхностей

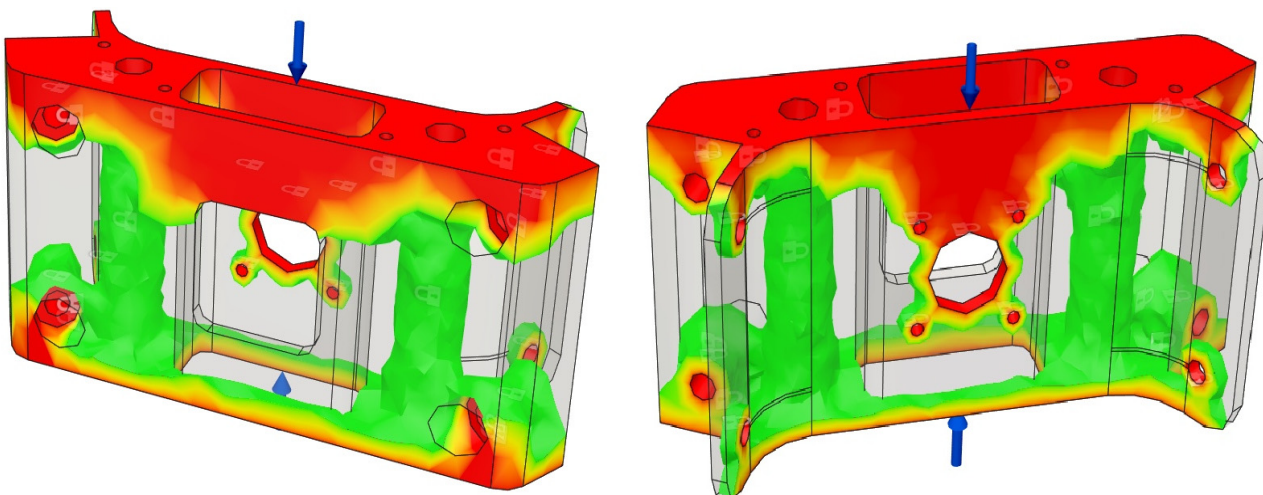


Рис. 3. Корректное решение топологической оптимизации

Цифровой прототип изделия может быть создан в любой CAD-платформе [3–6] и импортирован, с использованием универсальных форматов, из других программных продуктов. CAD-платформа распределит материал в объеме исходной детали по заданным поверхностям. Применяв опцию «оптимизация формы» к исходной конфигурации детали, требуется указать базовые и крепежные поверхности детали, а также выбрать процентное соотношение массы оптимизированной детали к исходной. При попытке получить слишком легкую деталь, решений, которые могли бы обеспечить сохранение функционала получаемой детали, может и не быть. В случаях неверного указания необходимых поверхностей материал не будет распределен на требуемые поверхности (рис. 2). Здесь зона в центре детали, предназначенная для доступа к шаговому электродвигателю, и его крепления

не заполнены материалом, а периферийные области конструктива остались без изменений.

В случае верного указания необходимых поверхностей, отверстий и процентного соотношения массы можно получить несколько вариантов решений топологического инжиниринга, одно из которых представлено на рисунке 3. Новый конструктив представляет собой результат оптимизации при соотношении масс $\approx 40\%$. Если полученное решение удовлетворяет конструкторскому заданию, то найденный результат формируется как математическая модель на сетке конечных элементов, что предполагает операции дальнейшего сглаживания. Этот результат топологической оптимизации не является итоговым, и окончательную геометрию изделия корректирует разработчик. Дискретизированная (оптимизированная) и сглаженная (отредактированная) 3D-модели детали представлены на рисунке 4.

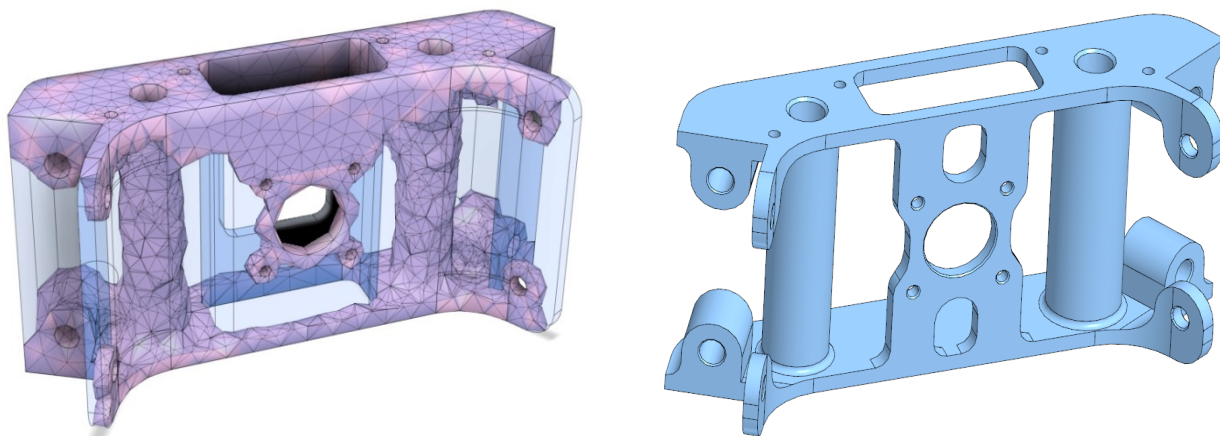


Рис. 4. Цифровой двойник оптимизированной и сглаженной детали

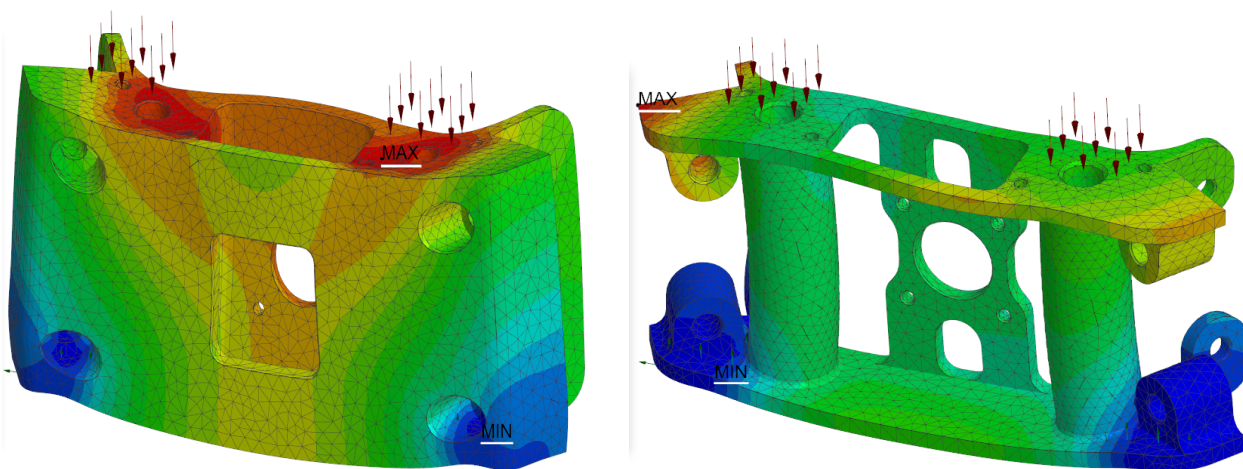


Рис. 5. Характер перемещений в неоптимизированной и оптимизированной детали

Получив готовую форму детали, необходимо удостовериться, что данное изделие способно обеспечить работоспособность всего устройства с учетом воздействующих на него нагрузок. Этот функционал обеспечивает CAE-приложение [5, 7, 8]. Основная нагрузка, воздействующая на деталь, в статике – это вес верхней части принтера, приложенный к поверхности уголка через держатели направляющих. В процессе работы к этому виду силового воздействия следует добавить переменную составляющую (для простоты можно принять низкочастотный гармонический закон этого усилия), обусловленную наличием движущихся элементов в конструкции.

CAE-анализ детали предполагает задание нагрузки на площадках крепления держателей направляющих. Принимая постоянную составляющую в 30 Н, а переменную как $3\sin(3t)$ Н и распределяя по площади в контактных зонах, проводим с прочностной расчет [7, 8]. Материал изделия (HIPS) выбирается (один из вариантов при проектировании), исходя из механических и экологических требований.

Максимальное перемещение неоптимизированной детали составляет 0,12 мм, а оптимизированной

детали – 0,35 мм, что является допустимым, учитывая условия эксплуатации. При этом максимальные перемещения неоптимизированной детали принтера соответствуют наиболее уязвимым местам деталей. В этом случае смещения сконцентрированы в центре изделия, так как здесь обнаруживается наименее жесткая часть конструкции. А в случае оптимизированного изделия наибольшие смещения при нагрузке сосредоточены на крайних верхних поверхностях детали. Визуализация анализа детали до оптимизации и после, с учетом масштабного коэффициента представлена на рисунке 5 [7], при соотношении масс 58 %.

Для получения финальной формы изделия в производственных условиях целесообразно применять литье (серийное производство) или аддитивные технологии (мелкосерийное производство).

Цифровая сборка настольного 3D-принтера с исходным и оптимизированным креплением основания представлена на рисунке 6. Новое решение обладает аналогичными эксплуатационными качествами, но отличается меньшей материалоемкостью.

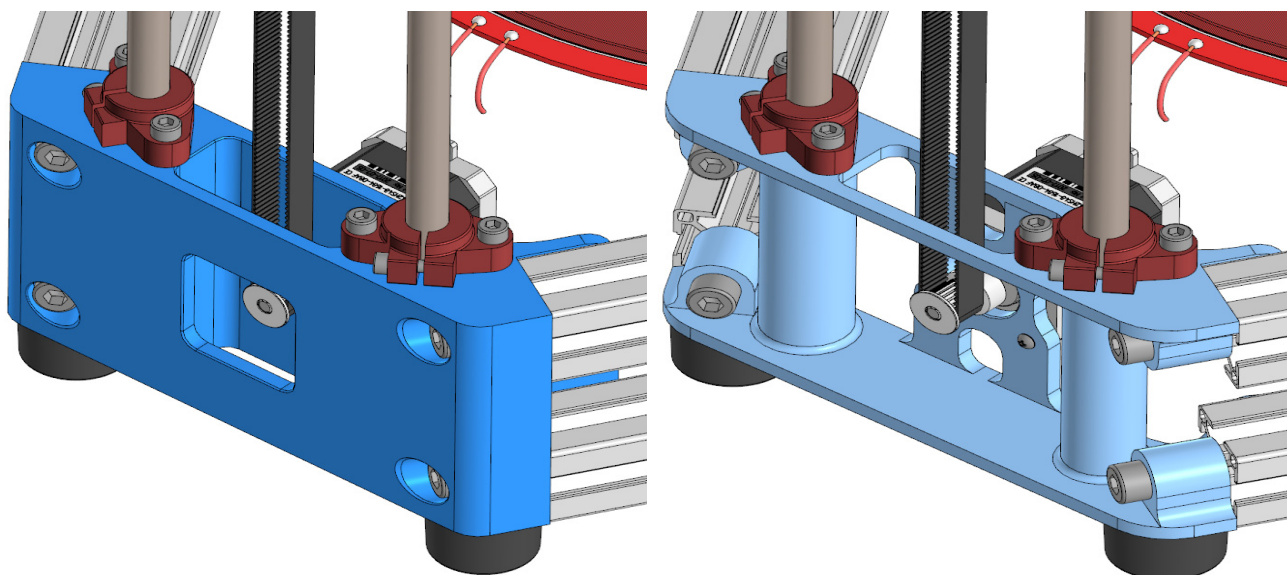


Рис. 6. Результат изменений в конструкции 3D-принтера

Новые технологические вызовы определяют направление в развитии производства, отвечают росту конкурентоспособности и качества продукции, приводят к ускоренному выпуску новых видов изделий. Проникновение цифровых технологий в деятельность малых машиностроительных предприятий находит отражение во внедрении и активном использовании CAD/CAM/CAE/CAO-, MES-платформ. Рост компетенций разработчиков позволяет проектировать оборудование и приборы, отличающиеся пониженными значениями энергоёмкости и материалоемкости, с высокими эргономическими показателями. Использование высокотехнологичных программных платформ характеризует тенденцию появления производств с цифровым сопровождением, что приводит к росту производительности труда и повышению потребительских свойств товаров и услуг.

Литература

1. Боровков, А. О дорожной карте «Технет» (передовые производственные технологии) национальной технологической инициативы / А. Боровков, Ю. Рябов // Двигатели для гражданской авиации. – 2017. – № 10. – С. 8–11. – URL: http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/04_april/13/Korporativnyy_jurnal_Tramplin_k_uspehu_10_2017_O_Technet_Nti.pdf (дата обращения: 12.03.2021). – Текст : электронный.
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/tsifrovoye_proi

zvodstvo_112017.pdf (дата обращения: 6.11. 2019). – Текст : электронный.

3. Булавин, В. Ф. PLM-стратегия в мелкосерийном производстве машиностроительной отрасли / В. Ф. Булавин, В. В. Яхричев, В. А. Глазков. – doi: 10.18698/0536-1044-2018-8-37-49 // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2018. – № 8. – С. 37–49.

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

5. Цифровой формат подготовки приборостроительного производства. Часть 1. Конструкторский этап / В. Ф. Булавин, Т. Г. Булавина, В. В. Яхричев, А. С. Степанов. – doi: 10.17586/0021-3454-2020-63-3-157-166 // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2020. – № 3. – С. 1–8.

6. Цифровой формат подготовки приборостроительного производства. Часть 2. Технологический этап / В. Ф. Булавин, Т. Г. Булавина, В. В. Яхричев, А. С. Степанов. – doi: 10.17586/0021-3454-2020-63-3-167-172 // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2020. – № 3. – С. 9–15.

7. Алямовский, А. А. Инженерные расчеты в Solid Works Simulation / А. А. Алямовский. – Москва : ДМК-Пресс, 2010. – 464 с.

8. Digital support of production small business preparation in engineering / V. F. Bulavin, T. G. Bulavina, C. A. Stepanov, A. A. Frolov, V. V. Yahrchev // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1399, Issue. – P. 033045.

I.S. Petryashov, V.F. Bulavin
Vologda State University

ENGINEERING SUPPORT IN SMALL ENTERPRISES

The machine-building sector of the North-West region is consistently implementing digital technologies based on CAD products. The integrated application of the CAD/CAM/CAPP/CAE ideology is in its infancy, although its individual components are widely used in enterprises at all levels. The article discusses the results of the formation of competencies in the field of CAE/CAD design, which combine advanced production technologies and business models for their dissemination in the sphere of small and medium-sized machine-building enterprises. The production of products for markets with new qualities and the creation of high-tech areas in the industry lead to the production of globally competitive products.

Digital design, topological engineering, optimization, digital twin, small machine-building enterprise.



ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАНТОВ И ОСОБЕННОСТЕЙ ОКОЛОРЕЗОНАНСНЫХ ЯВЛЕНИЙ В МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Представлено исследование механических систем в резонансных и околорезонансных режимах. Рассмотрены параллельное и последовательное соединения элементов механической системы с источником силы либо источником скорости в качестве источника внешнего механического гармонического воздействия. Предложен упрощенный метод моделирования вынужденных колебаний с использованием символического (комплексного) метода, позволяющего существенно повысить продуктивность, упростить и формализовать математические преобразования. Установлено, что вопреки классическому подходу резонансная частота не сдвигается от частоты свободных колебаний.

Реактанс, резистанс, импеданс, сассептанс, кондактанс, адмитанс.

В установившемся режиме при гармонических воздействиях удобно использовать комплексное представление величин [1, 2]. При этом символический (комплексный) метод существенно упрощает исследование резонансных и околорезонансных явлений [3–6]. В отличие от классического метода здесь не возникает необходимость в составлении и решении дифференциальных уравнений [7–9].

Целью исследования является исследование вариантов и особенностей околорезонансных явлений в механических системах.

Актуальность работы обусловлена тем, что механические колебания широко распространены в разнообразных технологических процессах.

По аналогии с электротехникой гармоническую величину можно представить в виде

$$a = A \sin(\omega t + \varphi) = \text{Im} \left[A e^{i(\omega t + \varphi)} \right],$$

где $A e^{i(\omega t + \varphi)}$ – вращающийся в комплексной плоскости вектор, ω – циклическая частота, φ – начальная фаза.

Векторы в комплексной плоскости принято изображать для нулевого момента времени. При этом величина $A e^{i(\omega t + \varphi)} = A e^{i\varphi} = \dot{A}$ называется комплексной амплитудой.

В основе исследования механических систем лежит дуально-инверсный аналог закона Ома для участка электрической цепи:

$$\dot{V} = \frac{\dot{F}}{\underline{z}} = \dot{F} \underline{y}, \quad (1)$$

где \dot{V} и \dot{F} – комплексные амплитуды скорости и силы, \underline{z} и \underline{y} – механические импеданс и адмитанс в комплексном представлении [1, 2].

Далее рассматриваются параллельное (рис. 1) и последовательное (рис. 2) соединения элементов механической системы [9].

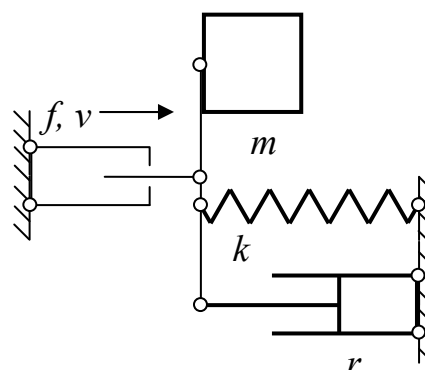


Рис. 1. Параллельное соединение

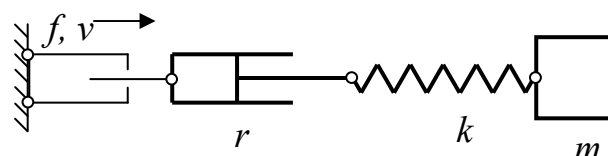


Рис. 2. Последовательное соединение

Аналитические описания резонанса в курсах теоретической механики соответствуют параллельному соединению.

Источниками внешнего механического гармонического воздействия на систему выступают либо источник силы, либо источник скорости [1, 2].

Существуют устройства, в удовлетворительном приближении способные выполнять функции источников силы и источников скорости. Источником гармонической скорости может выступать привод с кривошипно-кулисным механизмом и маховиком с большим моментом инерции. Источником гармонической силы может выступать шток пневмоцилиндра, полость которого сообщается с полостью другого пневмоцилиндра, диаметр которого неизмеримо выше, чем у первого, а поршень совершает гармонические колебания [9].

Источник силы характеризуется комплексной амплитудой силы:

$$\dot{F} = F e^{i0}. \quad (2)$$

Источник скорости характеризуется комплексной амплитудой скорости:

$$\dot{V} = Ve^{i0}. \quad (3)$$

Механические гармонические воздействия, описываемые в курсах теоретической механики, соответствуют источнику силы.

Параллельное соединение характеризуется следующими величинами [1, 2].

Инертный реактанс –

$$\underline{x}_m = \omega m e^{i\pi/2} = x_m e^{i\pi/2}, \quad (4)$$

где m – масса.

Упругий реактанс –

$$\underline{x}_k = \frac{k}{\omega} e^{-i\pi/2} = x_k e^{-i\pi/2}, \quad (5)$$

где k – коэффициент упругости.

Механический резистанс –

$$\underline{r} = r e^{i0} = r,$$

где r – коэффициент вязкого сопротивления.

Механический импеданс –

$$\underline{z} = Ze^{i\varphi}, \quad (6)$$

где $Z = \sqrt{r^2 + (x_m - x_k)^2}$, $\varphi = \arctg \frac{x_m - x_k}{r}$.

Последовательное соединение характеризуется следующими величинами [там же].

Инертный сассептанс –

$$\underline{b}_m = \frac{1}{\omega m} e^{-i\pi/2} = b_m e^{-i\pi/2}. \quad (7)$$

Упругий сассептанс –

$$\underline{b}_k = \frac{\omega}{k} e^{i\pi/2} = b_k e^{i\pi/2}. \quad (8)$$

Механический кондактанс –

$$\underline{g} = g e^{i0} = g.$$

Для элемента (инертного, упругого, резистивного), рассматриваемого вне связи с другими механическими элементами, $\underline{b}_m = 1/\underline{x}_m$, $b_k = 1/x_k$, $\underline{g} = 1/\underline{r}$. В системе, включающей несколько элементов, соотношения иные [2].

Механический адмитанс –

$$\underline{y} = Ye^{i\varphi}, \quad (9)$$

где $Y = \sqrt{g^2 + (b_k - b_m)^2}$, $\varphi = \arctg \frac{b_k - b_m}{g}$.

1. Параллельное соединение и источник силы. Резонанс сил.

Комплексная амплитуда скорости (см. (1)) –

$$\dot{V} = \frac{\dot{F}}{\underline{z}} = \frac{F}{z} e^{-i\varphi} = Ve^{-i\varphi}. \quad (10)$$

Комплексная амплитуда инертной силы –

$$\dot{F}_m = \underline{x}_m \dot{V} = x_m V e^{i(\pi/2 - \varphi)} = F_m e^{i(\pi/2 - \varphi)}. \quad (11)$$

Комплексная амплитуда упругой силы –

$$\dot{F}_k = \underline{x}_k \dot{V} = x_k V e^{-i(\pi/2 + \varphi)} = F_k e^{-i(\pi/2 + \varphi)}. \quad (12)$$

Комплексная амплитуда резистивной силы –

$$\dot{F}_r = \underline{r} \dot{V} = r V e^{-i\varphi} = F_r e^{-i\varphi}. \quad (13)$$

Разумеется,

$$\dot{F}_m + \dot{F}_k + \dot{F}_r = \dot{F}. \quad (14)$$

Из закона Гука, (12) и (5) следует выражение для комплексной амплитуды отклонения –

$$\begin{aligned} \dot{X} &= \frac{\dot{F}_k}{k} = \frac{x_k V e^{-i(\pi/2 + \varphi)}}{k} = \frac{k V e^{-i(\pi/2 + \varphi)}}{\omega k} = \\ &= \frac{V}{\omega} e^{-i(\pi/2 + \varphi)} = X e^{-i(\pi/2 + \varphi)} \end{aligned} \quad (15)$$

Из второго закона Ньютона, (11) и (4) следует выражение для комплексной амплитуды ускорения –

$$\begin{aligned} \dot{A} &= \frac{\dot{F}_m}{m} = \frac{x_m V e^{i(\pi/2 - \varphi)}}{m} = \frac{\omega m V e^{i(\pi/2 - \varphi)}}{m} = \\ &= \omega V e^{i(\pi/2 - \varphi)} = A e^{i(\pi/2 - \varphi)} \end{aligned} \quad (16)$$

Разумеется, $A = \omega V = \omega^2 X$.

Из (10)–(16) и (4)–(6) следуют амплитудно-частотные характеристики:

$$\begin{aligned} F_k(\omega) &= \frac{kF}{\omega \sqrt{r^2 + (\omega m - k/\omega)^2}}, \\ X(\omega) &= \frac{F}{\omega \sqrt{r^2 + (\omega m - k/\omega)^2}}, \\ F_r(\omega) &= \frac{rF}{\sqrt{r^2 + (\omega m - k/\omega)^2}}, \quad V(\omega) = \frac{F}{\sqrt{r^2 + (\omega m - k/\omega)^2}}, \quad (17) \end{aligned}$$

$$F_m(\omega) = \frac{\omega m F}{\sqrt{r^2 + (\omega m - k/\omega)^2}}, \quad A(\omega) = \frac{\omega F}{\sqrt{r^2 + (\omega m - k/\omega)^2}}. \quad (18)$$

Разумеется,

$$F = \sqrt{F_r^2 + (F_k - F_m)^2}. \quad (19)$$

Графики функций $X(\omega)$, $V(\omega)$, $A(\omega)$ ведут себя качественно так же, как, соответственно, $F_k(\omega)$, $F_r(\omega)$, $F_m(\omega)$.

Частота ω_k , на которой функции $X(\omega)$ и $F_k(\omega)$ имеют максимум, определяется из условия

$$\frac{d}{d\omega} \left\{ \omega^{-1} \left[(k\omega^{-1} - m\omega)^2 + r^2 \right]^{-1/2} \right\} = 0.$$

Решение этого уравнения:

$$\omega_k = \sqrt{\frac{k}{m}} \sqrt{1 - r^2 / (2km)} = \omega_0 \sqrt{1 - r^2 / (2x_w^2)} = \omega_0 \sqrt{1 - d^2 / 2},$$

где $x_w = \sqrt{km}$ – волновое сопротивление (системы), $d = r/x_w$ – затухание (системы) (по аналогии с электротехникой).

$$F_{k \max} = F_k(\omega_k) = \frac{Q}{\sqrt{1 - d^2 / 4}} F,$$

$$X_{\max} = X(\omega_k) = \frac{Q}{\sqrt{1 - d^2 / 4}} \frac{F}{k} = \frac{Q}{\sqrt{1 - d^2 / 4}} X_0,$$

где $Q = 1/d$ – добротность (системы) (по аналогии с электротехникой), $X_0 = X(0) = F/k$ – статическое отклонение.

Частота ω_r , на которой функции $V(\omega)$ и $F_r(\omega)$ имеют максимум, очевидным образом равна $\omega_r = \sqrt{k/m} = \omega_0$.

$$F_{r \max} = F_r(\omega_0) = F, V_{\max} = V(\omega_0) = \frac{F}{r}. \quad (20)$$

Частота ω_m , на которой функции $A(\omega)$ и $F_m(\omega)$ имеют максимум, определяется из условия

$$\frac{d}{d\omega} \left\{ \omega \left[(k\omega^{-1} - m\omega)^2 + r^2 \right]^{-1/2} \right\} = 0.$$

Решение этого уравнения:

$$\omega_m = \sqrt{\frac{k}{m}} \frac{1}{\sqrt{1-r^2/(2km)}} = \frac{\omega_0}{\sqrt{1-d^2/2}}. \quad (21)$$

$$F_{m \max} = F_m(\omega_m) = \frac{Q}{\sqrt{1-d^2/4}} F, \quad (22)$$

$$A_{\max} = A(\omega_m) = \frac{Q}{\sqrt{1-d^2/4}} \frac{F}{m} = \frac{Q}{\sqrt{1-d^2/4}} A_0,$$

где $A_0 = A(0) = F/m$ – постоянное ускорение (при нулевой частоте).

При $d^2/2 > 1$ функции $X(\omega)$, $A(\omega)$, $F_k(\omega)$, $F_m(\omega)$ не имеют максимумов в вещественном диапазоне частот.

Примечательно, что

$$\omega_k \omega_m = \omega_0^2, \quad (23)$$

$$F_{k \max} = F_{m \max}, \quad (24)$$

$$A_{\max} = \omega_0^2 X_{\max}, \quad (25)$$

$$\frac{A_{\max}}{\omega_m} = \omega_k X_{\max} = \frac{V_{\max}}{\sqrt{1-d^2/4}}. \quad (26)$$

Другие характерные точки:

$$F_m(\omega_k) = \frac{Q-d/2}{\sqrt{1-d^2/4}} F, A(\omega_k) = \frac{Q-d/2}{\sqrt{1-d^2/4}} A_0, \quad (27)$$

$$F_k(\omega_m) = \frac{Q-d/2}{\sqrt{1-d^2/4}} F, X(\omega_m) = \frac{Q-d/2}{\sqrt{1-d^2/4}} X_0, \quad (28)$$

$$F_m(\omega_0) = QF, A(\omega_0) = QA_0, F_k(\omega_0) = QF, X(\omega_0) = QX_0, \quad (29)$$

$$F_r(\omega_k) = F_r(\omega_m) = \frac{\sqrt{1-d^2/2}}{\sqrt{1-d^2/4}} F,$$

$$V(\omega_k) = V(\omega_m) = \frac{\sqrt{1-d^2/2}}{\sqrt{1-d^2/4}} \frac{F}{r} = \frac{\sqrt{1-d^2/2}}{\sqrt{1-d^2/4}} V(\omega_0). \quad (30)$$

Характерные отношения:

$$\frac{F_k(\omega_k)}{F_m(\omega_k)} = \frac{F_m(\omega_m)}{F_k(\omega_m)} = \frac{F_k(\omega_k)}{F_k(\omega_m)} = \frac{F_m(\omega_m)}{F_m(\omega_k)} = \quad (31)$$

$$= \frac{X(\omega_k)}{X(\omega_m)} = \frac{A(\omega_m)}{A(\omega_k)} = \frac{1}{1-d^2/2},$$

$$\frac{F_k(\omega_k)}{F_r(\omega_k)} = \frac{F_m(\omega_m)}{F_r(\omega_m)} = \frac{Q}{\sqrt{1-d^2/2}}, \quad (32)$$

$$\frac{F_k(\omega_m)}{F_r(\omega_m)} = \frac{F_m(\omega_k)}{F_r(\omega_k)} = Q\sqrt{1-d^2/2}. \quad (33)$$

На рисунке 3 представлены подлинные резонансные кривые для системы с параметрами: $F = 100$ Н, $m = 10$ кг, $k = 40$ кг·с⁻², $r = 10$ кг·с⁻¹.

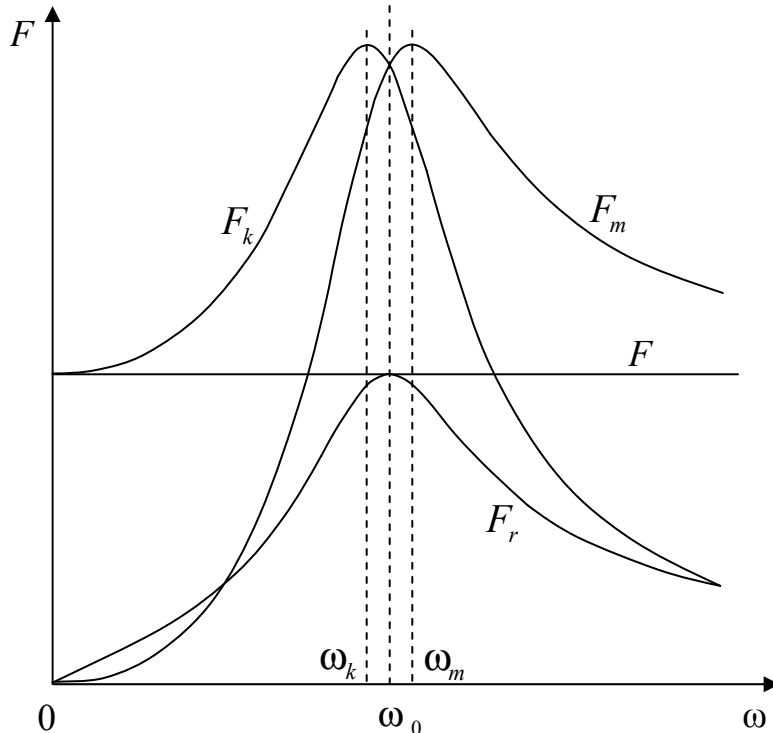


Рис. 3. Резонанс сил

На том основании, что амплитуда отклонения X имеет максимум на частоте Ω_k ($\Omega_k < \Omega_0$), она (Ω_k , а не Ω_0) считается резонансной частотой [10].

Это было бы сильным решением, если бы X был единственным значимым кинематическим параметром. Однако не менее значимыми параметрами являются амплитуды скорости V и ускорения A . При этом первая имеет максимум на частоте Ω_0 , а вторая – на частоте Ω_m ($\Omega_m > \Omega_0$). Таким образом, Ω_k ничем не лучше, чем Ω_0 и Ω_m . Единственным аргументом при выборе резонансной частоты остается соображение симметрии (усиленное выражением (23)), в соответствии с которым резонансная частота – Ω_0 .

Этот выбор становится еще более очевидным, если обратиться к силам.

Амплитуда упругой силы F_k имеет максимум на частоте Ω_k , амплитуда инертной силы F_m – на частоте Ω_m . Отдать предпочтение той или другой частоте невозможно. Однако именно на частоте Ω_0 имеет место резонанс сил, при котором реактивные силы F_k и F_m равны и противоположны, а их сумма соответственно равна нулю [9].

Кроме того, величина импеданса механической системы $Z = \sqrt{r^2 + (x_m - x_k)^2}$, характеризующего ее свойство оказывать сопротивление приводу, понуждающему ее совершать колебания, на частоте Ω_0 имеет минимальное значение. Другими словами, именно на частоте Ω_0 система оказывает приводу минимальное сопротивление.

Таким образом, резонансной частотой является исключительно ω_0 .

С другой стороны, имея в виду рисунок 3, можно вести речь о трех резонансных частотах: Ω_k , Ω_m и Ω_0 . На первой имеет место резонанс упругой силы, на второй – резонанс инертной силы, на третьей – резонанс резистивной силы.

2. Параллельное соединение и источник скорости. Антирезонанс сил.

Комплексная амплитуда инертной силы –

$$\dot{F}_m = \dot{x}_m \dot{V} = x_m V e^{i\pi/2} = F_m e^{i\pi/2}.$$

Комплексная амплитуда упругой силы –

$$\dot{F}_k = \dot{x}_k \dot{V} = x_k V e^{-i\pi/2} = F_k e^{-i\pi/2}.$$

Комплексная амплитуда резистивной силы –

$$\dot{F}_r = \dot{r} \dot{V} = r V e^{i0} = F_r e^{i0}.$$

Разумеется, $\dot{F}_m + \dot{F}_k + \dot{F}_r = \dot{F}$.

Комплексная амплитуда отклонения –

$$\dot{X} = \frac{\dot{F}_k}{k} = \frac{x_k V e^{-i\pi/2}}{k} = \frac{k V e^{-i\pi/2}}{\omega k} = \frac{V}{\omega} e^{-i\pi/2} = X e^{-i\pi/2} \quad (34)$$

Комплексная амплитуда ускорения –

$$\dot{A} = \frac{\dot{F}_m}{m} = \frac{x_m V e^{i\pi/2}}{m} = \frac{\omega m V e^{i\pi/2}}{m} = \omega V e^{i\pi/2} = A e^{i\pi/2}. \quad (35)$$

Комплексная амплитуда силы (см. (1)) –

$$\dot{F} = \dot{V} \dot{z} = V z e^{i\varphi} = F e^{i\varphi}.$$

Амплитудно-частотная характеристика –

$$F(\omega) = V \sqrt{r^2 + (\omega m - k/\omega)^2}.$$

При $\omega \rightarrow 0$ и $\omega \rightarrow \infty$ кривая $F(\omega)$ устремляется в бесконечность. При сверхмалых частотах условие (3) порождает чрезмерные деформации упругого элемента (34), сопровождаемые соответственно чрезмерными силами упругости. При сверхвысоких частотах условие (3) порождает чрезмерные ускорения (35) и чрезмерные инерционные силы.

При Ω_0 график проходит через минимум $F_{\min} = F(\omega_0) = Vr = F_r$. Имеет место антирезонанс сил, при котором реактивные силы F_k и F_m равны и противоположны, а их сумма соответственно равна нулю.

Для антирезонанса разностей со смещением антирезонансной частоты (она же резонансная) не возникает.

На рисунке 4 представлена подлинная антирезонансная кривая для системы, отличающейся от первой тем, что $V = 10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$.

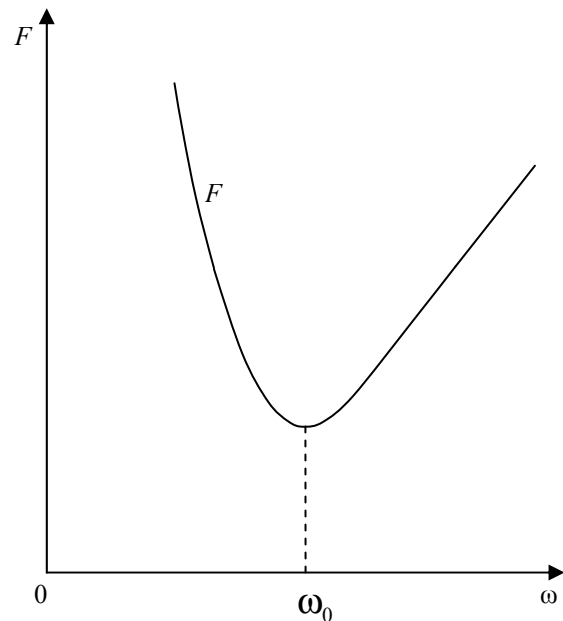


Рис. 4. Антирезонанс сил

3. Последовательное соединение и источник скорости. Резонанс скоростей.

Порядок рассуждений такой же, как в п. 1.

Комплексная амплитуда силы (см. (1)) –

$$\dot{F} = \frac{\dot{V}}{y} = \frac{V}{y} e^{-i\varphi} = F e^{-i\varphi}. \quad (36)$$

Комплексная амплитуда скорости инертного элемента –

$$\dot{V}_m = \underline{b}_m \dot{F} = b_m F e^{-i(\pi/2+\varphi)} = V_m e^{-i(\pi/2+\varphi)}. \quad (37)$$

Комплексная амплитуда скорости изменения длины упругого элемента –

$$\dot{V}_k = \underline{b}_k \dot{F} = b_k F e^{i(\pi/2-\varphi)} = V_k e^{i(\pi/2-\varphi)}. \quad (38)$$

Комплексная амплитуда скорости изменения длины резистивного элемента –

$$\dot{V}_r = \underline{g} \dot{F} = g F e^{-i\varphi} = V_r e^{-i\varphi}. \quad (39)$$

Разумеется,

$$\dot{V}_m + \dot{V}_k + \dot{V}_r = \dot{V}. \quad (40)$$

Из (37) следует выражение для комплексной амплитуды импульса –

$$\begin{aligned} \dot{P} &= m \dot{V}_m = m b_m F e^{-i(\pi/2+\varphi)} = m \frac{1}{\omega m} F e^{-i(\pi/2+\varphi)} = \\ &= \frac{F}{\omega} e^{-i(\pi/2+\varphi)} = P e^{-i(\pi/2+\varphi)} \end{aligned} \quad (41)$$

Из (38) следует выражение для комплексной амплитуды производной силы (специального названия не имеет, приводится здесь как дуальный аналог преобразования (16)) –

$$\begin{aligned} \dot{B} &= k \dot{V}_k = k b_k F e^{i(\pi/2-\varphi)} = k \frac{\omega}{k} F e^{i(\pi/2-\varphi)} = \\ &= \omega F e^{i(\pi/2-\varphi)} = B e^{i(\pi/2-\varphi)}. \end{aligned} \quad (42)$$

Это соответствует преобразованию

$$k v = k \frac{dx}{dt} = \frac{d(kx)}{dt} = \frac{dF}{dt} = B. \quad (43)$$

Разумеется,

$$B = \omega F = \omega^2 P. \quad (44)$$

Из (36)–(42) и (7)–(9) следуют амплитудно-частотные характеристики:

$$V_m(\omega) = \frac{V}{\omega m \sqrt{1/r^2 + [\omega/k - 1/(\omega m)]^2}}, \quad (45)$$

$$P(\omega) = \frac{V}{\omega \sqrt{1/r^2 + [\omega/k - 1/(\omega m)]^2}},$$

$$V_r(\omega) = \frac{gV}{\sqrt{1/r^2 + [\omega/k - 1/(\omega m)]^2}},$$

$$F(\omega) = \frac{V}{\sqrt{1/r^2 + [\omega/k - 1/(\omega m)]^2}}, \quad (46)$$

$$V_k(\omega) = \frac{\omega V}{k \sqrt{1/r^2 + [\omega/k - 1/(\omega m)]^2}}, \quad (47)$$

$$B(\omega) = \frac{\omega V}{\sqrt{1/r^2 + [\omega/k - 1/(\omega m)]^2}}.$$

Разумеется,

$$V = \sqrt{V_r^2 + (V_k - V_m)^2}. \quad (48)$$

Графики функций $P(\omega)$, $F(\omega)$, $B(\omega)$ ведут себя качественно так же, как, соответственно, $V_m(\omega)$, $V_r(\omega)$, $V_k(\omega)$.

Частота ω_m , на которой функции $P(\omega)$ и $V_m(\omega)$ имеют максимум, определяется из условия:

$$\frac{d}{d\omega} \left\{ \omega^{-1} \left[(k^{-1}\omega - m^{-1}\omega^{-1})^2 + r^{-2} \right]^{-1/2} \right\} = 0.$$

Решение этого уравнения:

$$\omega_m = \sqrt{\frac{k}{m}} \sqrt{1 - mk/(2r^2)} = \omega_0 \sqrt{1 - x_w^2/(2r^2)} = \omega_0 \sqrt{1 - Q^2/2}. \quad (49)$$

$$V_{m \max} = V_m(\omega_m) = \frac{d}{\sqrt{1 - Q^2/4}} V, \quad (50)$$

$$P_{m \max} = P_m(\omega_m) = \frac{d}{\sqrt{1 - Q^2/4}} V m = \frac{d}{\sqrt{1 - Q^2/4}} P_0,$$

где $P_0 = P(0) = Vm$ – постоянный импульс (при нулевой частоте).

Частота ω_r , на которой функции $F(\omega)$ и $V_r(\omega)$ имеют максимум, очевидным образом равна

$$\omega_r = \sqrt{\frac{k}{m}} = \omega_0.$$

$$V_{r \max} = V_r(\omega_0) = V, \quad F_{\max} = F(\omega_0) = \frac{V}{g}. \quad (51)$$

Частота ω_k , на которой функции $B(\omega)$ и $V_k(\omega)$ имеют максимум, определяется из условия

$$\frac{d}{d\omega} \left\{ \omega \left[(k^{-1}\omega - m^{-1}\omega^{-1})^2 + r^{-2} \right]^{-1/2} \right\} = 0.$$

Решение этого уравнения:

$$\omega_k = \sqrt{\frac{k}{m}} \frac{1}{\sqrt{1 - km/(2r^2)}} = \frac{\omega_0}{\sqrt{1 - Q^2/2}}. \quad (52)$$

$$V_{k \max} = V_k(\omega_k) = \frac{d}{\sqrt{1 - Q^2/4}} V, \quad (53)$$

$$B_{\max} = B(\omega_k) = \frac{d}{\sqrt{1 - Q^2/4}} V k = \frac{d}{\sqrt{1 - Q^2/4}} B_0,$$

где $B_0 = B(0) = V k$ – постоянная производная силы (при нулевой частоте).

При $Q^2/2 > 1$ функции $P(\omega)$, $B(\omega)$, $V_m(\omega)$, $V_k(\omega)$ не имеют максимумов в вещественном диапазоне частот.

Примечательно, что

$$\omega_k \omega_m = \omega_0^2, \quad (54)$$

$$V_{k \max} = V_{m \max}, \quad (55)$$

$$B_{\max} = \omega_0^2 P_{\max}, \quad (56)$$

$$\frac{B_{\max}}{\omega_k} = \omega_m P_{\max} = \frac{F_{\max}}{\sqrt{1 - Q^2/4}}. \quad (57)$$

Другие характерные точки:

$$V_m(\omega_k) = \frac{d-Q/2}{\sqrt{1-Q^2/4}} V, \quad P(\omega_k) = \frac{d-Q/2}{\sqrt{1-Q^2/4}} P_0, \quad (58)$$

$$V_k(\omega_m) = \frac{d-Q/2}{\sqrt{1-Q^2/4}} V, \quad B(\omega_m) = \frac{d-Q/2}{\sqrt{1-Q^2/4}} B_0, \quad (59)$$

$$V_m(\omega_0) = d \cdot V, \quad P(\omega_0) = d \cdot P_0, \quad V_k(\omega_0) = d \cdot V, \\ B(\omega_0) = d \cdot B_0, \quad (60)$$

$$V_r(\omega_k) = V_r(\omega_m) = \frac{\sqrt{1-Q^2/2}}{\sqrt{1-Q^2/4}} V, \\ F(\omega_k) = F(\omega_m) = \frac{\sqrt{1-Q^2/2}}{\sqrt{1-Q^2/4}} \frac{V}{g} = \frac{\sqrt{1-Q^2/2}}{\sqrt{1-Q^2/4}} F(\omega_0). \quad (61)$$

Характерные отношения:

$$\frac{V_k(\omega_k)}{V_m(\omega_k)} = \frac{V_m(\omega_m)}{V_k(\omega_m)} = \frac{V_k(\omega_k)}{V_k(\omega_m)} = \frac{V_m(\omega_m)}{V_m(\omega_k)} = \\ = \frac{P(\omega_m)}{P(\omega_k)} = \frac{B(\omega_k)}{B(\omega_m)} = \frac{1}{1-d^2/2}, \quad (62)$$

$$\frac{V_k(\omega_k)}{V_r(\omega_k)} = \frac{V_m(\omega_m)}{V_r(\omega_m)} = \frac{d}{\sqrt{1-Q^2/2}}, \quad (63)$$

$$\frac{V_k(\omega_m)}{V_r(\omega_m)} = \frac{V_m(\omega_k)}{V_r(\omega_k)} = d\sqrt{1-Q^2/2}. \quad (64)$$

Амплитуда импульса P имеет максимум на частоте ω_m ($\omega_m < \omega_0$), амплитуда силы F – на частоте ω_0 , амплитуда производной силы B – на частоте ω_k ($\omega_k > \omega_0$).

Амплитуда скорости инертного элемента V_m имеет максимум на частоте ω_m , амплитуда скорости изменения длины упругого элемента V_k – на частоте ω_k .

На частоте ω_0 имеет место резонанс скоростей, при котором (реактивные) скорости V_m и V_k равны и противоположны, а их сумма соответственно равна нулю [9].

Величина адмитанса механической системы $Y = \sqrt{g^2 + (b_k - b_m)^2}$, характеризующего ее свойство не оказывать сопротивление приводу, понуждающему ее совершать колебания, на частоте ω_0 имеет минимальное значение. Другими словами, именно на частоте ω_0 система оказывает приводу максимальное сопротивление.

Таким образом, резонансной частотой является исключительно ω_0 .

Для системы с параметрами, отличающимися от параметров второй тем, что $g = 40 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}$, подлинны резонансные кривые полностью совпадают с изображенными на рисунке 3 при заменах $F_k \rightarrow V_m$, $F_m \rightarrow V_k$, $F_r \rightarrow V_r$, $\omega_k \rightarrow \omega_m$, $\omega_m \rightarrow \omega_k$.

С другой стороны, имея в виду рис. 3, можно вести речь о трех резонансных частотах: ω_m , ω_k и ω_0 . На первой имеет место резонанс скорости инертного элемента, на второй – резонанс скорости изменения длины упругого элемента, на третьей – резонанс скорости изменения длины резистивного элемента.

4. Последовательное соединение и источник силы. Антирезонанс скоростей.

Порядок рассуждений такой же, как в п. 2.

Комплексная амплитуда скорости инертного элемента –

$$\dot{V}_m = \underline{b}_m \dot{F} = b_m F e^{-i\pi/2} = V_m e^{-i\pi/2}.$$

Комплексная амплитуда скорости изменения длины упругого элемента –

$$\dot{V}_k = \underline{b}_k \dot{F} = b_k F e^{i\pi/2} = V_k e^{-i\pi/2}.$$

Комплексная амплитуда скорости изменения длины резистивного элемента

$$-\dot{V}_r = \underline{g} \dot{F} = g F e^{i0} = V_r e^{i0}.$$

Разумеется, $\dot{V}_m + \dot{V}_k + \dot{V}_r = \dot{V}$.

Комплексная амплитуда импульса –

$$\dot{P} = m \dot{V}_m = m b_m F e^{-i\pi/2} = m \frac{1}{\omega m} F e^{-i\pi/2} = \frac{F}{\omega} e^{-i\pi/2} = P e^{-i\pi/2}. \quad (65)$$

Комплексная амплитуда производной силы –

$$\dot{B} = k \dot{V}_k = k b_k F e^{i\pi/2} = k \frac{\omega}{k} F e^{i\pi/2} = \omega F e^{i\pi/2} = B e^{i\pi/2}. \quad (66)$$

Комплексная амплитуда скорости (см. (1)) –

$$\dot{V} = \dot{F} \underline{y} = F y e^{i\varphi} = V e^{i\varphi}.$$

Амплитудно-частотная характеристика –

$$V(\omega) = F \sqrt{g^2 + (\omega/k - 1/(\omega m))^2}.$$

При $\omega \rightarrow 0$ и $\omega \rightarrow \infty$ кривая $V(\omega)$ устремляется в бесконечность. При сверхмалых частотах условие (2) порождает чрезмерный импульс (65), сопровождаемый, соответственно чрезмерной скоростью инертного элемента. При сверхвысоких частотах условие (2) порождает чрезмерную производную силы (66) и чрезмерную скорость изменения длины упругого элемента. При ω_0 график проходит через минимум $V_{\min} = V(\omega_0) = Fg = V_r$. Имеет место антирезонанс скоростей, при котором (реактивные) скорости V_m и V_k равны и противоположны, а их сумма соответственно равна нулю.

Для системы, отличающейся от третьей тем, что $F = 100 \text{ Н}$, подлинная антирезонансная кривая полностью совпадает с изображенной на рисунке 4 при замене $F \rightarrow V$.

Использование символического (комплексного) метода существенно упростило исследование резонансных и околорезонансных явлений, в частности, позволило глубоко унифицировать и формализовать рассмотрение различных механических систем (п. 1 и 3, 2 и 4 являются дуально инверсными). Громоздкие и трудоемкие операции, связанные с составлением и решением дифференциальных уравнений, заменены простыми алгебраическими преобразованиями.

В основе метода лежит механический аналог закона Ома в комплексном представлении (1) и понятия о механических реактансе, резистансе, импедансе, сасцептансе, кондактансе и адмитансе.

С помощью этого метода получены новые результаты, в т. ч. (14), (17)–(33), (40)–(64).

В дополнение к классическому методу рассмотрены последовательное соединение механических элементов и источник скоростей.

Классическое рассмотрение доставляет одну амплитудно-частотную характеристику, символический (комплексный) метод – восемь при значительно большем числе характерных точек и характерных отношений.

Установлено, что вопреки классическому подходу резонансной частотой является исключительно Ω_0 (а не Ω_k). Другими словами, резонансная частота не сдвигается от частоты свободных колебаний. Это обусловлено тем, что при классическом рассмотрении не установлена симметрия частот (23), (54), а при символическом она очевидна.

С другой стороны, можно вести речь о трех резонансных частотах: Ω_k , Ω_m и Ω_0 . На первой имеет место резонанс упругой силы и резонанс скорости изменения длины упругого элемента, на второй – резонанс инертной силы и резонанс скорости инертного элемента, на третьей – резонанс резистивной силы и резонанс скорости изменения длины резистивного элемента.

Определены резонанс и антирезонанс сил, резонанс и антирезонанс скоростей, которые не были определены классическим методом. Резонансы возникают при сочетаниях параллельного соединения элементов и источника силы либо последовательного соединения и источника скорости. Антирезонансы возникают при сочетаниях параллельного соединения и источника скорости либо последовательного соединения и источника силы.

Для всех описанных случаев фазо-частотные характеристики особой оригинальностью не отличаются и поэтому не рассматриваются.

Литература

1. Попов, И. П. Исследование вынужденных колебаний механических систем / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2019. – № 4 (6). – Ч. 1. – С. 21–25.
2. Попов, И. П. Исследование вынужденных колебаний механических систем / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2020. – № 1 (7). – Ч. 2. – С. 27–32.
3. Попов, И. П. Диссипативная, реактивная и полная мощности виброприводов машин / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2019. – № 3 (5). – С. 72–74.
4. Попов, И. П. Инертная колебательная система из двух грузов для вибрационных механизмов / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2020. – № 2 (8). – С. 10–12.
5. Попов, И. П. Использование инертного триплетного маятника в вибрационных сортировальных машинах / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2020. – № 3 (9). – С. 11–13.
6. Попов, И. П. Построение вибрационных сортировальных машин по схеме мультиинертного осциллятора / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2020. – № 3 (9). – С. 14–17.
7. Thompson, W. T. Theory of Vibrations / Thompson, W. T. – Nelson Thornes Ltd., 1996. – 295 p.
8. Inman, Daniel J. Engineering Vibration / Inman, Daniel J. – Prentice Hall, 2001. – 418 p.
9. Попов, И. П. Исследование резонансов в технических системах / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2019. – № 2 (4). – С. 15–18.
10. Яворский, Б. М. Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – Москва : Наука. – 1980. – 512 с.

I.P. Popov

Kurgan State University

STUDY OF VARIANTS AND FEATURES OF NEAR-RESONANT PHENOMENA IN MECHANICAL SYSTEMS

The study of mechanical systems in resonant and near-resonant modes is presented. Parallel and sequential connection of elements in a mechanical system with a source of force or a source of speed as a source of external mechanical harmonic action are considered. A simplified method for modeling forced oscillations using a symbolic (complex) method is proposed. It makes it possible to significantly increase productivity, simplify and formalize mathematical transformations. It was found that, contrary to the classical approach, the resonant frequency does not shift from the frequency of free oscillations.

Reactance, Resistance, Impedance, Susceptance, Conductance, Admittance.



ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОЙ МАССЫ ДЛЯ БАЛАНСИРОВКИ МЕХАНИЗМОВ

Исследуется возможность аналитического синтеза искусственной величины, имеющей размерность массы и удовлетворяющей главному уравнению механики, посредством которого определяется инертность. Синтезированная с применением электрических устройств инертность может использоваться для создания систем автоматизированной балансировки машин, массивные рабочие органы которых совершают возвратно-поступательные движения. Особую значимость эта задача приобретает для грохотов, применяемых для сепарации балласта, используемого при укладке железнодорожного полотна, поскольку массы движущихся частей непрерывно изменяются в широких пределах за счет непостоянства подачи сортируемого материала. Возникающая в таких случаях неуравновешенность машины вызывает значительную вибрацию, компенсировать которую иными средствами затруднительно. При автоматизированной балансировке грохотов в следящем режиме движущийся элемент объекта с синтезированной инертностью должен быть прикреплен к движущейся массивной части грохота, подлежащей регулированию. Посредством следящей системы фиксируется отклонение от оптимальной инертной массы и осуществляется ее коррекция.

Синтезированная инертность, грохот, балласт, неуравновешенность, вибрация, магнитное поле, электрическое поле.

Существует два вида массы, которые эквивалентны друг другу, – гравитационная и инертная [1]. Первая определяется законом всемирного тяготения, вторая – главным уравнением механики:

$$f = m \frac{d^2x}{dt^2}, \quad (1)$$

где f – сила, Н; m – масса, кг; x – перемещение, м; t – время, с.

Величина как гравитационной, так и инертной массы непосредственно зависит от объема и плотности материала физического тела, обладающего массой [2].

Величина m_c , являющаяся параметром какого-либо устройства и удовлетворяющего выражению (1) вне зависимости от объема и плотности материала, из которого оно изготовлено, может рассматриваться в качестве искусственно созданной массы. Подчинение выражению (1) означает, что устройство обладает искусственной инертностью, природа которой не связана с наличием и плотностью вещества [3].

Постановка задачи. Задачей исследования является аналитический синтез искусственной величины, имеющей размерность массы и удовлетворяющей выражению (1), другими словами, синтез искусственной инертности.

Косвенное указание на возможность такого синтеза дает изоморфизм в математическом смысле, связывающий формулы для механических и электрических процессов, один из вариантов которого предполагает следующее дуальное соответствие:

$$m \Rightarrow C. \quad (2)$$

Вместе с тем изоморфные соотношения нельзя рассматривать как непосредственные физические зависимости в силу того, что связываемые процессы или объекты физически не взаимодействуют. По этой причине рассматривать применение электрической емкости для моделирования синтезированной массы возможно лишь в такой технической системе, в которой одновременно протекают как механические, так и электрические процессы.

Актуальность, научная значимость. Синтезированная с применением электрических устройств инертность может использоваться для создания систем автоматизированной балансировки машин, массивные рабочие органы которых совершают возвратно-поступательные движения [4–6]. Особую значимость эта задача приобретает для грохотов, применяемых для сепарации балласта, используемого при укладке железнодорожного полотна, поскольку массы движущихся частей непрерывно изменяются в широких пределах за счет непостоянства подачи сортируемого материала. Возникающая в таких случаях неуравновешенность машины вызывает значительную вибрацию, компенсировать которую иными средствами затруднительно [7].

Конструктивное исполнение объекта с синтезированной инертностью представлено на рисунке. Число активных проводников – n , размер их участков, взаимодействующих с магнитным полем, – l , величина индукции – B , электрическая емкость – C . Остальные параметры обмотки, как механические, так и электрические, во внимание не принимаются.

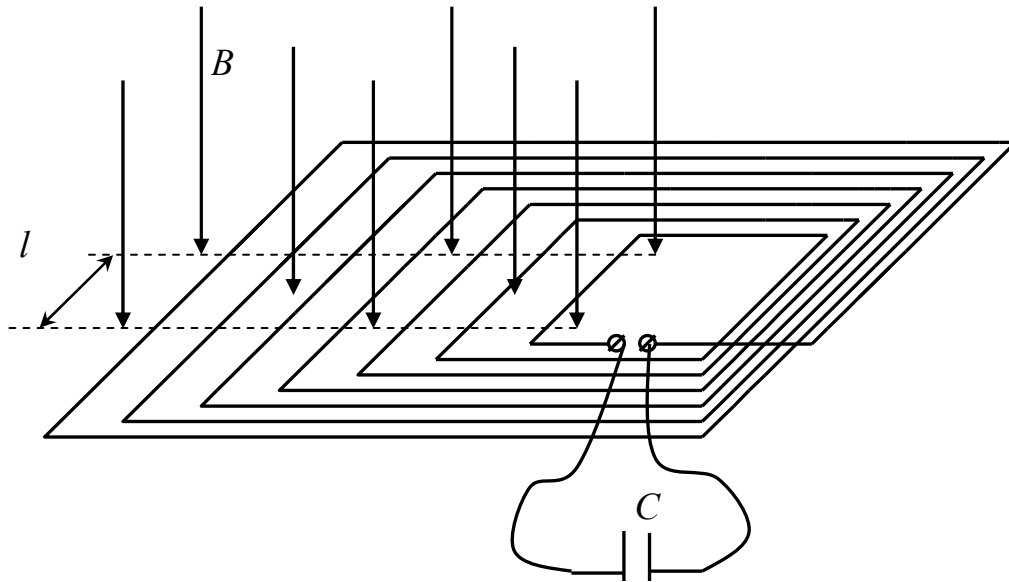


Рис. Устройство, обладающее искусственной массой

Описание процессов. Электродвижущая сила, индуцируемая в обмотке, связана со скоростью движения обмотки относительно силовых линий магнитного поля:

$$e_i = -Bln \frac{dx}{dt}$$

Эта ЭДС равна напряжению на обкладках конденсатора:

$$Bln \frac{dx}{dt} = \frac{1}{C} \int_0^t i dt,$$

где i – электрический ток. Дифференцирование полученной формулы по времени дает

$$Bln \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{1}{C} i,$$

$$i = BlnC \frac{d^2x}{dt^2}.$$

Подстановка выражения для тока в формулу для силы Ампера приводит к следующему:

$$F = Blni = (Bln)^2 C \frac{d^2x}{dt^2} = m_C \frac{d^2x}{dt^2}.$$

Полученная формула совпадает с (1) – главным уравнением механики, которое и определяет массу. В этой формуле

$$m_C = (Bln)^2 C, \quad (3)$$

где m_C – синтезированная масса.

Отсюда вытекает формула для синтезированной (квазиэлектрической) емкости, величина которой определяется массой:

$$C_m = \frac{m}{(Bln)^2}.$$

Объект с емкостной инертностью (3), соединенный с упругим элементом, представляет собой коле-

бательную систему, в которой могут возникать свободные гармонические колебания с частотой

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m_C}} = \frac{1}{Bln} \sqrt{\frac{k}{C}},$$

где k – коэффициент упругости пружины. Сопоставление этой формулы с известным соотношением

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

позволяет установить выражение для синтезированной индуктивности:

$$L_k = \frac{(Bln)^2}{k}.$$

Механический маятник km_C с не меньшими основаниями может быть представлен в качестве электрической системы CL_k .

Колебания в устройстве km_C (CL_k), осуществляемые без подвода энергии извне, сопровождаются трансформацией энергии электрического поля в потенциальную энергию упругого элемента и наоборот, т.е. происходит обмен энергиями различной физической природы.

Синтезированная инертность не сводится к изоморфизму (2), т.к. он непосредственно не позволяет использовать электрические приборы в составе механических изделий, равно как и грузы или пружины – в составе электрических устройств.

Практическая значимость. При автоматизированной балансировке механизмов, например грохотов в следящем режиме, движущийся элемент объекта с синтезированной инертностью должен быть прикреплен к движущейся массивной части грохота, подлежащей регулированию. Посредством следящей системы фиксируется отклонение от оптимальной инертной массы и осуществляется ее коррекция [8–10]. Выражение (3) показывает, что регулирующее воздействие на инертную массу производится путем усиления

или ослабления магнитного или электрического полей. В результате суммарная инертность остается неизменной, что обеспечивает балансировку грохота при его неравномерной загрузке.

Литература

1. Попов, И. П. Выбор систем отсчета в задачах управления движущимися инертными объектами / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2019. – № 1 (3). – С. 20–22.
2. Попов, И. П. Сглаживание нагрузки маневрового тепловоза / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2019. – № 2 (4). – С. 19–21.
3. Попов, И. П. Использование реактивного момента электромагнитного маховика для изменения положения объектов в пространстве / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2019. – № 3 (5). – С. 75–77.
4. Попов, И. П. Инертная колебательная система из двух грузов для вибрационных механизмов / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2020. – № 2 (8). – С. 10–12.
5. Попов, И. П. Использование инертного триплетного маятника в вибрационных сортировальных машинах / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2020. – № 3 (9). – С. 11–13.
6. Попов, И. П. Построение вибрационных сортировальных машин по схеме мультиинертного осциллятора / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2020. – № 3 (9). – С. 14–17.
7. Попов, И. П. Самобалансировка вибрационных механизмов / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2018. – № 2 (2). – С. 16–19.
8. Бакаев, В. Н. Управляемый электропривод механизмов маятникового типа / В. Н. Бакаев // Вестник Вологодского государственного университета. – 2019. – № 2 (4). – С. 5–8.
9. Ишметьев, Е. Н. Автоматизация процесса вычисления объема металлолома для кислородно-конвертерного процесса с использованием 3D-камеры / Е. Н. Ишметьев, Д. В. Чистяков, А. Н. Панов, Е. Э. Бодров // Автоматизированные технологии и производства. – 2017. – № 2 (16). – С. 4–9.
10. Бакаев, В. Н. Оптимизированный электропривод с переменными параметрами / В. Н. Бакаев // Вестник Вологодского государственного университета. – 2018. – № 1 (1). – С. 33–35.

I.P. Popov

Kurgan State University

APPLICATION OF ARTIFICIAL MASS FOR BALANCING MECHANISMS

The possibility of analytical synthesis of an artificial quantity having a dimension of mass and satisfying the main equation of mechanics by means of which inertia is determined is investigated. Synthesized with the use of electrical devices, inertia can be used to create automated balancing systems for machines, which massive working elements perform reciprocating movements. This task is particularly important for screens applied to separate the ballast used for laying the railroad track, since the masses of the moving parts continuously vary over a wide range due to inconsistent feed of the sorted material. The imbalance of the machine arising in such cases causes a considerable vibration, which is difficult to compensate by other means. With automated screen balancing in tracking mode, the moving element of the object with synthesized inertia should be attached to the moving massive part of the screen to be controlled. By means of the tracking system, the deviation from the optimum inert mass is fixed and its correction is carried out.

Synthesized inertia, screen, ballast, imbalance, vibration, magnetic field, electric field.



*Т.Д. Порядина, А.С. Степанов,
С.А. Фролов, В.В. Яхричев
Вологодский государственный университет*

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЦИФРОВЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ УЗЛОВ И ДЕТАЛЕЙ КОЗЛОВЫХ КРАНОВ

В статье рассматриваются механизмы решения задачи конструкторского обеспечения проектирования и производства технологической оснастки для производства деталей подъемно-транспортной машины – козлового крана. Результатом проведенных исследований и разработок является реализация методики применения цифровых инструментов конструкторско-технологического обеспечения проектирования и производства деталей подъемно-транспортного оборудования, выполняемой на базе специализированного прикладного программного обеспечения.

Технологическая оснастка, грузоподъемные машины, козловой кран, эксплуатационные воздействия, конечно-элементная модель, нагрузки, критерий прочности, критерий жесткости, 3D-модель, цифровой макет, конструкторская и технологическая подготовка производства, инженерный анализ.

На современном этапе развития технологий и производства основными инструментами повышения эффективности, конкурентоспособности и даже самого выживания предприятия в рыночных условиях, безусловно, являются цифровые методы и средства ведения бизнеса [1, 2, 3]. И в первую очередь речь идет об использовании современных средств организации конструкторско-технологического обеспечения. Аксиомой становится современная тенденция переноса «тяжести» в выпуске нового продукта на проектный этап, где системы цифрового проектирования и анализа позволяют учесть все нюансы и особенности, связанные с производством и эксплуатацией будущего изделия. Реализация методологии трехмерного моделирования посредством функционала систем цифрового проектирования позволяет выполнить компоновку спроектированного изделия. Инженерный анализ конструкций опирается на технологии математического и имитационного моделирования. Основным методом исследований – верифицированный численный эксперимент с использованием конечно-элементных моделей.

Процесс внедрения и успешного использования упомянутых цифровых инструментов в разных отраслях и видах производства идет неравномерно [4, 5], но только повсеместное применение данных технологий позволит получить качественный результат и добиться уверенного продвижения продукции отечественных предприятий как на внутреннем, так и на внешних рынках.

Вологодский государственный университет на протяжении нескольких лет успешно сотрудничает в рамках национального проекта «Малый бизнес и поддержка индивидуальной предпринимательской инициативы» и Государственной программы «Поддержка и развитие малого и среднего предпринимательства в Вологодской области на 2013–2020 годы» с агентст-

вом развития предпринимательства и инвестиций Вологодской области «Мой бизнес».

Целью одной из работ было разработать решения по обеспечению эффективного производства деталей козлового крана на основе проведения научно-исследовательских и инженерных работ.

Козловой кран представляет собой пролетное строение (мост), установленное на опоры, перемещающееся по рельсам.

Кран состоит из следующих элементов [6]:

- мост, состоящий из пяти сварных частей, собираемых с помощью болтовых соединений на высокопрочных болтах;
- две опоры, каждая из которых состоит из двух стоек;
- платформы опор для передвижения по подкрановому пути;
- тележка, установленная на рельсы моста и способная по нему передвигаться. На тележке закреплены приводные механизмы подъема/спуска крюка с грузом (двигатель, редуктор, барабан, тормоза).

Козловой кран в основном состоит из сварных металлоконструкций, в качестве заготовок для которых используется металлопрокат разного сортамента. Но есть и оригинальные детали, которые необходимо изготавливать на предприятии. В качестве таковых были выбраны крышка, предназначенная для защиты подшипникового узла, и скоба для монтажа кабельных трасс крана. Выбор был обусловлен конструктивными особенностями деталей. Для их получения лучше всего подходит использование штамповочной оснастки, что обеспечивает повышение производительности производства и снижение себестоимости.

Первоначально, с целью проверки работоспособности деталей заданной конструкции, были проведены исследования эксплуатационных воздействий на детали козловых кранов.

Деталь «Крышка» изготовлена из листа стали обычного качества Ст3сп, имеет отбортовку внешней кромки на 10 мм для посадки на корпус обводного колеса, прогиб на глубину 5 мм с отверстием диаметром 51 мм в центральной части. Общий диаметр изделия равен 180 мм, при этом глубина крышки с отгибкой составляет 10 мм, а толщина материала и внутренние радиусыгиба 2 мм.

Данная деталь используется в подвесном блоке грузовой тележки козлового крана. Подвесной блок является устройством для изменения вращательной энергии барабана, на который наматывается трос, в линейное движение крюка с грузом (рис. 1).

Деталь «Крышка» выполняет роль пыльника и защиты подшипника от внешнего механического воздействия, что очень важно при их длительной эксплуатации в различных условиях (рис. 2).



Рис. 1. Грузовая тележка

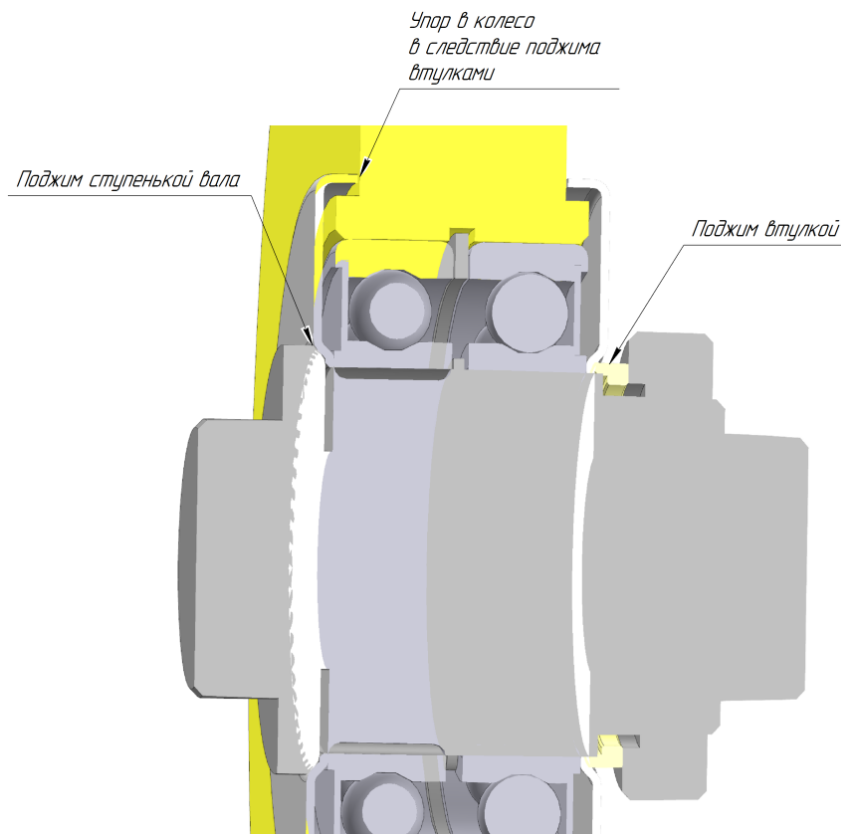


Рис. 2. Применение детали крышка

3D-модель детали «Крышка», созданная для исследования НДС, представлена на рисунке 3. Для проведения расчетов задана нагрузка от поджима крышки втулкой, равная 100 Н.

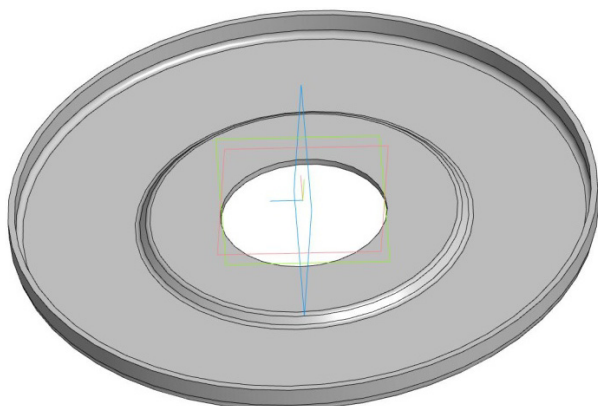


Рис. 3. Модель детали «Крышка»

Максимальное напряжение в детали «Крышка» равняется 6,15 МПа.

Деформация детали «Крышка» при эксплуатационных нагрузках составляет 0,01 мм.

По результатам расчетов можно сделать вывод, что деталь «Крышка» является слабо нагруженной, и ее конструкция может быть изменена с целью снижения стоимости и повышения технологичности.

Как правило, листовая штамповка отличается использованием двух составляющих: пуансона и матрицы. Суть процесса штамповки состоит в том, что обе половины штампа закреплены в прессе, пресс-форма (матрица) закреплена на столе штампа, а пуансон закреплен к поршню-толкателю, между ними располагают заготовку, после чего верхняя часть штампа (пуансон) с заданным усилием начинает давить на заготовку, которая, в свою очередь, под действием давления пуансона, которое существенно превышает предел текучести материала, принимает форму матрицы.

При этом основные нагрузки принимают на себя плита основания штампа, матрица и пуансон, поэтому следует изготавливать их из сталей, упрочненных термически, или сталей с высоким содержанием углерода (Сталь 45, Сталь 50, Сталь 40X). Так как пуансон является отчасти режущим инструментом, а именно прорубает отверстие в крышке, то он должен иметь не только запас по прочности, но и стойкость по контуру прорубания. Поэтому для пуансона разумно будет выбрать инструментальную сталь У10 с последующим улучшением до HRC 52...54 методом поверхностной закалки. Для матрицы, так как действует она при схожих условиях, можно выбрать аналогичные материал и метод улучшения.

Для того чтобы убедиться в правильности выбранных в ходе конструирования решений, примененных конструктивных элементов, назначенных материалов предлагается исследовать в качестве примера нижнюю половину штампа с применением большей, нежели рабочая, нагрузки. Модель представлена на рисунке 4.

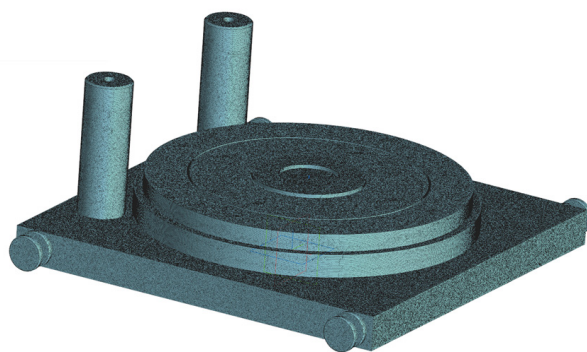


Рис. 4. Сетка конечных элементов нижней части штампа

В ходе исследований была применена нагрузка 100 кН, что превышает расчетную нагрузку для продавливания материала заготовки при осуществлении штамповки изделия. Перемещения составляют менее 100 мкм, что никак не повлияет на точность изготовления крышки, и напряжение составляет 5,41 МПа, что меньше чем предел текучести материала Сталь У10, а значит, материалы и конструкция прессы выбраны верно.

Технологическая оснастка штампа принципиально состоит из двух половин – верхней и нижней. Верхняя часть представлена на рисунке 5.

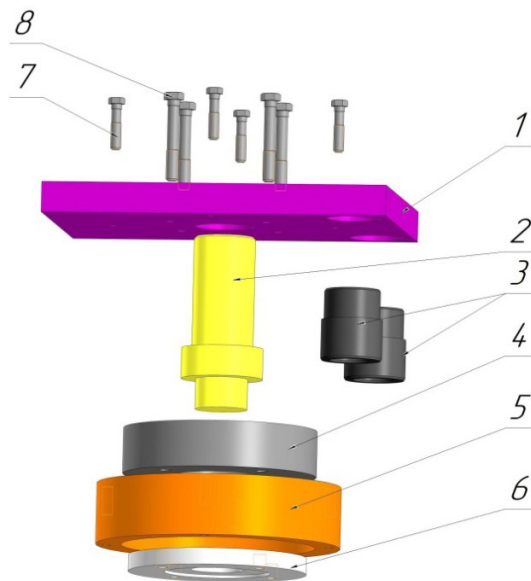


Рис. 5. Разнесенная сборка верхней части штампа
1 – плита; 2 – пуансон; 3 – втулка; 4 – буфер; 5 – кольцо;
6 – диск; 7, 8 – крепежные болты

Диск (позиция № 6) обеспечивает свободный проход пуансона сквозь себя для прорубания отверстия в заготовке и, заодно, когда ступенька пуансона касается пластины, обеспечивает прогиб в центральной части.

Нижняя часть штампа показана на рисунке 6. Матрица разработана таким образом, чтобы обеспечить прорубание центрального отверстия и при этом создать условия для достижения необходимых радиусовгиба и отбортовки. Сама же матрица спроектирована так, чтобы обеспечить заданную чертежом форму детали «Крышка». На рисунке 7 представлена 3D-модель штампа.

Отверстия в нижней части штампа необходимы для того, чтобы была возможность расширить функционал штампа.

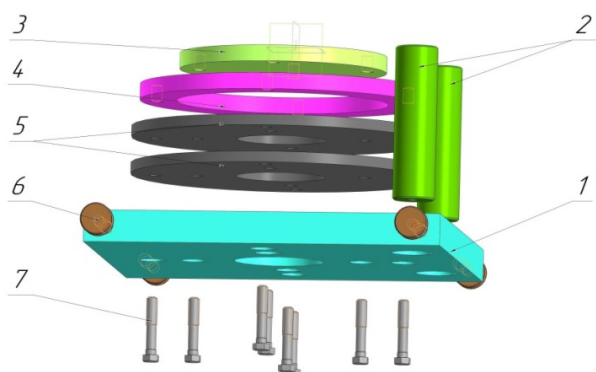


Рис. 6. Разнесенная сборка нижней части штампа
1 – плита; 2 – втулки; 3 – буфер; 4 – кольцо;
5 – диски; 6 – оси; 7 – крепежные болты

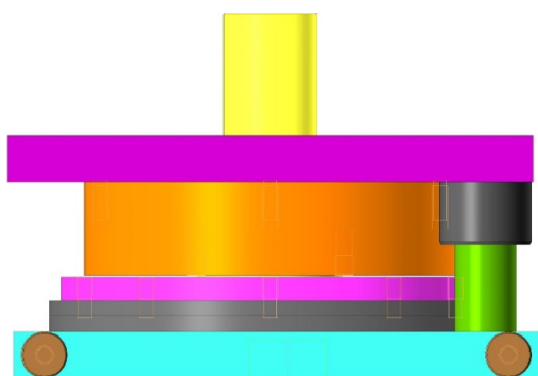


Рис. 7. Общий вид штампа

В результате проведенных проектных работ, по результатам исследований и построенных трехмерных моделей сборочных единиц и деталей была разработана конструкторская документация.

На рисунке 8 представлена фотография изготовленного штампа.



Рис. 8. Фото изготовленного штампа и изделия «Крышка»

В результате проведенных исследований и работ была создана методика применения цифровых инструментов проектирования технологической оснастки. Проектирование и разработка конструкции велось на основе получаемых при изучении поведения конструкции проектируемого изделия данных, а также данных о надежности крышки, для изготовления которой будет использован проектируемый штамп.

На этапе изготовления и эксплуатации спроектированной оснастки подтвердились все заложенные параметры изделия, а также надежность и работоспособность штампа. В результате применения цифровых инструментов проектирования удалось снизить затраты на производство и исключить ошибки в конструкторско-технологической подготовке производства.

Литература

1. Digital design and technological innovation in the small machine building sector / V. F. Bulavin, T. G. Bulavina, V. V. Yahrichev [et al] // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. – 2020. – Vol. 939, Issue. – P. 012016.

2. Digital support of production small business preparation in engineering / V. F. Bulavin, T. G. Bulavina, C. A. Stepanov, A. A. Frolov, V. V. Yahrichev [et al] // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1399, Issue. – P. 033045.

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

4. Булавин, В. Ф. Валидация CAD-продуктов в малых предприятиях машиностроительного сектора / В. Ф. Булавин, Т. Г. Булавина, В. В. Яхричев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2017. – № 5 (325). – С. 64–72.

5. Булавин, В. Ф. Цифровые технологии в малом бизнесе машиностроительной отрасли / В. Ф. Булавин, В. В. Яхричев // САПР и графика. – 2018. – № 6. – С. 52–55.

6. Гохберг, М. М. Справочник по кранам. В 2 томах. Том 2. Характеристики и конструктивные схемы кранов. Крановые механизмы, их детали и узлы. Техническая эксплуатация кранов / М. П. Александров, М. М. Гохберг, А. А. Ковин [и др.]; под общей редакцией М. М. Гохберга. – Москва : Машиностроение, 1988. – 559 с.

T.D. Poryadina, A.S. Stepanov, S.A. Frolov, V.V. Yakhrichev
Vologda State University

**EFFICIENCY OF DIGITAL TOOLS FOR DESIGNING TECHNOLOGICAL EQUIPMENT
FOR MANUFACTURING CRANES UNITS AND PARTS**

The article discusses the design support for the design and production of technological equipment for manufacturing the parts of a hoisting-and-transport machine – a gantry crane. The result of the study is a methodology for the use of digital tools for design and technological support for the design and production of lifting and transport equipment, carried out on the basis of the specialized applied software.

Technological equipment, hoisting machines, gantry crane, operational influences, finite element model, loads, strength criterion, stiffness criterion, 3D-model, digital layout, design and technological preparation of production, engineering analysis.



ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОСТОЙКОСТИ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Методом дифференциального термического анализа в спеченных твердых сплавах определены тепловые эффекты при нагреве, которые позволяют оценить теплостойкость сплавов и связать ее со структурными изменениями в сплавах при нагреве. В сплавах на основе карбида титана со специальной стальной связкой, разработанной нами, обнаружен единственный тепловой эффект при температуре 900 °С, соответствующий теплостойкости стандартных твердых сплавов и позволяющий прогнозировать достаточно высокий уровень режущих свойств этих сплавов.

Тепловой эффект, теплостойкость, структура, твердый сплав, карбид титана, сталь, феррит, хи-фаза.

При обработке резанием выделяется значительное количество тепловой энергии – тем большее, чем выше производительность процесса. Увеличение скорости резания и сечения срезаемого слоя при локализации тепловой энергии в сравнительно небольшом объеме режущего клина инструмента приводит к высокой температуре нагрева режущего материала. Теплостойкость обобщенно рассматривается как способность материала при нагреве обеспечивать сохранение на заданном уровне основных эксплуатационных свойств. Для режущих материалов важнейшими эксплуатационными свойствами являются: твердость (сопротивление пластической деформации, смятию режущей кромки), прочность (сопротивление микро- и макроразрушению), износостойкость (сопротивление специфическому изнашиванию резанием). Надежность инструмента тем выше, чем больше у материала запас по этим свойствам в сочетании с уровнем некоторых других свойств (вязкости, теплопроводности, коэффициентов термического расширения материала и его структурных составляющих). Наиболее чувствительное к температуре свойство – твердость – находится в сложной зависимости с перегибом от температуры: при нагреве до некоторого значения температуры твердость монотонно снижается с небольшой скоростью, после прохождения этого значения (которое является одной из характеристик теплостойкости) твердость круто снижается до неприемлемого для резания уровня. Как известно, теплостойкость быстрорежущей стали типа Р6М5 оценивается температурой 600 °С, твердого сплава типа Т15К6 – 900 °С.

Природа теплостойкости связана с устойчивостью структуры материала. Если под воздействием температуры происходят структурные превращения (которые всегда связаны с минимизацией внутренней энергии материала), они всегда приводят к значительному снижению твердости. При нагреве в структуре материала могут происходить превращения: диффузионные (распад мартенсита, коагуляция фазупрочнителей: карбидов быстрорежущей стали, ин-

терметаллидов в безуглеродистых сплавах), бездиффузионные (полиморфные превращения: альфа-гамма превращение в сталях, превращение алмаза в графит, кубического нитрида бора в гексагональный).

После проведения нескольких серий экспериментально-аналитических работ [1–8] нами была выдвинута рабочая гипотеза, что в качестве связки режущего твердого сплава на основе карбида титана может быть использована только специальная безуглеродистая высоколегированная сталь ферритного класса с интерметаллидным упрочнением.

Стали с другой структурой для режущих твердых сплавов непригодны. В углеродсодержащих сталях карбидного класса теплостойкость принципиально ограничивается температурами коагуляции карбидов (300 °С – цементитного типа, 450 °С – типа $M_{23}C_6$, 600 °С – типов M_6C и MC). У высоколегированных сталей мартенситного класса теплостойкость ограничена температурой альфа-гамма превращения (727 °С). Стали аустенитного класса имеют стабильную структуру без превращений до температуры плавления, но не обладают необходимой для резания твердостью, излишне пластичны.

Структура высоколегированного феррита с дисперсными интерметаллидами, когерентно связанными с ферритом, должна обеспечить стали высокую твердость и высокую теплостойкость, ограниченную высокой температурой коагуляции (значительного укрупнения, округления с разрывом когерентных связей) интерметаллидов. Некоторые интерметаллиды на основе железа имеют высокую температуру коагуляции – около 900 °С: это сигма-фазы типа $FeCr$ и более сложные хи-фазы типа $FeCrMnTi$. Сигма-фазы – грубые, склонные к росту – сильно охрупчивают сталь. Хи-фазы – более тонкие, из-за сложного строения и низкой подвижности крупных атомов титана в стали – менее склонны к коагуляции.

Моделирование структуры и состава теплостойкой стали было выполнено на теоретической основе двойных диаграмм состояния металлов, потенциально пригодных для стальной связки с учетом ее взаимо-

действия с карбидом титана. Для сплава на основе 80 % TiC с 20 % связки нами был рассчитан химический состав стали: 10–14 % Mn, 10–15 % Cr, 7–10 % Ti, остальное – железо.

Специальная сталь, получившая по отечественному стандарту обозначение X14Г10Т6, в кованом исполнении после закалки и отпуска 900 °С показала твердость HRC52, что свидетельствует об исключительно высокой теплостойкости. В порошковом исполнении (для изготовления твердого сплава) была подтверждена смоделированная структура: высоколегированный феррит и интерметаллидная хи-фаза (по данным рентгеноструктурного фазового анализа).

При спекании твердых сплавов происходят сложные процессы взаимодействия между карбидной основой и связкой (которые всесторонне изучены и описаны, в том числе, в наших работах [2, 5, 8]: плавление связки, частичное растворение карбидов в связке по эвтектическому механизму, перекристаллизация карбидов (образование центров кристаллизации и новых зерен) через жидкую фазу, равновесные и неравновесные превращения при охлаждении сплава. Если связка имеет многокомпонентный состав, взаимодействие усложняется. Состав и структура связки до и после спекания могут существенно отличаться. Например, в классических твердых сплавах кобальтовая связка насыщается вольфрамом с образованием карбидов и интерметаллидов.

При спекании твердого сплава на основе карбида титана с разработанной специальной сталью в качестве связки, в первую очередь, следует ожидать растворения в карбиде титана феррито-карбидо-образующих компонентов стали (прежде всего – титана), в связи с чем могут принципиально измениться состав и структура стали и ее свойства, включая теплостойкость.

Исходя из этих положений, следует считать актуальной экспериментальную оценку теплостойкости нового спеченного твердого сплава, особенно в сравнении с другими сплавами. Тем самым оценивается потенциальная пригодность сплава для его использования в качестве режущего материала. Особую важность это исследование приобретает в связи с большой трудоемкостью испытаний резанием.

Для оценки теплостойкости инструментальных материалов используются следующие основные методики: измерение горячей твердости, измерение твердости после теплового воздействия (отпуска), термический анализ.

Измерение горячей твердости является прямым, наиболее достоверным методом. К сожалению, метод дорогой и редкий из-за сложности условий измерения твердости. Для интересующих нас твердых сплавов на основе карбида титана мы не нашли опубликованных данных для сравнения. На установке «NRC-Eugore» (до 2200 °С) было выполнено измерение горячей твердости только кованных образцов из стали X14Г10Т6: HV360 при 700 °С и HV320 при 880 °С.*

* Авторы выражают благодарность за помощь в исследовании старшему научному сотруднику Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (НИТУ «МИСиС») А. Н. Матлахову.

Измерение твердости после теплового воздействия было выполнено на большом количестве экспериментальных твердых сплавов. В связи с большим объемом экспериментальные данные и их анализ будут представлены в другой работе. Основной результат: после закалки спеченных сплавов TiC–сталь X14Г10Т6 от температуры 1150 °С и отпуска при 900 °С твердость их снизилась всего на 0,5 ед. HRA, тогда как у сплавов с другими стальными связками снижение составило 1,5–4 ед. HRA. Это свидетельствует о высокой теплостойкости сплавов TiC–сталь X14Г10Т6.

Весьма достоверным, хотя и косвенным, считается метод оценки теплостойкости термическим анализом. Термический анализ, основанный на тепловых эффектах (поглощении или выделении тепла), используется для определения температур фазовых превращений, частичного и полного плавления, для построения диаграмм состояния сплавов. Поскольку метод показывает температуру перехода к новой структуре (с учетом знаний о свойствах материала с исходной и новой структурой), он позволяет оценить теплостойкость сплава.

Нами использован дифференциальный термический анализ, который показывает не интегральную зависимость температуры от времени нагрева, а сразу разницу в теплосодержании сплава, то есть тепловой эффект (эффекты). Съемка кривых ДТА выполнена на высокотемпературном дериватографе системы «Paulik-Paulik @ Erdei» (Венгрия).**

Перед экспериментом было проведено эталонирование и отжиг кварцевых тиглей и насадки при 1500 °С. В качестве инертного вещества использовался корундовый порошок, прокаленный при 1500 °С. Каждый изучаемый сплав дробился между плитками из твердого сплава BK15 с загрузкой в тигель примерно 2 граммов. При съемке скорость подъема температуры – 7,5 °С в мин. в потоке аргона с расходом 1 мл/с. Чувствительность ДТА по шкале – 10 %, то есть самописец фиксировал отклонение фактической скорости подъема температуры от заданной свыше 10 %, а отклонение кривой сплава от кривой инертного вещества свыше 2 мм является тепловым эффектом. Тепловые эффекты на кривых указаны оператором установки (рис.).

Для исследования были выбраны сплавы на основе карбида титана: 70 % TiC–Fe, 70 % TiC–5 % Mo–Fe, 70 % TiC–сталь X14Г10Т6, 90 % TiC–сталь X14Г10Т6 и на основе других карбидов (пригодных для легирования карбида титана – в дальнейшем): карбида ванадия (70 % VC–Fe), карбида хрома (70 % Cr₃C₂–Fe), карбида молибдена (70 % Mo₂C–Fe).

Спеченные образцы были изготовлены по полному циклу твердосплавного производства. Порошковые смеси компонентов подвергались продолжительному совместному размолу в вибрационной мельнице, сушке, пластифицированию и гранулированию. Образцы после прессования подвергались вакуумной сушке, предварительному вакуумному спеканию, маркировке и окончательному вакуумному спеканию.

** Авторы выражают благодарность за помощь в исследовании старшему научному сотруднику НИТУ «МИСиС», канд. техн. наук Н. В. Швындиной.

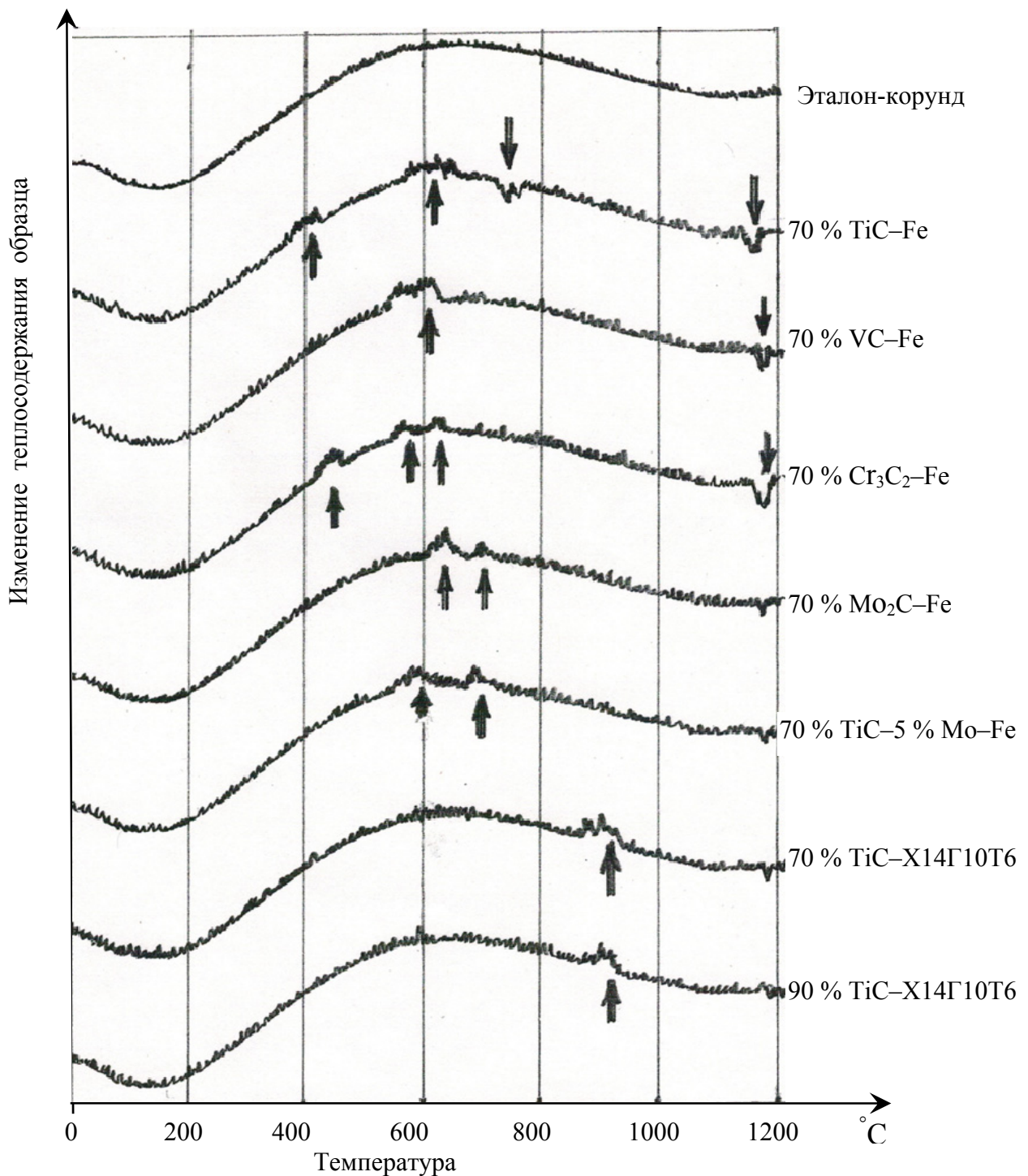


Рис. Дифференциальный термический анализ сплавов

На термической кривой сплава 70 % TiC-Fe отмечены стрелками 4 тепловых эффекта. Два экзотермических эффекта при температурах 400 °C и 650 °C соответствуют температурам коагуляции карбидов, предположительно, цементитного типа Fe₃C и специальных – типа TiC. Появление цементита, очевидно, вызвано избыточным углеродом из графитизированного при спекании пластификатора – синтетического каучука. Специальные карбиды титана в связке присутствуют вследствие незавершенности

перекристаллизации основного карбида титана через жидкую фазу при спекании, при повторном нагреве из дисперсных карбидов в твердой фазе растут более крупные с разрывом когерентных связей с ферритом. При температуре около 727 °C отмечен эндотермический тепловой эффект – это явное альфа-гамма превращение феррита в аустенит. Тепловой эффект при 1150 °C – эвтектическая реакция с появлением небольшого объема жидкой эвтектики Fe-Fe C-TiC. Теплостойкость сплава 400 °C.

На термической кривой сплава 70 % VC–Fe обнаружены 2 тепловых эффекта. При температурах 550–650 °C происходит коагуляция карбидов ванадия. При охлаждении сплава с температуры спекания (закалка) образуется неравновесная концентрация ванадия в феррите (определена рентгеноструктурным фазовым анализом [2]), которая при нагреве (отпуске) приходит к более равновесному состоянию путем выделения ванадия и связыванием его углеродом в карбид (возможно, с дефицитом по углероду до V_4C_3). Вторым эффектом при температуре около 1150 °C объясняется плавлением эвтектики Fe(V)–VC. Альфа-гамма превращение отсутствует, что свидетельствует о стабильной ферритной структуре связки. Теплостойкость сплава 550 °C.

В сплаве 70 % CrC–Fe в диапазоне температур 450–650 °C обнаружены 3 тепловых эффекта. Нижний может быть связан с продолжением карбидного превращения [2]. В спеченном сплаве рентгеноструктурный фазовый анализ обнаружил 2 фазы: феррит Fe(Cr) и сложный карбид M_7C_3 ($M = Cr + Fe$). Возможно дальнейшее превращение при 450 °C, вызванное дефицитом углерода: $M_7C_3 + Fe = M_{23}C_6$ (карбид высокохромистых сталей). При более высоких температурах происходит коагуляция карбидов. При температуре около 1150 °C образуется небольшое количество жидкой эвтектики Fe(Cr)– M_7C_3 . Альфа-гамма превращение в связке отсутствует (содержание хрома свыше 13 %). Теплостойкость сплава 450 °C.

На термической кривой сплава 70 % Mo_2C –Fe отмечено только 2 экзотермических эффекта, связанных с коагуляцией специальных карбидов типа M_6C ($M = Fe + Mo$) при 650 °C и интерметаллидов типа FeMo или Fe_2Mo при 700 °C. Альфа-гамма превращение отсутствует, значимого количества эвтектики не обнаружено. Теплостойкость сплава 600 °C.

На термической кривой сплава 70 % TiC–5 % Mo–Fe, то есть со связкой из высокомолибденовой ферритной стали, обнаружены 2 тепловых эффекта. Небольшой эффект при температуре 600 °C может быть связан с выделением небольшого количества мелких карбидов титана из пересыщенного твердого раствора, при 700 °C – с коагуляцией интерметаллидов, предположительно, типа Fe_2Mo с меньшим содержанием молибдена. Альфа-гамма превращение отсутствует. Теплостойкость сплава 700 °C.

На термических кривых сплавов 70 % TiC и 90 % TiC–сталь X14Г10Т6 обнаружен один тепловой эффект при 900 °C, который может быть вызван только коагуляцией интерметаллидной хи-фазы. У сплава с 90 % TiC эффект меньше из-за меньшего содержания связки. Коагуляции карбидов и альфа-гамма превращения в сплавах не обнаружено. Теплостойкость сплавов 900 °C.

Дифференциальный термический анализ подтвердил высокую теплостойкость спеченных твердых сплавов на основе карбида титана со связкой из

стали X14Г10Т6 на уровне классических твердых сплавов группы ТК (WC–TiC–Co), которыми оснащены современные режущие инструменты для обработки сталей.

Литература

1. Яняк, С. В. Экспериментальная оценка свойств твердых сплавов с железной связкой / С. В. Яняк, Г. Ю. Пивень // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного производства, технология и надежность машин, приборов и оборудования : материалы XIII Международной научно-технической конференции (Вологда, 27 марта 2018 г.). – Вологда, 2018. – С. 281–284.

2. Яняк, С. В. Анализ структуры спеченных твердых сплавов с железной связкой / С. В. Яняк, Г. Ю. Пивень // Механика, оборудование, материалы и технологии: материалы международной научно-практической конференции (Краснодар, 29–30 марта 2018 г.). – Краснодар, 2018. – С. 273–282.

3. Яняк, С. В. Влияние содержания карбида титана на свойства твердых сплавов с железной связкой / С. В. Яняк, Г. Ю. Пивень // Актуальные проблемы науки и практики в различных отраслях народного хозяйства: материалы национальной научно-практической конференции (Пенза, 28–29 марта 2018 г.). Часть 4. Технические науки / Пензенский ГУАиС. – Пенза, 2018. – С. 210–214.

4. Яняк, С. В. Экспериментальная оценка свойств твердых сплавов на основе карбида титана со стальными связками / С. В. Яняк, Г. Ю. Пивень // Актуальные проблемы науки и практики в различных отраслях народного хозяйства : материалы национальной научно-практической конференции (Пенза, 28–29 марта 2018 г.). Часть 4. Технические науки / Пензенский ГУАиС. – Пенза, 2018. – С. 204–209.

5. Комиссарова, И. И. Экспериментальная оценка и анализ износостойкости материалов / И. И. Комиссарова, С. В. Яняк, И. О. Берсенев // Вестник Вологодского государственного университета, № 2 (2). – Вологда, 2018. – С. 6–10.

6. Яняк, С. В. Режущие свойства твердых сплавов на основе карбида титана с железной связкой / С. В. Яняк, Г. Ю. Пивень // Вестник Вологодского государственного университета. – 2019. – № 3 (5). – С. 78–81.

7. Яняк, С. В. Экспериментальная оценка свойств твердых сплавов на основе карбида титана с железомолибденовой связкой / С. В. Яняк, Г. Ю. Пивень // Вестник Вологодского государственного университета. – 2018. – № 1 (1). – С. 23–27.

8. Яняк, С. В. Анализ структуры и свойств твердых сплавов на основе карбида титана с железомолибденовой связкой / С. В. Яняк, Г. Ю. Пивень // Вестник Вологодского государственного университета. – 2019. – № 2 (4). – С. 22–26.

S.V. Ianiak, I.I. Komissarova
Vologda State University

**STUDY OF HARD ALLOYS HEAT RESISTANCE
BY DIFFERENTIAL THERMAL ANALYSIS METHOD**

The method of differential thermal analysis in sintered cemented carbide alloys has been used to determine the heat effects when heating which make it possible to assess the heat resistance of alloys and to associate it with structural changes in alloys when heating. In alloys based on titanium carbide with a special steel bond developed by us, a single thermal effect was found at a temperature of 900 ° C, corresponding to the heat resistance of standard carbide alloys and making it possible to predict a sufficiently high level of cutting properties of these alloys.

Heat effect, heat resistance, structure, cemented carbide, titanium carbide, steel, ferrite, chi-phase.



ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ ПРИ ПОМОЩИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА

Представлено описание экспериментального стенда для исследования характеристик электромеханической системы с распределенными параметрами и проверки адекватности их математического описания. Получены графики переходных процессов тока двигателя при частоте меньше резонансной частоты и равной ей. Выполнен анализ графиков тока.

Система с распределенными параметрами, резонансная частота, переходный процесс.

Объекты в разных областях техники являются системами с распределенными параметрами (СРП). Это длинные линии электропередач, трубопроводы для перекачки воды или нефти, объекты, включающие длинные стержни (например, в бурении – колонна труб, в подъемных механизмах – трос и канат) и т.д. Упругие деформации звеньев механических передач СРП являются одним из факторов, препятствующих повышению эффективности управления электромеханическими объектами [1, 2].

Увеличение быстродействия современных машин при одновременном возрастании пространственных размеров, повышение требований к точности перемещений, появление принципиально новых конструкций определяют условия, при которых невозможно создание высококачественных систем управления машин и механизмов без учета свойств механической части электропривода. Непосредственное исследование СРП является очень сложным и затруднительным из-за их пространственных размеров, но необходимым.

Основной податливый элемент системы – грузовая ветвь каната, жесткость которого намного меньше жесткости других звеньев. Поэтому поведение системы можно оценить по расчетным схемам, рассматривая канат только как упругий элемент.

Большое влияние на работу электроприводов оказывают упругие деформации, возникающие в СРП. Недостаточно точное математическое описание такого оборудования приводит к большим погрешностям при анализе и синтезе систем управления, к уменьшению точности работы, к потере устойчивости электропривода, а в наиболее неблагоприятных случаях – к разрушению установки. При описании принимаются следующие допущения: механическая часть идеализируется как стержень, испытывающий продольные колебания, а сосредоточенные массы представляются как бесконечные скачки плотности.

Для исследования электромеханических характеристик СРП и проверки адекватности их математического описания был разработан экспериментальный стенд, позволяющий заменить реальный объект.

Для уменьшения габаритных размеров и унификации разрабатываемого стенда по сравнению с изучаемым оборудованием необходимо получить соотношения между механическими параметрами стенда и параметрами установки для определения частотных и временных характеристик. Используя приведенные соотношения, можно из частотных характеристик, полученных на разработанном стенде, получить частотные характеристики исследуемого оборудования [3].

Расположение установки может быть горизонтальным, наклонным или вертикальным. В качестве примера рассмотрено горизонтальное расположение установки (рис. 1).

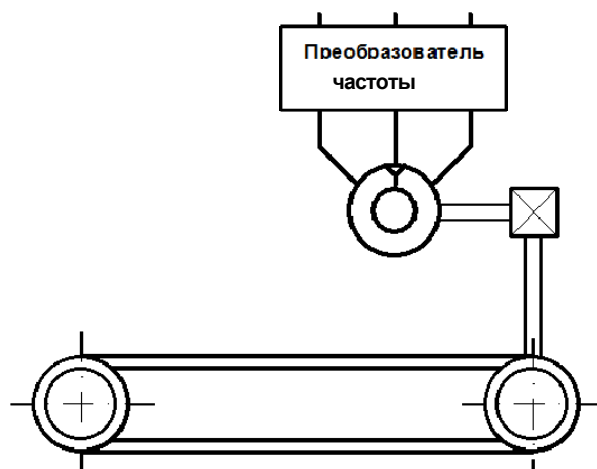


Рис. 1. Схема установки

В качестве СРП в стенде использована пружина с невысоким коэффициентом упругости, внутри которой натянута струна для отсутствия эффекта провисания.

Для приведения установки в движение применяется электропривод переменного тока Siemens Micro Master, представляющий собой преобразователь частоты со звеном постоянного тока мощностью 250 Вт, и асинхронный двигатель Siemens мощностью 90 Вт.

Эксперимент проводился с помощью подачи на асинхронный двигатель переменного напряжения разной частоты с помощью преобразователя частоты и измерения тока двигателя [4]. Частота подающего напряжения последовательно изменялась. Резонанс определялся по графикам тока, также его можно было определить визуально.

В результате эксперимента получены следующие графики переходных процессов тока двигателя. Об-

щий вид переходных процессов в СРП рассмотрен в [2]. При частоте $f=1,5$ Гц, которая меньше резонансной частоты СРП, получен график тока двигателя постоянного тока, представленный на рисунке 2.

При частоте $f=1,8$ Гц, равной резонансной частоте СРП, получен график тока двигателя постоянного тока, который представлен на рисунке 3.

Амплитуда графика тока при резонансной частоте увеличивается примерно в 2 раза, как и должно быть при резонансной частоте.

Проведенное экспериментальное исследование СРП во временной области подтверждает теоретические расчеты.

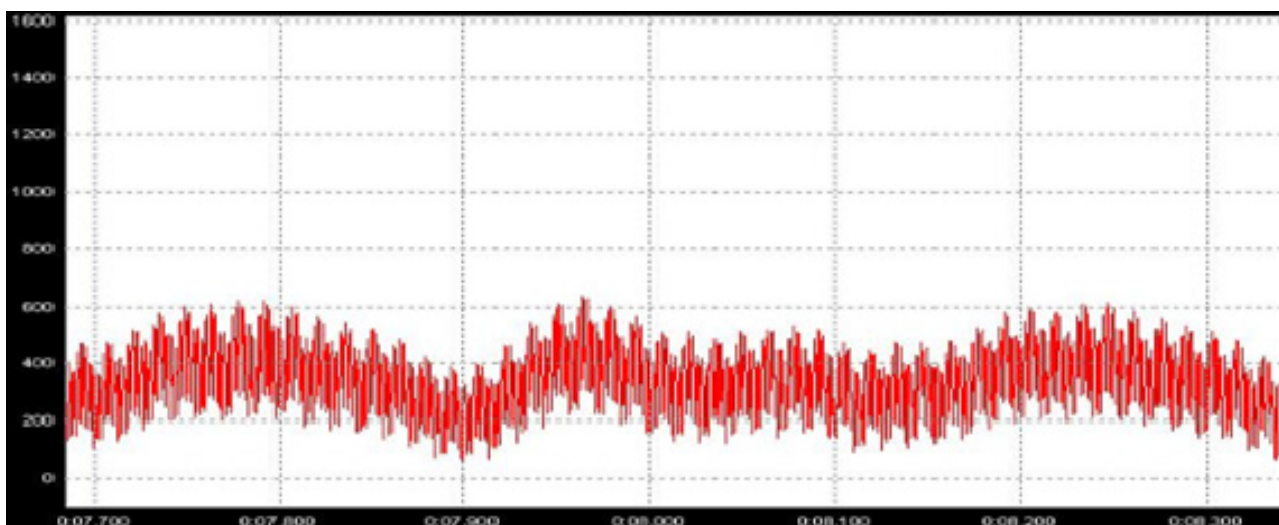


Рис. 2. Ток двигателя при частоте меньше резонансной частоты

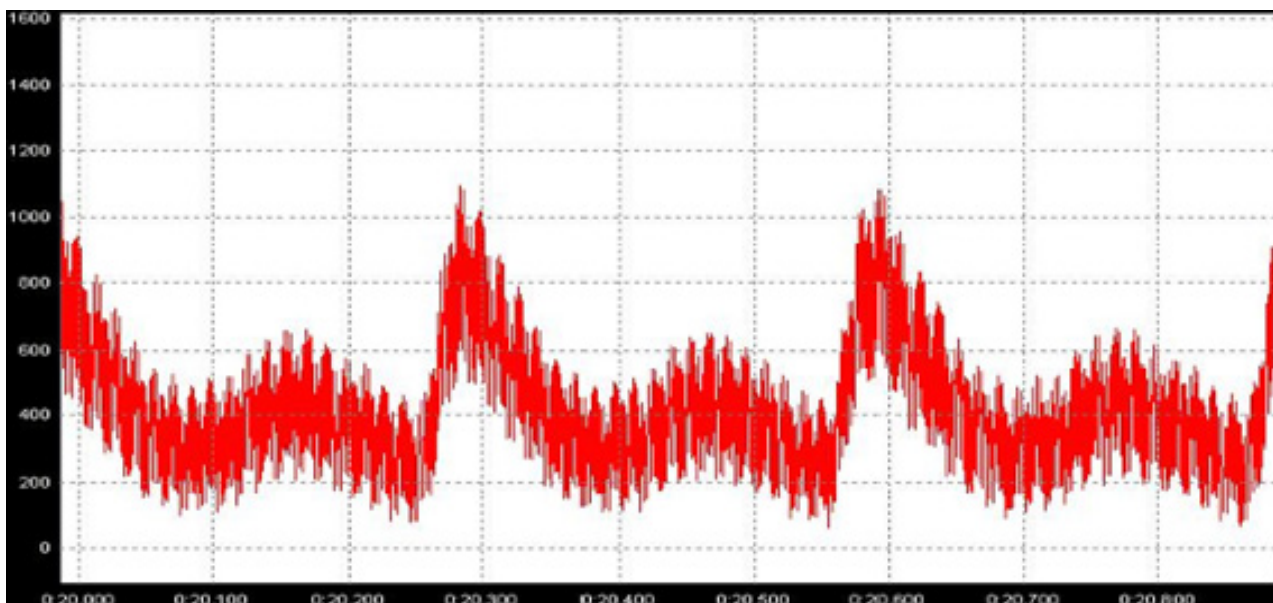


Рис. 3. Ток двигателя при частоте равной резонансной частоте

Литература

1. Рассудов, Л. Н. Электроприводы с распределенными параметрами электромеханических элементов / Л. Н. Рассудов, В. Н. Мядзель. – Ленинград : Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1987. – 144 с.

2 Бутковский, А. Г. Методы управления системами с распределенными параметрами / А. Г. Бутковский. – Москва : Наука, 1975. – 230 с.

3. Karneyev, A. P. Development of a stand for research of systems with the distributed parameters / A. P. Karneyev, G. S. Lenevsky // Journal of the Technical University of Gabrovo. – 2011. – Vol. 41. – P. 32–35.

4. Корнеев, А. П. Стенд для исследования систем с распределенными параметрами / А. П. Корнеев, Г. С. Ленеvский // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : Тезисы международной научно-технической конференции молодых ученых (Могилев, 17–18 ноября 2011 г.) / Белорусско-российский университет. – Могилев, 2011. – С. 215–216.

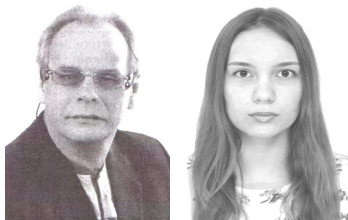
A.P. Korneev

Belarusian-Russian University

STUDY OF SYSTEMS WITH DISTRIBUTED PARAMETERS IN THE TIME DOMAIN USING AN EXPERIMENTAL STAND

The description of the experimental stand for studying the characteristics of the electromechanical system with distributed parameters and checking the adequacy of their mathematical description is presented. The graphs of the transient processes of the motor current at a frequency less than the resonant frequency and equal to it are obtained. The analysis of the current graphs is carried out.

System with distributed parameters, resonant frequency, transient process.



МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОММУТАТОРОВ QoS

В данной статье рассматриваются различные механизмы обслуживания очередей. Представлены алгоритмы приоритетного обслуживания и взвешенных очередей. Приведены результаты моделирования на коммутаторе с различными алгоритмами обслуживания очередей.

Механизм обслуживания очередей, QoS, коммутатор, моделирование, приоритетное обслуживание, трафик сети.

В настоящее время основными методами достижения качества обслуживания «Quality of service» (QoS) при передаче данных по сети являются два способа: кондиционирование и алгоритмы управления очередями [1]. Кондиционирование трафика сети – отнесение трафика к определенному классу обслуживания. Поскольку параметры трафика могут меняться с течением времени, требуется проводить кондиционирование не на основе точных показателей трафика, а на основе их нечеткой оценки. Для этого целесообразно воспользоваться нечеткой логикой. Введем лингвистические переменные, соответствующие основным характеристикам трафика, перечисленным выше. Для каждой лингвистической переменной введем универсальное четкое множество, на котором будет изменяться лингвистическая переменная. Каждую лингвистическую переменную разобьем на термы – различные требования к качеству параметра сети для различных классов трафика. Введем функцию принадлежности лингвистической переменной термам. Наиболее распространено задание функции принадлежности с помощью нечеткого трапециевидного интервала. Нечеткий трапециевидный интервал задается четверкой чисел (a, b, c, d). Функция принадлежности равна 0, если значение лингвистической переменной лежит вне трапеции; 1 – если на верхнем основании, и линейно изменяется на боковых сторонах трапеции.

Чувствительность трафика к задержкам выразим через время $\{0 \div 5 \text{ с.}\}$: асинхронные, синхронные.

Предсказуемость скорости выразим через отношение максимальной скорости к минимальной $\{1 \div \infty\}$: с равномерным трафиком: (постоянный, равномерный); с пульсирующим трафиком: (пульсирующий, разрывной). Оценку чувствительности к потерям пакетов выразим через процент допустимо теряемых пакетов $\{0 \div 100\%$: чувствительные: (постоянный, равномерный); устойчивые: (пульсирующий, разрывной). Оценку скорости передачи выразим через В/с $\{0 \div 10 \text{ МВ/с}\}$ $\{0 \div 100 \text{ МВ/с}\}$ $\{0 \div 1000 \text{ МВ/с}\}$: низкая, средняя, высокая [2].

Рассмотрим различные механизмы обслуживания очередей. Механизм приоритетного обслуживания очередей предполагает несколько входных очередей, очереди отличаются друг от друга приоритетами. Администратор определяет принадлежность потока трафика к одной из соответствующих очередей, при этом пакеты их очереди с высоким приоритетом обслуживаются первыми. Если в этой очереди нет пакетов, то обслуживается следующая по приоритету очередь и т.д.

Приоритетное обслуживание пакетов востребовано там, где есть передача трафика с требованием к минимальным задержкам при передаче. Классификация пакетов в коммутаторе проходит в зависимости, на основании полей заголовка пакета.

На рисунке 1 представлен механизм функционирования алгоритма приоритетного обслуживания.

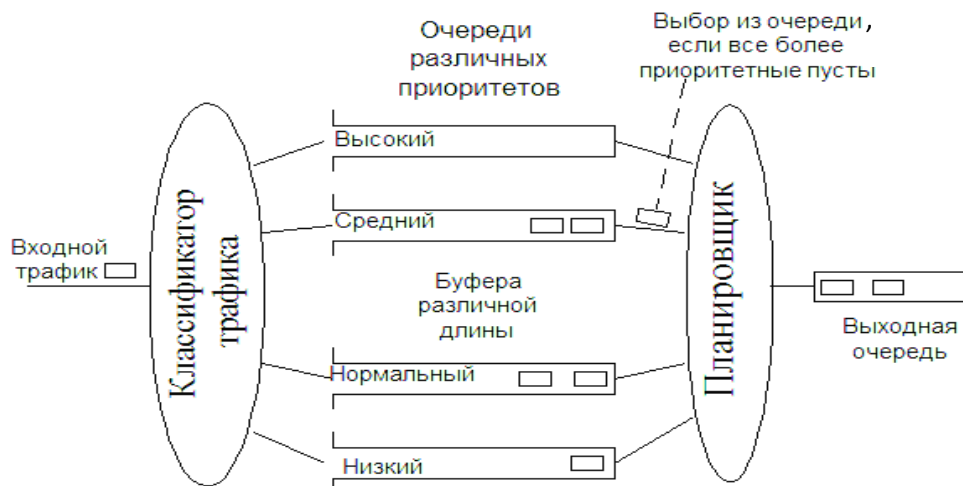


Рис. 1. Приоритетное обслуживание очередей

Алгоритм взвешенных очередей предоставляет определенный минимум пропускной способности всем классам трафика в данной сети. Каждому классу трафика предоставляется определенный процент пропускной способности.

При взвешенном обслуживании трафик делится на несколько классов и для каждого класса существует отдельная очередь, с которой связан процент пропускной способности. Очереди обслуживаются последовательно и циклически, в результате каждому классу трафика достается гарантированный минимум пропускной способности.

Взвешенное справедливое обслуживание является комбинированным механизмом обслуживания очередей, сочетающим приоритетное обслуживание с взвешенным. Имеется существование одной очереди, которая обслуживается по приоритетной схеме, при этом она должна иметь трафик с невысокой интенсивностью, остальные очереди коммутатор просматривает последовательно. Администратор также может задать вес каждого класса трафика.

При моделировании функционирования коммутатора очередь FIFO будет использоваться для моделирования отдельных очередей внутри коммутатора с приоритетным обслуживанием. Для ограничения длины очередей будет использоваться модифицированный вариант очереди FIFO – очередь с отсечением конца (tail drop). Проведем анализ работы полученных моделей сетевых устройств.

Для анализа результатов работы коммутаторов применим программу NetModel, в которой все элементы заданы нечеткими сетями Петри [3, 4]. Проанализируем различные варианты применения механизмов обслуживания очередей. В первом случае установим алгоритм приоритетного управления очередью в коммутаторе QoS, во втором случае – взвешенного управления, а в третьем – взвешенного справед-

ливого. Для моделирования воспользуемся моделью сети со звездообразным подключением рабочих станций. Программу NetModel будем запускать в режиме исследования коммутатора Switch 1.

Установим алгоритм приоритетного управления очередью в коммутаторе QoS. На рисунке 2 приведены графики накопления пакетов в очередях различных приоритетов.

По результатам моделирования видно, что коммутатор обрабатывает в первую очередь пакеты наивысшего приоритета (приоритет 4), что приводит к росту очередей пакетов низших приоритетов. Это объясняется тем, что обработка пакетов данных приоритетов начнется только при пустой очереди пакетов наивысшего приоритета. В результате чего после заполнения буферов очередей пакеты теряются. Поэтому данный алгоритм обслуживания очередей не является оптимальным. Установим алгоритм взвешенного управления очередью в коммутаторе QoS. На рисунке 3 приведены графики накопления пакетов в очередях различных приоритетов, а также график загрузки коммутатора.

По результатам моделирования видно, что коммутатор обрабатывает очереди в зависимости от процента предоставляемой каждому классу трафика пропускной способности выходного интерфейса. Из результатов моделирования следует, что загрузка коммутатора почти в 2 раза меньше, чем в первом случае. Поэтому данный алгоритм обслуживания очередей является более оптимальным для всех потоков трафика, кроме приоритетного.

Установим алгоритм взвешенного справедливого управления очередью в коммутаторе QoS. На рисунке 4 приведены графики накопления пакетов в очередях различных приоритетов, а также график загрузки коммутатора.



Рис. 2. Результаты моделирования изменения размера буферного накопителя в зависимости от числа тактов на режиме приоритетного обслуживания

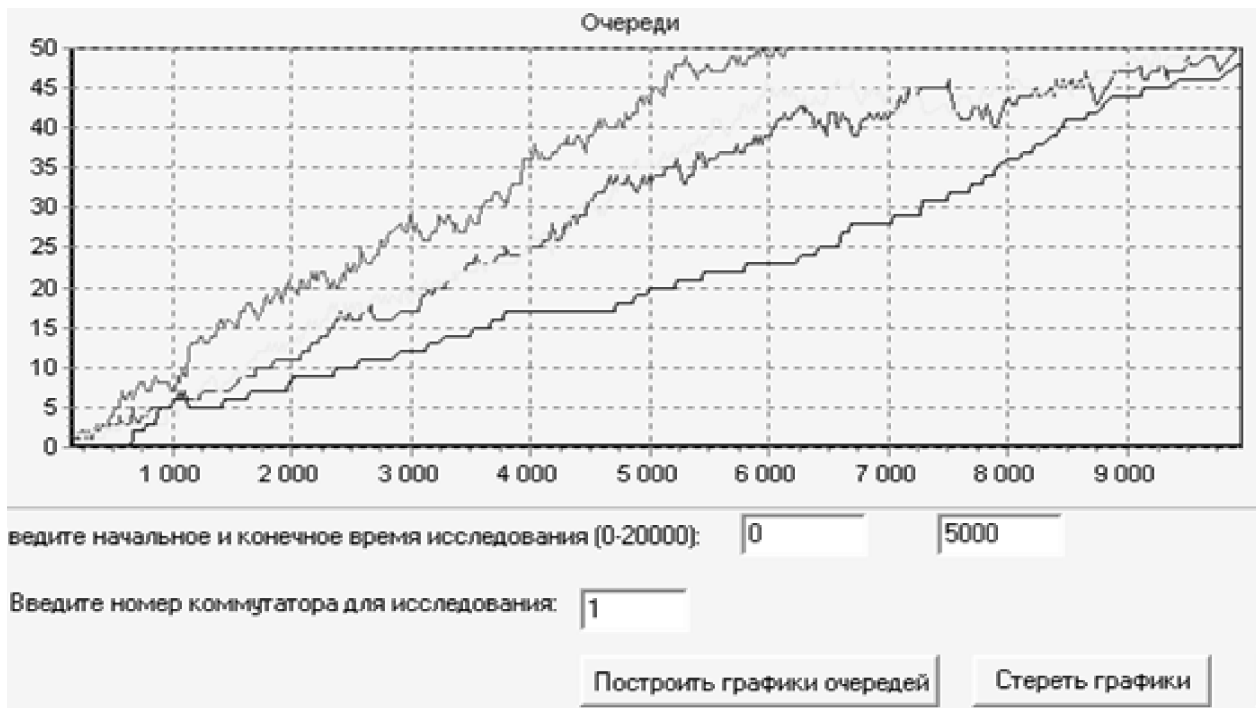


Рис. 3. Результаты моделирования изменения размера буферного накопителя в зависимости от числа тактов на режиме взвешенного управления



Рис. 4. Результаты моделирования изменения размера буферного накопителя в зависимости от числа тактов функционирования сети на режиме взвешенного справедливого обслуживания

По результатам моделирования видно, что в первую очередь коммутатор обрабатывает пакеты с наивысшим приоритетом. Оставшиеся очереди обслуживаются последовательно. Взвешенное справедливое обслуживание является комбинированным механизмом обслуживания очередей, что дает возможность качественной передачи как приоритетного трафика, так и низкоприоритетного. Поэтому данный алгоритм обслуживания очередей является

наиболее оптимальным по сравнению с рассмотренными выше.

По результатам моделирования можно сделать выводы о том, что функционирование моделей коммутатора с различными алгоритмами обслуживания очередей соответствует функционированию реальных коммутаторов с приоритетным подавляющим обслуживанием, с взвешенным обслуживанием и с взвешенным справедливым обслуживанием.

Литература

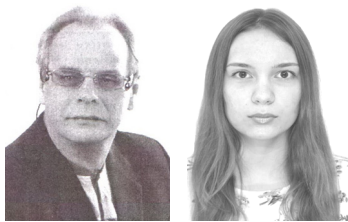
1. Кочкин, Д. В. Информационные сети и телекоммуникации / Д. В. Кочкин, А. А. Суконщиков. – Курск, 2017. – 233 с.
2. Kochkin, D. Methodology of models based on modified petri nets / D. Kochkin, A. Sukonschicov, T. R. Akhmetov // ACM International Conference Proceeding Series. Proceedings Papers – 3rd International Scientific And Practical Conference, DEFIN 2020. – 2020. – P. 3390882.
3. Sukonschikov, A. Modeling the elements of an enterprise infocommunication system using colored Petri nets / A. Sukonschikov, D. Kochkin, A. Shvetsov, I. Andrianov A. Sorokin S. Rzhetskaya // Conference of Open Innovations Association, FRUCT. – 2020. № 26. – P. 660–666.
4. Суконщиков, А. А. Универсальная программа моделирования на базе расширений сети Петри // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019663700, 22.10.2019. Заявка № 2019662577 от 11.10.2019.

A.A. Sukonshchikov, A.A. Koppalina
Vologda State University

SIMULATION OF QoS SWITCHES FUNCTIONING

This article discusses the various queuing mechanisms. Algorithms for priority service and weighted queuing are presented. The results of modeling on a switch with various queuing algorithms are considered.

Queuing mechanism, QoS, switch, simulation, priority service, network traffic.



ПРИМЕНЕНИЕ АППАРАТА СЕТЕЙ ПЕТРИ СО СВОЙСТВАМИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ СППР

В данной статье рассматривается математический аппарат сетей Петри, дополненный нейросетевыми характеристиками. На основе этого аппарата разработана СППР, используемая для управления работой сетевого устройства. В статье приведена схема СППР на базе нейронной сети Петри для реализации QoS-услуг в сетевом устройстве.

Сети Петри, нейронные сети, СППР, интеллектуальное сетевое устройство.

В работе предлагается расширить математический аппарат сетей Петри нейросетевыми характеристиками, которые позволят производить обучение сетей Петри, проводить тонкую настройку внутренних параметров СППР [1]. Предлагаемую СППР планируется использовать для анализа трафика, входящего в сетевые устройства (СУ), и определения наилучшей стратегии работы в сложившихся условиях для СУ. Результаты работы СППР для СУ должны оцениваться ЛПР, которое и выбирает окончательную стратегию работы СУ. При отсутствии реакции ЛПР СППР запускает программу эмуляции работы СУ, усредненную по критическим параметрам, вызвавшим смену стратегии работы [2, 3].

Будем рассматривать нейронный модуль как сверхпроводник с переменным временем активизации $T_a(X, V_0)$ – временем наступления явления сверхпроводимости, которое зависит от относительного суммарного входного воздействия X и объема нейронного модуля V_0 (кол-во нейропозиций и нейропереходов) (рис. 1).

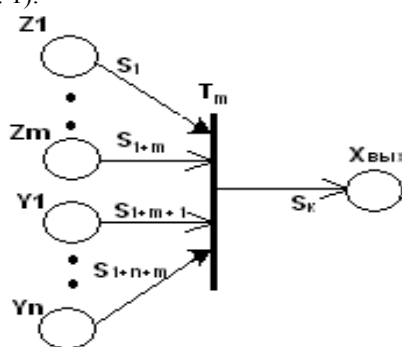


Рис. 1. Составной нейронный переход сети Петри

На вход нейронного перехода поступают следующие сигналы:

– $Z_i (i=1, m)$ – входные сигналы от окружающей среды;

– $Y_i (i=1, n)$ – сигналы с выходов других нейронных модулей.

Входные и выходные сигналы могут быть как отрицательные, так и положительные. Относительное суммарное входное воздействие определяется по

формуле (сумма относительное суммарных потенциалов всех входов):

$$X = \left(\sum_{i=1}^m z_i + \sum_{j=1}^n y_j \right) / X_{np}^{ex}, \quad (1)$$

где X_{np}^{ex} – пороговое значение входного сигнала, при котором нейронный модуль может быть активизирован,

T_0 – период функционирования нейронного модуля, определяется по формуле:

$$T_0 = T_n (1 + \ln(V_0)) \quad (2)$$

где T_n – период функционирования ОНСП.

Время активизации одного нейроперехода соответственно:

$$T_a = T_n e^{-1} \quad (3)$$

Порогообучаемый модуль – базовый конструктивный блок для простых нейронных сетей. Он состоит из множества входов, множества корректируемых весов, которые влияют на входы, концентратор, порог, и выхода. В его основной форме пороогообучаемый модуль приспособлен к принятию множества реальных, целочисленных, или булевых, значений на входе и созданию единственного булевого значения для выхода. Порог, которым определяется выход, обозначен как θ . θ является вещественным числом и способен к изменению свойств модуля (рис. 2).

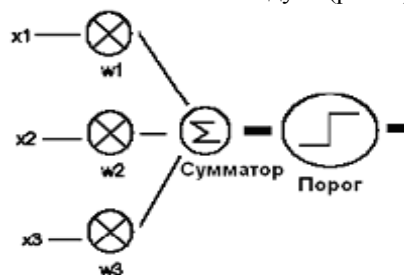


Рис. 2. Простой пороогообучаемый модуль

Порогообучаемый модуль на рисунке 2 имеет совокупность значений входных данных $X = \{x_1, x_2, x_3\}$ и множество весов $W = \{w_1, w_2, w_3\}$. Представление этого модуля сетями Петри будет выглядеть следующим образом: входной уровень содержит

входные позиции и весовые переходы; уровень обработки содержит весовые позиции и пороговые переходы; уровень вывода содержит позиции вывода. Множество входных сигналов X заменяется на маркировку $M(p_1, p_2, p_3)$, а весовое множество $W = \{w_1, w_2, w_3\} \approx O(t_1, t_2, t_3) = \{3, 1, 2\}$; θ is 3. Нейронная сеть Петри (НСП) представлена на рисунке 3.

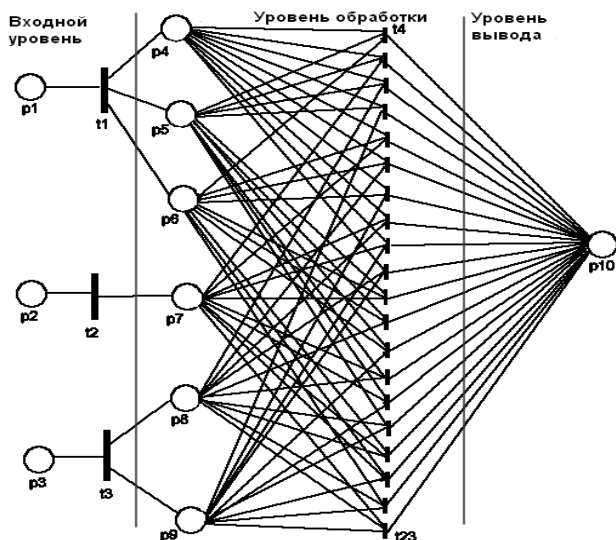


Рис. 3. Нейронная сеть Петри с $W = \{3, 1, 2\}$, $\theta = 3$.

Весовые коэффициенты W представлены количеством выходных дуг переходов t_1-t_3 , а у каждого перехода t_4-t_{23} количество входных дуг равно θ . Само же количество переходов t_4-t_{23} вычисляется по формуле:

$$R = C\left(\sum_{i=1}^3 O(t_i), \theta\right) = C(6, 3) = \frac{p!}{q!(p-q)!} = 20. \quad (4)$$

Известно, что при обучении порообоучаемых моделей используется пошаговая корректировка весов и порогов. В нейронной сети Петри корректируется состав уровня обработки, т.е. вместо W и θ изменяется количество позиций и переходов.

Очевидно, что расширение сетей Петри нейронными функциями существенно расширяет их применимость к задачам, требующим обучения моделей на основе ее предыстории, что находит применение в СППР.

В частности, планируется реализация СППР для сетевых устройств в ЛВС, внутренняя структура которой будет скрыта от пользователя и составлена из модулей обученной нейронной сети Петри, соединенных по выбранной архитектуре. Обучаться СППР будет сначала на заданном наборе входных параметров с последующим переобучением на основе собственной предыстории принятых решений.

В качестве входного трафика рассматриваются все пакеты во входных очередях СУ. В первую очередь во входных очередях оцениваются такие характеристики качества обслуживания (QoS), как:

- задержки пакетов;
- уровень потери пакетов;
- полоса пропускания;
- джиттер (дрожание трафика).

Если СППР выявляет нештатное значение какой-либо характеристики QoS в любой из очередей, то предлагает сменить стратегию обработки пакетов.

Формирование решений в проектируемой системе может осуществляться в двух режимах – автоматическом и супервизорном. В супервизорном режиме системный администратор или другая автоматическая система во множестве желательных комбинаций QoS-критериев формирует требуемую комбинацию. В результате чего у системы появляется «цель» – достичь требуемого состояния критериев.

При формировании структуры возможной СППР для сетевых устройств необходимо учесть не только улучшения качества обслуживания сетевого трафика, но и возможность реализации данной СППР с помощью современных аппаратных и логических средств моделирования.

Учитывая все приведенные выше факторы, для реализации предлагаемой нами СППР для управления работой сетевого устройства мы остановили свой выбор на комбинированном аппарате логического моделирования – нейронных сетях Петри (НСП), созданных путем добавления признаков нейронности в классические цветные сети Петри [4].

В условиях постоянно меняющегося контента входящего трафика сетевое устройство, принимающее его, сталкивается с проблемой классификации и трансляции. Требуется выделить пакеты, имеющие приоритетное значение в тех или иных условиях трансляции трафика.

В разрабатываемой СППР предполагается наличие интеллектуальных оконечных устройств, располагающихся между локальной сетью и СУ (например, коммутатора), определяющих, к какому условному классу относится содержимое пакета, т.е. способных определить по области данных пакета тип этих данных, например голосовой, видеотрафик, системные сообщения или файлы базы данных. Согласно определенному классу пакета оконечные устройства (ОУ) выставляют в поле ToS IP-заголовка приоритет пакета от 0 до 7 в зависимости от таблицы приоритетности ОУ.

После помещения пакета в буфер сетевого устройства мы предлагаем следующий алгоритм действий, реализуемый посредством ОНСП:

1. Извлечение из заголовка пакета IP параметров: TC, FL, PL, HL.
2. Сортировка и классификация ожидающих пакетов в буфере по заданным параметрам.
3. Обработка пакетов в соответствии с заданным алгоритмом обслуживания очередей.
4. На основе критериев доступа происходит фильтрация пакета.
5. Изменение алгоритма формирования очередей или профилирования трафика при нештатной ситуации для достижения максимальной эффективности качественного обслуживания.

Таким образом, в результате реализации предлагаемой системы получим обученное интеллектуальное сетевое устройство, способное к быстрому реагированию на разные реальные сетевые ситуации и обладающее свойствами быстрой, качественной и практически безошибочной обработки проходящей через

него информации. Внедрение предлагаемой СППР и тестирование ее на реальных сетевых устройствах станет важным этапом развития и совершенствования сетей передачи данных в России.

Литература

1. Суконщиков, А. А. Разработка и применение нейро-нечетких сетей Петри / А. А. Суконщиков, А. Н. Швецов, А. В. Улитин // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2020. – № 2 (95). – С. 35–46.

2. Суконщиков, А. А. Мультиагентные интеллектуальные системы и сети / А. А. Суконщиков, А. Н. Швецов. – Вологда : ВоГУ, 2019. – 209 с.

3. Суконщиков, А. А. Проектирование интеллектуальных агентно-ориентированных систем / А. А. Суконщиков // Интеллектуально-информационные технологии и интеллектуальный бизнес (ИНФОС-2019) : материалы десятой международной научно-технической конференции. – Вологда : ВоГУ, 2019. – С. 244–247.

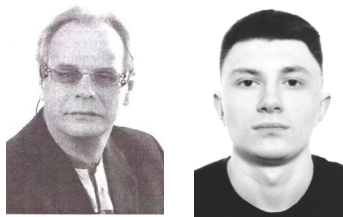
4. Modeling the elements of an enterprise infocommunication system using colored petri nets / A. Sukonschikov, D. Kochkin, A. Shvetsov [et al] // Conference of Open Innovations Association, FRUCT. – 2020. – № 26. – С. 660–666.

A.A. Sukonshchikov, A.A. Koppalina
Vologda State University

APPLICATION OF PETRI NETWORKS APPARATUS WITH NEURAL NETWORKS PROPERTIES FOR CONSTRUCTION OF DSS

This article examines the mathematical apparatus of Petri nets, supplemented by neural network characteristics. On the basis of this apparatus a DSS, which is used to control the operation of a network device, has been developed. The article presents a DSS scheme based on a Petri neural network for the implementation of QoS services in a network device.

Petri nets, neural networks, DSS, intelligent network device.



А.А. Суконщиков, Д.Е. Уткин
 Вологодский государственный университет

РАЗРАБОТКА СППР ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ РАКА ЛЕГКОГО

В статье рассматриваются вопросы разработки системы поддержки принятия решения для диагностики рака легкого на основе снимков компьютерной томографии. СППР строится на базе сверточной нейронной сети.

СППР, сверточная нейронная сеть, новообразование.

Без медицинских знаний тяжело определить, злокачественное или доброкачественное новообразование у человека. Даже врач при визуальном анализе компьютерной томографии (КТ) снимков может ошибаться. Зачастую проблема ошибок в анализе возникает из-за большого количества признаков новообразований. Одной из главных задач становится необходимость уменьшения количества ложных срабатываний для того, чтобы повысить точность предсказания ракового заболевания.

Для системы используется база данных LUNA16 [1]. LUNA16 – анонимизированная база данных снимков КТ с возможным раком. Все снимки из данной базы были помечены врачами вручную.

Цель работы – разработать систему, которая будет по снимку КТ распознавать и показывать положение новообразования в легких. Результат работы должен быть визуализирован в 2D. Таким образом, конечным продуктом будет являться ПО, которое должно сегментировать, находить расположение рака и визуализировать результат. Ориентировочная цель – получить результат с точностью не менее 70 %.

Система помощи принятия решения была написана на языке Python с использованием библиотек: numpy – является фундаментальным пакетом для научных вычислений на языке Python; SimpleITK – это набор инструментов для анализа изображений с большим количеством компонентов, поддерживающих общие операции фильтрации, сегментации и регистрации изображений. Он построен на основе инструментария сегментации и регистрации Insight ITK с целью предоставления упрощенного интерфейса для ITK. Сам SimpleITK написан на языке C++, но досту-

пен для большого количества языков программирования; openCV – это библиотека программного обеспечения для компьютерного зрения и машинного обучения с открытым исходным кодом; tensorflow – это библиотека с открытым исходным кодом для численных вычислений и крупномасштабного машинного обучения; pandas – библиотека для обработки и анализа данных; scikit-learn – это библиотека на Python, которая предоставляет множество неконтролируемых и контролируемых алгоритмов обучения [2].

На входе нейросети – объемное изображение, полученное с помощью компьютерной томографии.

На первом этапе происходит сегментация легких, то есть нахождение зоны интереса, чтобы не искать новообразования в костных и жировых тканях человека. После сегментации алгоритм отбрасывает те воксели, которые не вошли в маску интереса, чтобы не производить над ними вычислений.

Следующий этап – поиск раковых узелков на объемных сегментированных легких. По изображению передвигается окно размером 64×64. Если некоторые условия выполняются, то классификатор проверяет данную область. Классификацию выполняет сверточная нейронная сеть.

Когда на вход сети попадает изображение 64×64, нейронная сеть определяет «рак» и «не рак».

Сегментация делится на этапы: сглаживание; бинаризация; морфологическое замыкание; заполнение однородных областей; морфологическое размыкание.

На рисунке 1 слева представлен исходный срез легких, а справа отброшены те пиксели, которые не попали в маску области интереса.

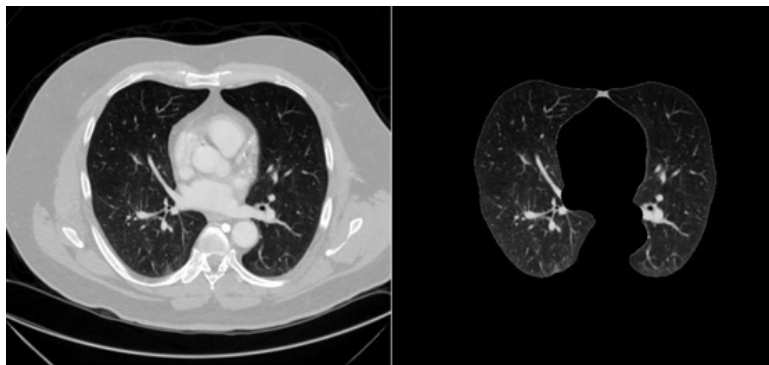


Рис. 1. Срез легких: 1 – исходный срез; 2 – срез под маской области интереса

Причина сегментации – поиск маски интереса для уменьшения вычислений и ускорения процесса обучения и распознавания.

Для одного z-среза алгоритм сегментации строится следующим образом:

1. Сглаживание: используется фильтр Гаусса с $r = 1, \sigma = 1$.

2. Бинаризация.

Получаем бинаризованное изображение легкого (рис. 2).

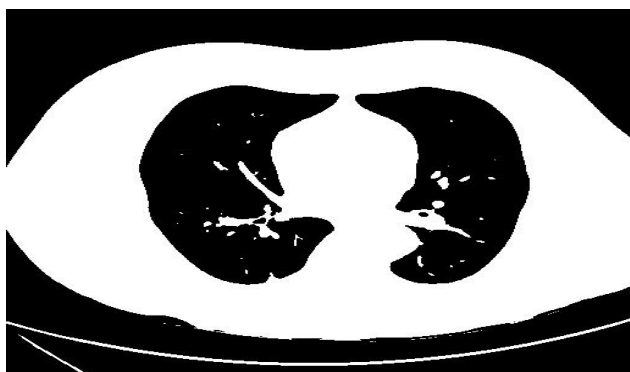


Рис. 2. Бинаризованное изображение легкого

3. Морфологическое замыкание $R=2$ (рис. 3).

Сложно подобрать идеальный радиус. Этот шаг делается для того, чтобы легкие не подверглись заливке на следующем этапе. Для этого мы в больших белых зонах вокруг легких должны убрать как можно больше черных пятен. Если использовать радиус больший чем нужно, то маска будет неточной.

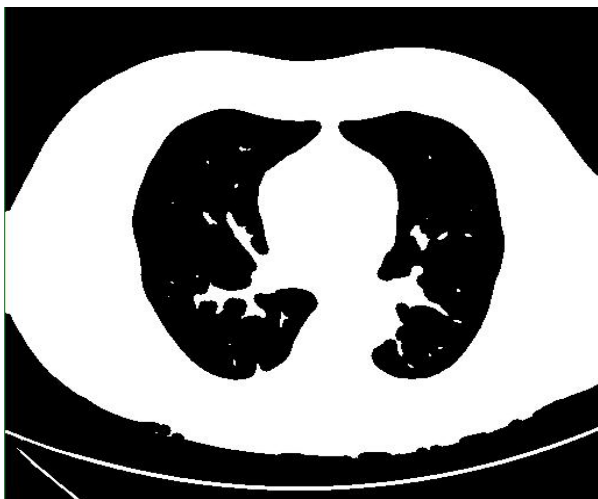


Рис. 3. Бинаризованное изображение легкого после морфологического замыкания

4. Заполнение однородных областей (рис. 4).



Рис. 4. Изображение после заполнения однородных областей

5. Морфологическое размыкание: производится для получения самой маски (рис. 5)

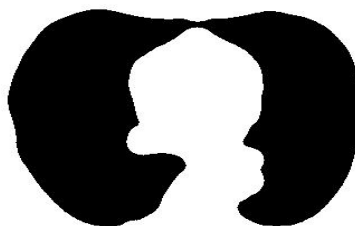


Рис. 5. Маска сегментации

Опишем принцип построения слоев сверточной нейронной сети (CNN). Сверточный слой – основная часть нейронной сети, где у каждого канала есть свой фильтр, ядро которого обрабатывает предыдущий слой по фрагментам, при этом коэффициенты веса ядра свертки каждого канала определяются на этапе обучения.

Пусть у нас есть d фильтров и $D = \{D_1, D_2, \dots, D_d\}$ – размерности фильтров. Пусть $E = \{E_1, E_2, \dots, E_d\}$ – размерности выхода предыдущего слоя ($\forall i: D_i \leq E_i$), C – количество каналов. $A \in R^{E_1 \times \dots \times E_d \times C}$ – выходные нейроны предыдущего слоя, $W \in R^{D_1 \times \dots \times D_d \times C}$ – фильтр, а $b \in R$ – биас (аддитивная компонента) ядра W . Тогда значение сверточного слоя Z_p для точки $p = (p_1, \dots, p_d)$ следующее:

$$Z_p = b + \sum_{c=0}^{C-1} \left(\sum_{d_1=0}^{D_1-1} \dots \sum_{d_d=0}^{D_d-1} A_{p_1+d_1, \dots, p_d+d_d, c} \cdot W_{d_1, \dots, d_d, c} \right). \quad (1)$$

Если A^l – это выход на слое под номером l , σ – соответственно функция активации для текущего слоя, тогда получается:

$$A^l = \sigma(Z^l). \quad (2)$$

«Слой пуллинга представляет собой нелинейное уплотнение карты признаков, при этом группа пикселей (обычно размера 2×2) уплотняется до одного пикселя, проходя нелинейное преобразование. Наиболее употребительна при этом функция максимума» [3].

Слой, в котором нейроны обладают соединениями со всеми активациями в предыдущем слое, называется полностью связанным (рис. 6). Их активации вычисляются умножением матриц со смещением. Формула вычисления значений слоя:

$$Z_j^l = \sum_i Z_i^{l-1} \cdot W_{ij}^l + b_j^l. \quad (3)$$

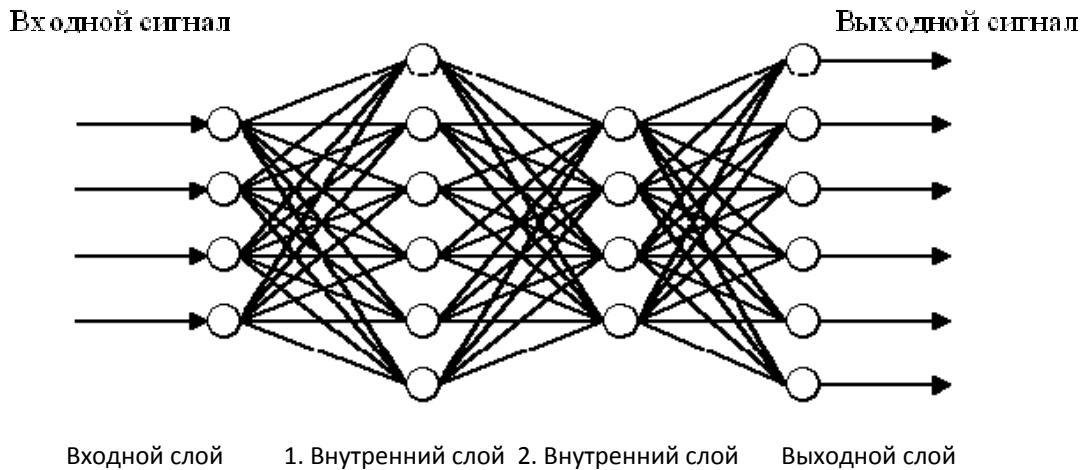


Рис. 6. Полносвязные слои (внутренние слои и выходной слой)

«Функция активации нейрона определяет выходной сигнал, который определяется входным сигналом или набором входных сигналов. Стандартная компьютерная микросхема может рассматриваться как цифровая сеть функций активации, которые могут принимать значения «ON» (1) или «OFF» (0) в зависимости от входа» [4]. Приведем несколько примеров:

$$\text{relu}(x) = \max(0, x), \quad (4)$$

$$\text{lrelu}(x) = \max(\alpha x, x), \alpha < 1, \quad (5)$$

$$\text{sigmoid}(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}. \quad (6)$$

Также существуют функции активации, которые применяют не к одному значению слоя, а ко всем. «Функция Softmax применяется в машинном обучении для задач классификации, когда количество возможных классов больше двух (для двух классов используется логистическая функция)» [5].

$$\text{softmax}(x)_k = \frac{e^{x_k}}{\sum_j e^{x_j}}, \quad (7)$$

Обучение нейронной сети – это настройка ее весовых параметров ядра. В данной системе обучение происходит с учителем, так как результаты выборки известны.

«Обучение – это процесс, в котором свободные параметры нейронной сети настраиваются посредством моделирования среды, в которую эта сеть встроена» [6]. В качестве функции ошибки для нейронных сетей обычно используется среднеквадратичная ошибка (MSQE):

$$E = \frac{1}{2} \sum_j (y_j - c_j)^2, \quad (8)$$

где y_j – выход сети номер j , c_j – правильный ответ для выхода j .

Для сетей softmax обычно используют среднюю кросс-энтропию по всем учебным данным.

$$E = \frac{1}{n} \sum_i (-\log(p_{y_i})). \quad (9)$$

Таким образом, обучение нейронной сети сводится к задаче минимизации функции ошибок E .

Для решения задачи будет использован градиентный метод оптимизации. «Градиентный спуск – метод нахождения локального экстремума (минимума или максимума) функции с помощью движения вдоль градиента. Для минимизации функции в направлении градиента используются методы одномерной оптимизации, например метод золотого сечения. Также можно искать не наилучшую точку в направлении градиента, а какую-либо лучше текущей» [7]. Исходя из этого предположения, схема обучения строится следующим образом, при задании критериев остановки обучения:

1. Инициализируются веса W , а также биасы b .
2. Вычисляется значение функции ошибок E .
3. Если выполнены критерии остановки, то алгоритм прекращает работу. Критериями остановки обучения могут быть следующие случаи: если функция ошибок E меньше заданного числа или в ходе работы сделано заданное количество шагов.
4. Вычисляем ∇E .
5. Вычисляем изменение параметров ΔW и Δb :
6. $\Delta W = \eta \nabla_w E$, (10)
7. $\Delta b = \eta \nabla_b E$. (11)
8. Корректируем параметры: $W = W - \Delta W$, $b = b - \Delta b$.
9. Повторить с п. 2.

Пользуясь методом обратного распространения ошибки, решаем задачу методом градиентного спуска, вычисляя для этого градиент. «Минимизация любой функции означает поиск самой глубокой впадины в этой функции. Функция используется, чтобы контролировать ошибку в прогнозах модели машинного обучения. Поиск минимума означает получение наименьшей возможной ошибки или повышение точности модели. Мы увеличиваем точность, перебирая набор учебных данных при настройке параметров нашей модели (весов и смещений)» [8]. Каким образом происходит вычисление градиента для всех видов слоев в CNN?

Исходя из того, что CNN заканчивается полносвязными слоями, определим следующие формулы. Вначале вычислим ошибку δ для выходного слоя сети:

$$\delta_j^l = \frac{\partial E}{\partial A_j^l} \sigma'(Z_j^l), \quad (12)$$

где σ – функция активации этого слоя, A – активация слоя.

Соответственно для скрытого полносвязного слоя будет:

$$\delta_j^l = \sum_k \frac{\partial Z_k^{l+1}}{\partial Z_j^l} \delta_k^{l+1}, \quad (13)$$

где Z – значения слоя до активации.

На следующем шаге происходит вычисление градиентов для весов и смещений:

$$\frac{\partial E}{\partial b_j^l} = \delta_j^l, \quad (14)$$

$$\frac{\partial E}{\partial W_{jk}^l} = A^{l-1} \delta_j^l. \quad (15)$$

LUNA16 – это список кандидатов на раковые узелки. Среди них есть как не раковые, так и раковые узлы. Из-за огромного количества кандидатов пришлось поменять соотношение раковых кандидатов, так как был сильный дисбаланс между раковыми и нераковыми кандидатами.

Выборка делилась на 3 набора: обучающую, для валидации, для тестирования. Соотношение наборов по объему 65:15:20. В итоге соотношение положительных и отрицательных кандидатов было 1:5.

По результатам контрольной проверки и результатам тестирования, можно сказать, что нейронная сеть работает корректно и находит расположение новообразований. Нейронная сеть находит более 82 % новообразований и тратит на это не более 30 секунд. Чем больше обучаемая выборка, тем алгоритм более точный.

Перспективы дальнейшей работы: разработать алгоритм классификации новообразований; перейти от 2D-среза к 3D; уменьшить время обучения и работы программы; увеличить точность выявления новообразований.

Литература

1. Lung Nodule Analysis (LUNA16) : сайт. – URL: <https://luna16.grand-challenge.org/> (дата обращения: 06.05.20). – Text : Electronic.

2. Уткин, Д. Е. Разработка системы сегментации и обнаружения новообразований для диагностики рака легкого / Д. Е. Уткин // XIII Ежегодная научная сессия аспирантов и молодых ученых. материалы межрегиональной научной конференции : в 2 томах. – 2019. – С. 221–225.

3. Сверточная нейронная сеть : сайт – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> (дата обращения: 06.05.20). – Текст : электронный.

4. Функция активации : сайт – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> (дата обращения 06.05.20). – Текст : электронный.

5. Softmax : сайт – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Softmax> (дата обращения: 06.05.20). – Текст : электронный.

6. Обучение нейронной сети : сайт – URL: <http://www.aiportal.ru/articles/neural-networks/learning-neunet.html#:~:text=Обучение%20-%20это%20процесс%2C%20в%20котором,определяется%20способом%20подстройки%20этих%20параметров> (дата обращения: 06.05.20). – Текст : электронный.

7. Градиентный спуск : сайт – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> (дата обращения: 06.05.20). – Текст : электронный.

8. Neurohive : сайт – URL: <https://neurohive.io/ru/osnovy-data-science/gradient-descent/> (дата обращения 6.05.20). – Text : Electronic.

A.A. Sukonshchikov, D.E. Utkin
Vologda State University

DSS DEVELOPMENT FOR LUNG CANCER DIAGNOSIS

The article deals with the development of a decision support system for diagnosing lung cancer based on computed tomography images. DSS is built on the basis of a convolutional neural network.

DSS, convolutional neural network, neoplasm.

УДК 72-726.03



Н.Н. Вихарева, Е.С. Сафронова
Вологодский государственный университет

УСПЕНСКИЙ СОБОР И МЕСТНАЯ ИКОНА «БОГОМАТЕРЬ ОДИГИТРИЯ»

В статье проведен ретроспективный анализ сложной истории строительства древнего каменного храма города Великий Устюг Вологодской области – Успенского собора – в его неразрывной связи с местной иконой Богоматери.

Строительная история, главная святыня, чудотворный образ.

Успенский собор – главное сооружение центрального соборного комплекса города Великий Устюг. Его современный облик сложился в результате многочисленных перестроек. Сегодня строгий монументальный объем отягощен пристроенной в XIX веке зимней церковью Благовещенья, закрывшей южный фасад собора. С трех сторон появились крыльца, а вместо закомар – пластические барочные украшения. В XVIII веке с востока к сооружению была пристроена двухчастная колокольня. Интерьер и иконостас собора были выдержаны в стиле барокко, богато декорированы лепными и резными украшениями в виде головок ангелов, венков, скульптурок, накладок, карнизов. Самый величественный храм города, архиерейская усыпальница, имеет сложную судьбу и противоречивую строительную историю, исчисляемую многими веками. История собора неразрывно связана с его главной святыней – местным чудотворным образом «Богоматерь Одигитрия».



Рис. 1. Успенский собор (начало XX в.)

Современный собор – седьмая и последняя постройка на данном месте. Первоначальная деревянная церковь возникла на рубеже XII–XIII веков. Впервые в летописях храм упоминается в 1290 году в связи с его освящением Ростовским епископом Тарасием. Это второе по счету здание существовало около ста лет. Епископ Тарасий привез в Великий Устюг огромный колокол «Тюрик» и икону «Богоматерь Одигитрия», ставшую главной святыней собора. По древнему русскому обычаю к освящению известного храма писалась соответствующая икона. Ростовское происхождение иконы, ее древность отмечается в компилятивной истории Великого Устюга, составленной в 1780 году священником Успенского собора Л.Я. Вологдиным. Несмотря на то, что собор был освящен в честь праздника Успения Богоматери, именно «Богоматерь Одигитрия» становится главной святыней собора, а затем и всего города, и это, несомненно, указывает на ее чудотворность.

В 1397 году в результате нападения на город новгородских ушкуйников, Успенский собор был сожжен, а иконы – изъяты и вывезены в Новгород. Но новгородский владыка повелел вернуть чудотворный образ и заново отстроить деревянный храм.

Далее местные летописи свидетельствуют о многочисленных пожарах, зафиксированных в 1490, 1496, 1552 и 1631 годах, после которых собор сгорал и отстраивался вновь. В 1554–1558 годах был построен первый каменный Успенский собор, огромный шестистолпный пятиглавый храм, который периодически перестраивался до 1778 года: в этот период старые барабаны и главы собора были заменены массивными ярусными восьмериками, которые до наших дней дошли в формах XIX века. В результате многочисленных переделок собор имеет сложную планировочную структуру, представляющую собой сочетание двухсветного квадратного объема храма и трехчастной апсиды. От своего прототипа собор унаследовал историческое местоположение, обусловившее его роль как основной градостроительной доминанты. Статичность и центрированность общей композиции, спокойные и монументальные формы организуют весь

ансамбль Соборного дворища города, просматриваются с отдаленных видовых точек города, а также за его пределами (рис. 1). Угловые подпружные арки несут восьмилотковый свод и барабаны глав (рис. 2).



Рис. 2. Пространство восьмерика

С западной стороны сохранились хоры храма.

От богатого, пышного убранства храма, к сожалению, сохранилось немного. В XVIII–XIX вв. храм украшал резной иконостас, в котором находились иконы XVII века, написанные мастером Оружейной палаты Спиридоном Холмогорцем. Существующий ныне иконостас относится к 1780 году. Он состоит из более поздних икон XVIII века. Сейчас в иконостасе сохранилась лишь одна древняя икона «Успение Богоматери» (1496 г.).

Икона «Богоматерь Одигитрия» – неотъемлемая часть внутреннего убранства на протяжении нескольких веков – неоднократно упоминается в описях 1608–1683 годов (рис. 3). В Успенском соборе икона стояла в специальном киоте, с обеих сторон была украшена серебром. Как сообщает Великоустюжская летопись, в 1963 году во время посещения города царь Петр I обратил внимание на чудотворный образ и приказал поставить его по левую сторону царских врат. Также в 1747 году образ выносили при встрече списка с прославленной иконы «Устюжское Благовещение».



Рис. 3. Икона «Богоматерь Одигитрия»

Вплоть до 1966 года икона датировалась XIII веком. При раскрытии оригинала исследователями-реставраторами ВЦНИЛКРГ был сделан окончательный вывод о дате написания иконы – середина XVI века. Видимо, произведение XIII века было утрачено в пожаре 1490 года. Существует версия, что дата написания иконы непосредственно связана с закладкой каменного Успенского собора в 1554 году, и его освящением в 1558 году, что подтверждается благословенной грамотой на освящение собора с приделом Иоанна Крестителя, выданной ростовским архиепископом 20 августа 1558 года (в отличие от общепринятой даты первой половины XVI века). Местом создания может быть как Ростов, так и сам Великий Устюг.

Икона «Богоматерь Одигитрия Смоленская Устюжская» – уникальное произведение темперной живописи размером 88×66 сантиметров (рис. 3). Икона местная, выносная и двухсторонняя, как и большинство великоустюжских икон. На лицевой стороне представлено поясное изображение Богоматери с младенцем Христом, со святыми на полях (митрополиты московские Петр и Алексей, святители Николай и Леонтий Ростовский). Основное изображение имеет довольно плохую сохранность, но общая композиция читается хорошо. Иконография – традиционная: правая рука Богоматери указывает на Богомладенца Иисуса. Отрок Христос сидит на левой руке Богородицы, правой рукой Он благословляет, а левой – держит свиток, что соответствует иконографическому типу Христа-Вседержителя. Произведение характеризуется темным, с преобладанием желтых и коричневых тонов колоритом. В особенностях главного изображения читаются все признаки, характерные для ростовских икон XVI века. Для образа характерны грузные и застылые формы, общая «безликость». Более высокую степень сохранности имеют изображения на полях. Состав святых типичен для памятников ростовского круга. Все надписи выполнены на специальной полоске, примыкающей к верхнему краю доски. Это говорит о том, что икона сразу писалась как подокладная. Именно в XVI веке сплошные металлические оклады получили на Руси широкое распространение, что подтверждает дату написания иконы.

На оборотной стороне доски икона имеет еще одно изображение – «Богоявление» («Крещение»). При Успенском соборе издревле существовал придел в честь Иоанна Крестителя, упоминавшийся в документах XVI и XVII вв., ныне утраченный. «Богоявление» написано на золотом фоне, так как не закрывалось окладом. Изображение выполнено более красочно, но несколько жестко, и является образцом провинциальной русской живописи XVI века. История произведения овеяна множеством легенд, повествующих о чудесных явлениях, происходивших у иконы в стенах Успенского собора: многочисленных исцелениях, изгнаниях бесов.

Успенский собор был действующим вплоть до 30-х годов XX века. В 1929 году икона «Богоматерь Одигитрия» перемещена в соседний квартал – в Великоустюжский краеведческий музей. Расположенная в центре экспозиции под резной сенью царских врат XVII века, она является доминантой композиции, и сохраняет неразрывную связь с первым каменным храмом на русском севере – Великоустюжским Успенским собором.

Литература

1. Вздорнов, Г. И. Об иконе Богоматери Одигитрии из Великого Устюга (легенда и действительность) / Вздорнов Г. И. // Средневековая Русь. – Москва, 1976. – С. 325–331.

2. Дунаев, Б. И. Северно-русское гражданское и церковное зодчество. Город Великий Устюг / Б. И. Дунаев. – Москва, 1915.

3. Рыбаков, А. А. Вологодская икона. Центры художественной культуры земли Вологодской XIII - XVIII веков / А. А. Рыбаков. – Москва : «Галарт», 1995.

4. Суворов, Н. Устюг Великий в конце XVII столетия / Н. Суворов // Памятная книга Вологодской губернии на 1864 год. – Вологда, 1864.

N.N. Vikhareva, E.S. Safronova
Vologda State University

THE ASSUMPTION CATHEDRAL AND THE LOCAL ICON "HODEGETRIA"

The article provides a retrospective analysis of the complex history of the construction of the ancient stone temple in the city of Great Ustyug, Vologda region – the Assumption Cathedral – in inseparable connection with the local icon of the Virgin Mary.

Construction history, the main shrine, miraculous image.



*А.Г. Гудков, С.В. Колобова,
М.В. Павлов, Д.Ф. Карнов*
Вологодский государственный университет

РАСЧЕТ КАНАЛИЗАЦИОННЫХ КОЛЛЕКТОРОВ С НЕРАВНОМЕРНЫМ ТЕЧЕНИЕМ ВОДЫ

Уточнена методика определения пропускной способности безнапорных канализационных трубопроводов при неравномерном течении воды. Приведены расчетные графики в безразмерных координатах. Предложена аппроксимирующая степенная формула для упрощения инженерных расчетов, определены коэффициенты регрессии в формуле.

Коллектор, канализация, гидравлический расчет, неравномерное течение.

Наружные водоотводящие сети для отвода бытовых, производственных и дождевых сточных вод рассчитывают обычно из условия безнапорного равномерного движения, пренебрегая возникающим на отдельных участках сети неравномерным движением, хотя это и связано с заиливанием и другими нежелательными последствиями [1]. Такие факторы, как неровности дна, изменения его уклона, формы и размеров сечения канала или трубы, расходов на некоторых участках, нарушают процесс равномерного движения и обуславливают возникновение неравномерности. Медленно изменяющееся неравномерное течение возникает в таких случаях:

- в коллекторе при истечении жидкости из него в водоем или резервуар, уровень воды в которых ниже (кривая спада) или выше (кривая подпора) уровня сточной жидкости в коллекторе;
- перед ливнеспусками и разделительными камерами;
- перед насосной станцией и т.д.

На конечных участках сети условиями неравномерного движения обычно нельзя пренебрегать. При расчетном режиме работы насосной станции на конечном участке коллектора (т.е. перед приемным резервуаром) устанавливается кривая спада. Как отмечается в [1], важен вопрос и об использовании свободной емкости подводящих к насосным станциям коллекторов путем повышения уровня сточных вод в коллекторе от кривой спада до свободной поверхности, отвечающей равномерному их движению с постоянной расчетной скоростью.

В настоящее время водоотводящие сети на неравномерное движение, как правило, не рассчитывают, что обусловлено в первую очередь большой трудоемкостью расчетов. Но необходимость в таких расчетах, как указано выше, имеется. Следует отметить, что построение кривой свободной поверхности в коллекторах особого практического значения не имеет.

Целью настоящей работы является уточнение методики расчета пропускной способности канализационных трубопроводов при неравномерном течении, составление зависимостей, графиков и таблиц для практического использования в проектно-конструкторских целях.

Решение уравнения неравномерного движения в трубопроводах. Рассмотрим случай присоединения коллектора круглого сечения к канализационной насосной станции (КНС), при котором происходит свободный излив сточной воды в приемный резервуар.

Исходными данными к математическому моделированию движения потока являются известный расход жидкости Q , диаметр D и уклон i_0 трубопровода, а также длина участка коллектора перед КНС. Для труб круглого сечения, которые представляют собой цилиндрические каналы замкнутого профиля, необходимые к расчету формулы площади поперечного сечения ω , смоченного периметра χ , ширины потока B имеют вид:

$$\omega = D^2(\beta - \sin \beta)/8; \chi = D \cdot \beta/2; B = D \cdot \sin(\beta/2), \quad (1)$$

$$\beta = 2 \arccos(1 - 2a), \quad (2)$$

где a – степень наполнения коллектора, равная h/D ; h – глубина жидкости в коллекторе; β – угол сегмента смоченного периметра.

Для определения значения модуля расхода воспользуемся формулой Шези:

$$K = \omega C \sqrt{R}, \quad (3)$$

где C – коэффициент Шези; R – гидравлический радиус, равный отношению ω/χ .

Если рассматривать только геометрические характеристики круглого сечения, то гидравлический радиус можно определять так:

$$R = \frac{D}{4} \cdot \left(1 - \frac{\sin \beta}{\beta}\right). \quad (4)$$

Введем новые безразмерные переменные:

$$K^* = K/K_{\Pi}; Q^* = Q/Q_{\Pi}, \quad (5)$$

где Q_{Π} – расход при полном наполнении коллектора; K_{Π} – модуль расхода при полном наполнении, равный

$$K_{\Pi} = \frac{1}{8} \pi D^{5/2} C_{\Pi}, \quad (6)$$

здесь C_{Π} – коэффициент Шези при полном наполнении.

Принимая, что

$$i_0 = Q_{\Pi}^2 / K_{\Pi}^2, \quad (7)$$

дифференциальное уравнение установившегося течения для призматических каналов или трубопроводов с прямым уклоном дна можно представить в следующем виде:

$$i_0 \frac{dl}{D} = \frac{K^{*2} \left(1 - \alpha \frac{Q^2 B}{g \omega^3} \right)}{K^{*2} - Q^{*2}} da, \quad (8)$$

где l – расстояние между двумя сечениями коллектора; α – корректив кинетической энергии.

Ранее численным интегрированием уравнения (8) в [2, 3], с использованием формулы Н.Н. Павловского для коэффициента Шези были получены номограммы и расчетные таблицы. В результате обоснована возможность увеличения пропускной способности трубопровода по сравнению с расходом при равномерном движении, при свободном изливе или перепаде в конце.

Обозначим безразмерный симплекс геометрического подобия:

$$\Gamma_0 = i_0 l / D. \quad (9)$$

Тогда искомая функциональная зависимость в безразмерном виде будет следующей:

$$\Gamma_0 = f(Q^*, a_k), \quad (10)$$

где a_k – наполнение трубопровода в конце участка.

При уточнении пропускной способности трубопровода были приняты следующие допущения:

- для коэффициента Шези вместо формулы Н.Н. Павловского использована обобщенная формула А.Д. Альтшуля в степенной форме [4] как универсальная в разных областях гидравлического сопротивления:

$$C = 25 \left(\frac{R}{(80n)^6 + \frac{0,025}{\sqrt{Ri_f}}} \right)^{1/6}, \quad (11)$$

где n – коэффициент шероховатости (0,013–0,014); i_f – уклон трения;

- гидравлический радиус R определяется не по формальным параметрам для круглого сечения (4), а на основе эмпирических зависимостей, рассмотренных ниже;

- скорость течения также рассчитывается не по формуле Шези, а на основе эмпирических зависимостей.

Зависимости для скорости, гидравлического радиуса и расходов от наполнения коллектора.

Согласно экспериментальным исследованиям [1, 2] при наполнениях трубопроводов больше 0,6 весь поток можно рассматривать состоящим из двух частей: первая часть – до половины трубы, вторая – в объеме между двумя стенкам, со свободной поверхностью и горизонтальной плоскостью по оси трубы. Распределение скоростей в обеих частях устанавливается как в полностью заполненном трубопроводе, средняя скорость равна скорости в полностью заполненном трубопроводе. В этом случае гидравлический радиус не зависит от степени наполнения.

На графике (рис. 1) приведены предлагаемые в [3] относительные величины скорости v/v_{Π} , расхода Q/Q_{Π} и гидравлического радиуса R/R_{Π} от степени наполнения трубопровода $a = h/d$. Здесь v_{Π} , R_{Π} – соответственно скорость течения и гидравлический радиус при полном наполнении трубы.

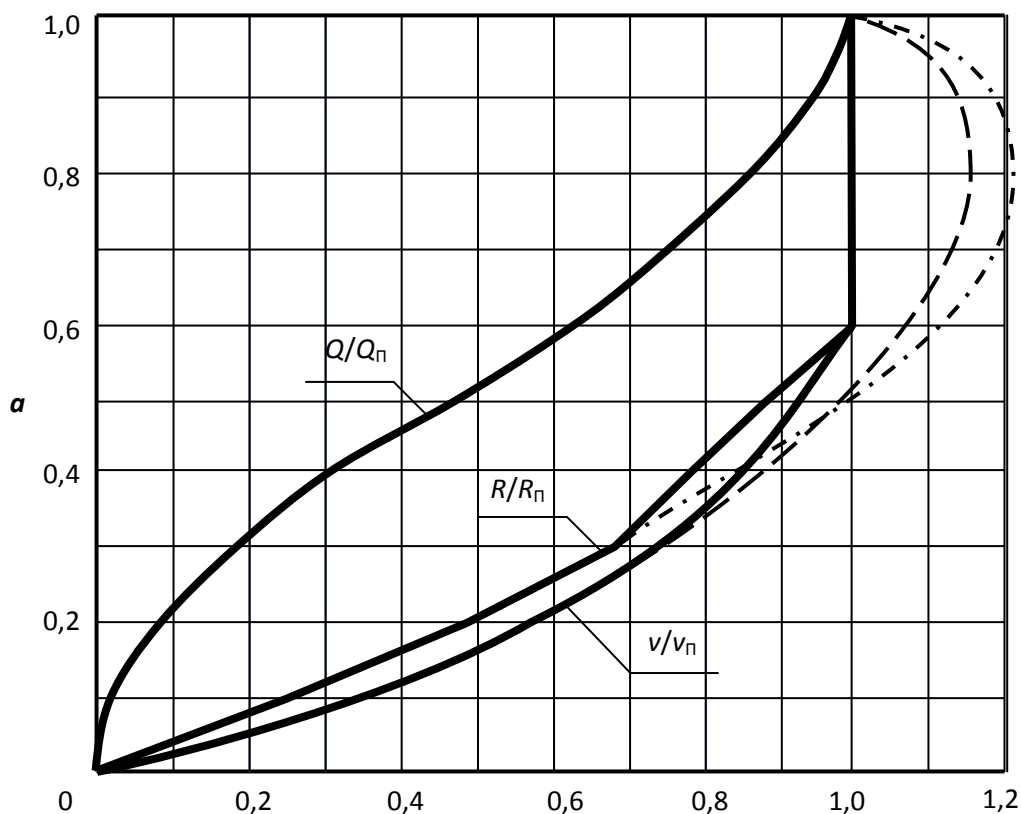


Рис. 1. Экспериментальные зависимости относительной скорости, гидравлического радиуса и пропускной способности трубопровода при безнапорном течении

Пунктиром на рисунке 1 обозначены зависимости R/R_{Π} по формуле (4) и v/v_{Π} по формуле Шези. При полном наполнении расход Q_{Π} можно принимать как для напорного течения при заданном уклоне, что позволяет использовать универсальные методы моделирования и расчета напорных и безнапорных трубопроводов.

Расчеты и аппроксимация зависимости пропускной способности трубопровода при неравномерном течении. Для дальнейших расчетов были использованы данные графика на рисунке 1 по гидравлическому радиусу и скорости в кубической сплайн-интерполяции. Численный эксперимент на основе формул (1)–(8), (11) был проведен с помощью одной из компьютерных программ систем компьютерной алгебры.

В итоге по уравнению (8) были получены графики при различных соотношениях $Q^* = Q/Q_{\Pi}$ (представленные на рис. 2), а также таблицы для определения пропускной способности трубопроводов диаметрами 250...4000 мм, одна из которых представлена ниже (табл. 1).

Кроме того, были изучены возможности вывода аппроксимирующей зависимости для упрощения расчета пропускной способности коллектора. Критерием подбора аппроксимирующего выражения было достижение точности совпадения не менее чем на 90–95 % значений, рассчитанных по искомой формуле и полученных численным интегрированием уравнения (8). Кроме того, учитывалось удобство получаемой итоговой формулы для проведения инженерных расчетов.

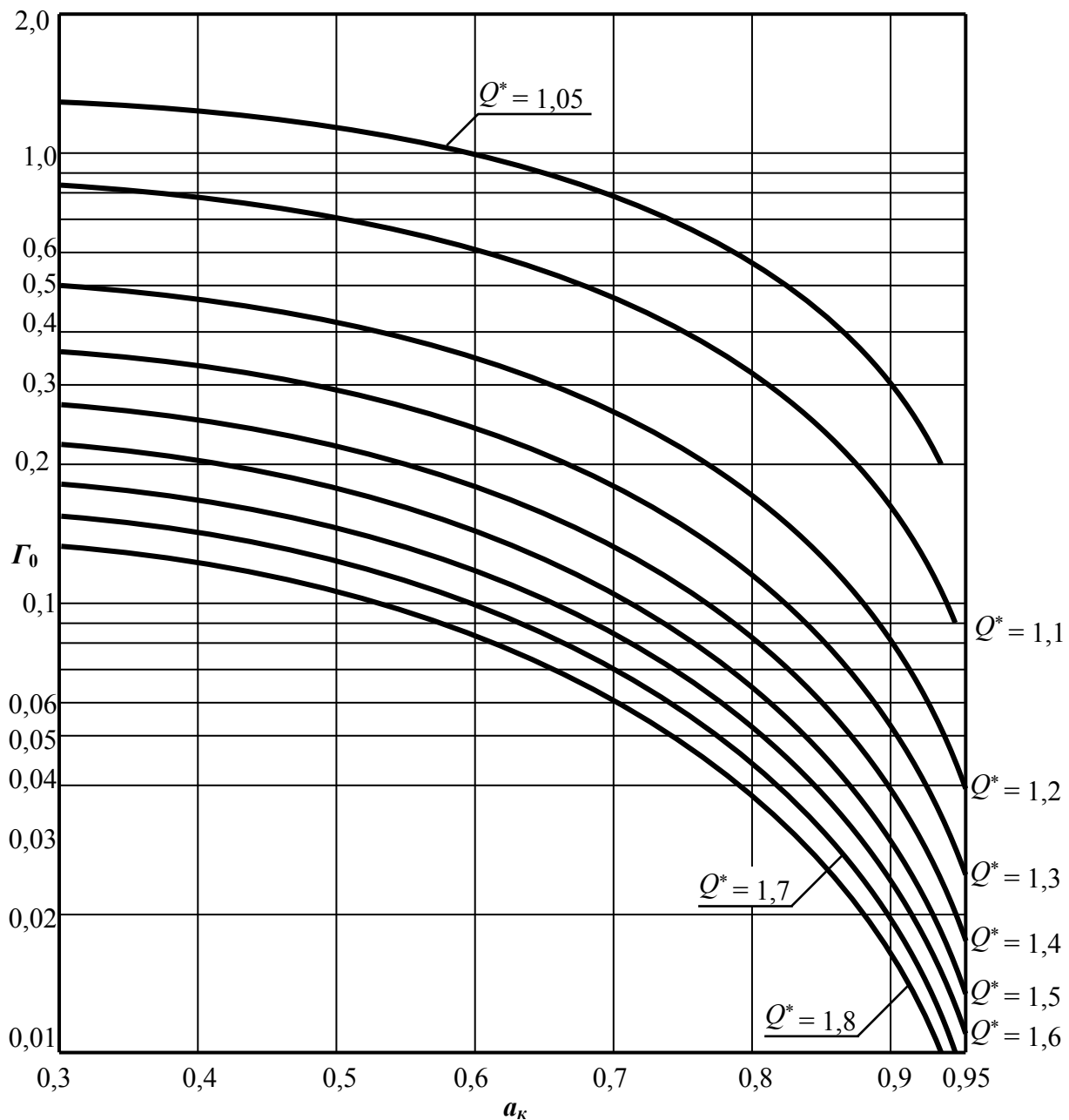


Рис. 2. Расчетные графики для определения пропускной способности трубопровода при полном наполнении и свободном изливе в резервуар

Таблица 1

Пропускная способность трубопровода Q при свободном изливе в конце участка длиной L для различных внутренних диаметров D

$D=500$ мм		Уклон i , тысячные											
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	15		
$Q_{полн}$, л/с →		154,3	189,1	218,5	244,4	267,7	289,2	309,3	328,1	345,8	423,7		
a_k^*	Q , л/с	Длина участка L , м											
0,95	541	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1		
0,9	437,8	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,5	2,9	14,2		
0,85	374,9	2,9	3,3	3,7	4,2	4,8	5,8	7,2	9,4	13,9			
0,8	326,3	5,9	6,8	8,0	9,8	12,7	18,1	32,4				Q , л/с	a_k
0,75	284,9	11,0	13,5	17,6	25,2	46,8					126	290,4	0,6
0,7	248,1	20,4	28,0	45,3	164						106	338,7	0,65
0,65	214,7	39,5	70,1						69,1	38,4	27	391,4	0,7
0,6	184,1	88,3							24,2	18	14,4	449,4	0,75
					72,8	28,5	18,3	13,5	10,7	8,9	7,6	514,7	0,8
			25,3	14,7	10,4	8	6,6	5,6	4,8	4,2	3,8	591,4	0,85
		112	4,1	3,5	3	2,6	2,4	2,1	1,9	1,8	1,7	690,6	0,9
		1,3	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	853,4	0,95
		689,1	562,5	533,6	503	470,4	435,5	397,4	355,4	307,6	251	← $Q_{полн}$, л/с	
		15	10	9	8	7	6	5	4	3	2	$D=600$ мм	
		Уклон i , тысячные											

* a_k – наполнение трубопровода в конце участка, доли

Таблица 2

Коэффициенты регрессии для формулы (12)

Относительный расход Q^*	k_0	k_1	k_2	k_3	Средняя ошибка $\bar{\epsilon}$, %
1,05	1,312	2,762	3,482	5,748	0,77
1,1	0,873	1,466	1,830	5,308	0,41
1,2	0,539	0,795	1,178	5,004	0,73
1,3	0,389	0,549	0,995	4,842	0,95
1,4	0,302	0,418	0,917	4,719	1,14
1,5	0,244	0,332	0,852	4,648	1,19
1,6	0,203	0,275	0,828	4,573	1,27
1,7	0,173	0,232	0,804	4,516	1,33
1,8	0,150	0,201	0,802	4,450	1,38

После проведенного анализа различных выражений (степенной, показательной, логарифмической, гиперболической и экспоненциальной функций) для аппроксимации выражения (10) выбрана степенная зависимость вида:

$$\Gamma_0 = k_0 - \frac{k_1}{\sqrt{1 + \frac{k_2}{a_k^{k_3}}}}, \quad (12)$$

где k_0, k_1, k_2, k_3 – коэффициенты регрессии.

Коэффициенты регрессии рассчитывались по методу наименьших квадратов с поиском минимума суммы квадратов разностей для каждого соотношения расходов Q^* (табл. 2). Сравнение результатов, рассчитанных по уравнению (8) и формуле (12), показало хорошее совпадение в диапазоне наполнений трубопровода 0,3...0,95. Средняя ошибка аппроксимации $\bar{\epsilon}$ не превысила 1,38 %.

Пример инженерного расчета. Участок коллектора дождевой канализации имеет длину $l = 110$ м от последнего узлового колодца до насосной станции. Расчетный расход дождевых стоков составляет $Q = 1250$ л/с. Требуется подобрать диаметр D и уклон

коллектора i_0 при учете неравномерного течения и минимально допустимой скорости течения.

Принимаем соотношение расходов $Q^* = 1,3$ и наполнение в конце участка $a_k = 0,6$, затем по графику на рисунке 2 находим значение геометрического симплекса $\Gamma_0 = 0,24$. Затем по формуле (9) определяем отношение $i_0/D = \Gamma_0/l = 0,24 / 110 = 0,00218$.

Принимаем диаметр коллектора $D = 0,8$ м и получаем приемлемый уклон, равный $i_0 = 0,00218/0,8 = 0,0027$. Для сравнения: согласно расчетным таблицам [2, с. 398] при этом же уклоне и равномерном режиме был бы подобран коллектор диаметром не менее 1 м.

В ходе работы получены следующие результаты:

- уточнены расчетные графики и таблицы для определения пропускной способности самотечного трубопровода с учетом неравномерности движения жидкости;
- предложена аппроксимирующая степенная формула для упрощения расчета;
- определены коэффициенты регрессии для этой формулы, обеспечивающие хорошее совпадение в широком диапазоне наполнений самотечного коллектора.

Литература

1. Курганов, А. М. Закономерности движения воды в дождевой и общесплавной канализации / А. М. Курганов. – Москва : Стройиздат, 1982. – 72 с.
2. Курганов, А. М. Справочник по гидравлическим расчетам систем водоснабжения и канализации / А. М. Курганов, Н. Ф. Федоров. – Ленинград : Стройиздат, 1973. – 408 с.
3. Алексеев, М. И. Гидравлический расчет сетей водоотведения. Часть 1. Закономерности движения жидкости / М. И. Алексеев, Ф. В. Кармазинов, А. М. Курганов. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 1997. – 128 с.
4. Альтшуль, А. Д. Гидравлические сопротивления / А. Д. Альтшуль. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Недра, 1982. – 224 с.

A.G. Gudkov, S.V. Kolobova, M.V. Pavlov, D.F. Karpov
Vologda State University

CALCULATION OF SEWAGE COLLECTORS WITH NON-UNIFORM FLOW OF WASTE WATER

The method for determining the throughput capability of gravity flow sewage collectors with a non-uniform flow has been specified. Calculated graphs in dimensionless coordinates are presented. An approximating power-law formula is proposed to simplify engineering calculations, the regression coefficients in the formula are determined.

Sewer pipe, sewerage, hydraulic calculation, non-uniform flow.



Д.В. Кузнецов, Е.В. Левичев, В.А. Якунина
Череповецкий государственный университет

ОПЫТ И ПРОБЛЕМАТИКА ПРИМЕНЕНИЯ BIM-МОДЕЛЕЙ В ПЕРИОД ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗДАНИЯ

В данной статье выделяются аспекты, в которых может применяться BIM-модель при обследовании и реконструкции зданий; определяются задачи, которые позволят оптимизировать применение BIM на стадии эксплуатации; рассматриваются проблемы, препятствующие использованию информационных моделей для эксплуатации зданий.

BIM-моделирование, эксплуатация, обследование, реконструкция.

BIM-моделирование зачастую связывают с проектированием, реже – со строительством и практически не связывают с непосредственной эксплуатацией зданий. Применение BIM на этапе эксплуатации ограничивается «моделью как хранилищем информации» или совсем игнорируется.

Несмотря на это, BIM-технологии могут быть удобным средством для контроля и мониторинга эксплуатируемых объектов. Каждая модель индивидуальна, так как создается согласно полному комплексу исполнительной документации для конкретного здания, что делает BIM-модель носителем информации о характеристиках объекта, например о его конструктивных особенностях и об оборудовании инженерных систем.

Применение BIM-моделей при обследовании зданий

Обследование – комплекс мероприятий по определению и оценке фактических значений контролируемых параметров, характеризующих эксплуатационное состояние, пригодность и работоспособность объектов обследования и определяющих возможность их дальнейшей эксплуатации или необходимость восстановления и усиления [1]. В связи с тем, что большое число зданий в настоящий момент подвержено физическому и моральному износу, увеличивается число проводимых обследований, что является одним из трудоемких мероприятий в строительной сфере. Важной составляющей обследования зданий и сооружений является подготовка пакета документов по результатам обследования, в особенности описания и чертежи выявленных дефектов и повреждений.

Использование BIM-технологий позволяет создавать наглядную 3D-модель объекта, содержащую информацию о реальном состоянии конструкций на момент проведения обследования. Для наличия достоверных сведений о здании модель нуждается в постоянной актуализации, внесении новой информации.

При подробном отражении всех изменений, которое претерпевает здание в своем жизненном цикле, растут потенциальные возможности ее использования при эксплуатации зданий в целом. Помимо этого, достаточная полнота имеющейся информации облегчает процесс использования модели различными специалистами.

В BIM-модель можно вносить данные об обнаруженных дефектах, характере армирования несущих конструкций или сечениях элементов в момент обследования здания, что позволит провести анализ несущей способности конструкций и фактического технического состояния здания в целом и сравнить с решениями проектной или рабочей документации. При этом инструментов, способных, например, создать трещины в железобетонных конструкциях BIM-модели, на данный момент не существует. Поэтому в большинстве случаев в информационной модели можно лишь условно отразить те изменения, которые претерпело здание за время эксплуатации. Посчитать влияние трещины на несущую способность конструктивного элемента и прочность конструкции в этой же модели не представляется возможным. Модель с информацией о существующих дефектах можно использовать для отслеживания текущего состояния здания или в качестве наглядной презентации для заказчика (рис. 1).

Эксплуатация вносит в модель большое число изменений. Новые данные необходимы в частности для эффективной эксплуатации всех элементов здания: плановых ремонтов, амортизации, замены расходников, энергоаудита, аудита технических сетей [2].

С помощью BIM-модели возможно произвести прогнозирование затрат по замене оборудования, спрогнозировать ремонтные работы, осуществить контроль состояния конструкций, инженерных систем и оборудования. После ремонтов или замены оборудования вносятся соответствующие изменения в модель.



Рис. 1. Пример оформления информации о дефектах на фасаде здания



Рис. 2. Описание дефекта в BIM-модели

Применение BIM-моделей при реконструкции зданий

При проведении работ по реконструкции часто присутствует необходимость адаптации здания к эксплуатации в современных условиях. Соответственно, важно учитывать новые требования к прочности конструкций, теплозащитным характеристикам, возможности использования новых инженерных сетей.

Наличие BIM-модели здания при реконструкции позволит оптимизировать такие задачи, как:

- 1) моделирование изменений в здании (например, усиление или замена существующих конструкций);
- 2) переоснащение здания инженерным оборудованием, изменение его характеристик;
- 3) наблюдение за текущим состоянием здания для проведения своевременных работ.

При этом использование технологий информационного моделирования позволит изменять параметры, которые повлекут автоматическое изменение связанных элементов модели, спецификаций, сроков и стоимости выполнения работ. Все данные, полученные при обследовании здания, можно внести в BIM-модель, которая позволит проанализировать возможные проектные решения в режиме реального времени.

Таким образом, в использовании технологий информационного моделирования при эксплуатации зданий и сооружений можно выделить следующие аспекты:

- 1) возможность моделирования изменений в конструкции зданий с течением времени;
- 2) возможность проведения капитального ремонта, реконструкции или технического перевооружения на основе полученной модели;

- 3) отслеживание текущего состояния здания;
- 4) наглядное представление о состоянии объекта в целом [3].

Подтверждением перечисленных выше аспектов может служить разработка и реализация проекта реконструкции и переоснащения новым оборудованием известного оперного театра в Сиднее с использованием BIM-модели. Поставленная задача использовать BIM для реконструкции, управления и обслуживания здания решалась путем создания комплексной модели. Все связанные с моделью подрядчики получали данные и обменивались ими.

При моделировании театра особое внимание уделялось визуализации количественной информации. Для количественной оценки состояния помещений здания использовался так называемый индекс состояния здания, визуализация которого позволила быстро оценивать общую ситуацию в различных помещениях театра.

Для Западного скоростного диаметра (скоростная внутригородская платная магистраль, находящаяся в Санкт-Петербурге) также была создана BIM-модель, которая позволила отследить все имеющиеся дефекты конструкций (рис. 2) и создать их структурированный список для отслеживания технического состояния магистрали.

Проблемы использования BIM-моделей на этапе эксплуатации

Применение BIM-моделей и при обследовании зданий, и при реконструкции – это единичные случаи, так как имеются препятствующие этому факторы. Одной из основных проблем в сфере эксплуатации зданий на основе BIM является отсутствие реально действующих процессов для совершенствования построенной модели с учетом исполнительной документации.

Также для использования BIM-модели на этапе эксплуатации необходим квалифицированный специалист, отвечающий за загрузку новых данных в модель и сопровождение этой модели на всем этапе эксплуатации здания. При отсутствии такого специалиста данных для процесса эксплуатации может быть недостаточно. Часто необходимые данные отсутствуют или они неточны, так как модель не подвергалась доработке на основе проектных изменений.

Согласно мнению экспертного общества имеющаяся нормативно-правовая база, регулирующая вопросы применения и использования информационного моделирования на стадии проектирования, стандартизирована слабо и требует большого количества доработок. В то время как BIM-технологии в проектировании используют довольно часто, в отличие от их применения на стадии эксплуатации зданий. Соответственно, проблема наличия необходимой и качественно проработанной нормативной документации также влияет на возможность использования технологий информационного моделирования не только в момент проектирования, но и на протяжении всего жизненного цикла здания.

Современный опыт эксплуатации зданий на основе BIM выявил проблему, связанную с разницей в продолжительности жизненных циклов BIM-технологий и срока службы зданий. Значит, в долгосрочной перспективе для работы с информационной моделью придется пользоваться новыми информационными стандартами и стандартами данных [4].

По оценкам специалистов Министерства строительства и ЖКХ, внедрение BIM-технологий обеспечивает сокращение затрат на строительство объектов на 25 %, а также может обеспечивать снижение расходов на эксплуатацию на 35 % [5], поэтому экономически целесообразно иметь информационную модель на этапе проектирования и грамотно использовать ее и после получения разрешения на ввод в эксплуатацию объекта. Этап эксплуатации является самым продолжительным в жизненном цикле объекта. Применение BIM-моделей на данном этапе – это пока единичные случаи, но использование BIM-технологий при эксплуатации, и в том числе при обследовании и реконструкции зданий и сооружений, имеет право на существование. Хотя это и ставит ряд вопросов, которые необходимо решить для нормальной возможности использования информационной модели здания (например, техническая возможность эксплуатирующих организаций вносить изменения в модель без привлечения третьих лиц). В первую очередь это станет возможным при разработке необходимой нормативно-технической базы для применения BIM-модели в период эксплуатации здания. В целом данная концепция нуждается в дальнейшем развитии и проработке, а также публичных обсуждениях данного направления в экспертном сообществе.

Литература

1. СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений : введен 2003-08-21. – Текст : электронный // Техэксперт : информационно-справочная система / Консорциум «Кодекс» (дата обращения: 15.03.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.
2. BIM-процесс. – Текст : электронный // Информационный ресурс о BIM-моделировании. – URL: <https://1-bim.ru/bim-процесс/> (дата обращения: 20.11.2020).
3. Применение BIM-технологий при проектировании и реконструкции зданий и сооружений / К. С. Петров, Ю. С. Швец, Б. Д. Корнилов, А. О. Шелкоплясов // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 4. – С. 173.
4. Селютина, Л. Г. Управление жизненным циклом объекта капитального строительства на основе современной технологии информационного моделирования (BIM) / Л. Г. Селютина // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры : материалы Всероссийской научно-практической конференции; СПбГАСУ. – Санкт-Петербург, 2018. – 239 с.
5. Что такое BIM и зачем новые технологии нужны девелоперам и госструктурам // РБК. – 2019. – 03 апреля.

D.V. Kuznetsov, E.V. Levichev, V.A. Yakunina
Cherepovets State University

EXPERIENCE AND PROBLEMS OF USING BIM MODELS DURING BUILDING OPERATION

This article highlights the aspects in which the BIM model can be applied in the survey and reconstruction of buildings. Tasks are identified that will optimize the use of BIM at the operational stage. Problems that hinder the use of information models for building maintenance are considered.

BIM–modeling, operation, inspection, reconstruction.



Т.И. Лохвинская, Е.Р. Вудвуд
 Бендерский политехнический филиал
 ГОУ «ПГУ им. Т.Г. Шевченко»

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В данной статье рассмотрены экологические аспекты, специфика физических процессов, происходящих при получении полимеров. По результатам обработки данных сделаны выводы о том, что влияет на теплофизические свойства полипропилена.

Теплоизоляционные материалы, полипропилен, полимер, мономер, пенополимеры.

Теплоизоляционные материалы играют значимую роль в формировании благоприятных условий для производственной деятельности и жизни человека. В различных природных зонах теплоизоляционные материалы имеют соответствующее функциональное назначение. С развитием технологии строительства зданий теплоизоляционные материалы претерпевали эволюционные изменения в направлении улучшения теплофизических свойств. Сегодня строительной отрасли необходимы энергоэффективные теплоизоляционные материалы.

На рынке теплоизоляционных материалов в Приднестровской Молдавской Республике в настоящее время в качестве одного из видов утеплителя широко используется пенопласт на основе полимера пенополистирола. Пенополистирол – экологически безопасное сырье для получения теплоизоляционного материала. Пенополистирол состоит на 98 % из воздуха, ни при каких условиях не выделяет токсичных и вредных веществ. Основа пенополистирола – полимер.

Полимер – это химическое соединение с высокой молекулярной массой, макромолекулы которого состоят из большого числа повторяющихся мономерных звеньев, связанных друг с другом химической связью (рис. 1).

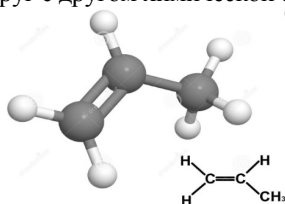


Рис. 1. Мономолекулы

Для получения полимеров применяют следующие мономеры: этилен, винилхлорид, винилацетат, винилденхлорид, тетрафторэтилен, пропилен, метилметакрилат, стирол, мочевины, фенол, меламин, формальдегид. Качественный и количественный состав полимеров обусловлен рядом причин: многокомпонентным составом полимерного композиционного материала, содержанием остаточных продуктов синтеза, наличием примесей в ингредиентах. Основными летучими соединениями, выделяющимися при переработке и эксплуатации полимерного материала, являются мономеры и вещества, их загрязняющие: органические растворители, используемые в процессе синтеза, пластификаторы, катализаторы, стабилизаторы, продукты термической и термоокислительной деструкции. Состав продуктов деструкции зависит от состава и строения полимерного материала, целевых добавок, примесей, содержащихся в исходном сырье, способа получения полимера и способа переработки, условий, в которых протекает деструкция.

Нами изучены экологические аспекты, специфика физических процессов, происходящих при получении полимеров. Исходным сырьем для производства теплоизоляционного материала на основе полипропилена является газообразный пропилен – бесцветное кристаллическое вещество с линейно-разветвленной структурой молекул, выделяемое путем переработки нефти (рис. 2).



а)

б)

Рис. 2. Полипропилен: а) порошкообразный, б) в гранулах

Существенное значение при определении санитарно-гигиенических характеристик полимеров имеют органолептические, физиолого-гигиенические, физико-гигиенические, микробиологические показатели.

Пенопласт как вспененный пластик на основе полимера «пенополистирол» представляет собой дисперсные полимерные системы. В структуре пенопласта взаимно распределены в пространстве полимер и газовая среда. Газообразная фаза в составе пенопласта составляет 50 % по объему, минимальный диаметр ячеек воздуха не превышает 0,02 мм [1].

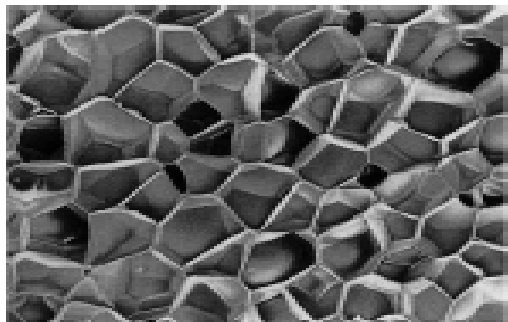


Рис. 3. Структура пенопласта под микроскопом

Ячейки воздуха (рис. 3) разделены тонкими пленками полимерного материала. Сочетание твердой и газообразной фаз определяет специфичность свойств пенопластов. Свойства полимерной пены зависят и

определяются морфологией ячеек: плотный и средней плотности пенопласт имеет плоскую структуру сферических частиц (рис. 4а); структура легкого и сверхлегкого пенопласта представляет собой замкнуто-ячеистую структуру с полыми частицами формы многогранников (рис. 4б); поропласт с ретикулярной структурой (рис. 4в) представляет собой многогранники с системой соединенных тяжей.

Замкнутая ячеистая структура молекул пенопласта обеспечивает его высокие теплоизоляционные показатели (табл.) [3].

Кристаллическая фаза полимеров способствует повышению твердости, прочности, модуля упругости и других механических характеристик, одновременно снижая гибкость молекул. При реакции полимеризации происходит многократное присоединение молекул к активным центрам в растущей молекуле полимера. Условие полимеризации меняет месторасположение молекул, структуру молекул. Реакцией полимеризации можно получить полипропилен с атактической структурой, синдиотактической и изотактической структурой молекул. Свойства атактической структуры (рис. 5): высокая текучесть, относительная прочность, низкий модуль упругости, значительная обратимая деформация, низкая остаточная деформация после снятия нагрузки, хорошие амортизирующие характеристики [2].

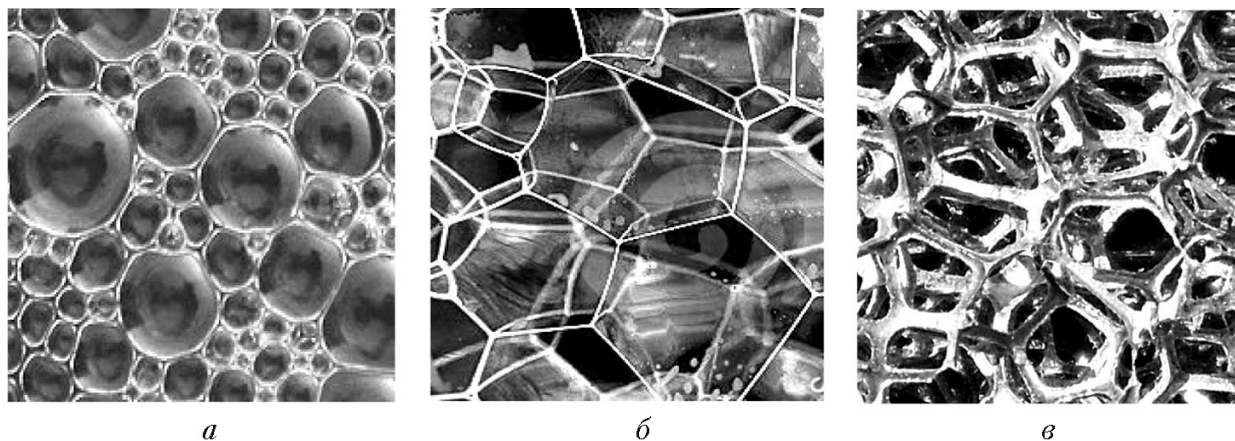


Рис. 4. Морфология пенопластов

Таблица

Технические характеристики теплоизоляционных пенополимеров

Материал	Толщина, мм, соответствует $R=1,2 \text{ м}^2$ ($^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$)	Теплопроводность, λ ($\text{Вт}/\text{м}^{\circ}\text{К}$)	Плотность, ρ ($\text{кг}/\text{м}^3$)	Рабочая температура, $^{\circ}\text{C}$	Паропроницаемость, $\text{Мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$
Пенопласт	60	0,05	60	-60... +75	0,23
Пенополиуретан	30	0,025	40–75	-100...+150	0,04–0,05
Пенополистирол (экструзионный)	36	0,03	30–65	-50...+75	0,015
Пенополиэтилен	54	0,045	35	-60...+100	0,001

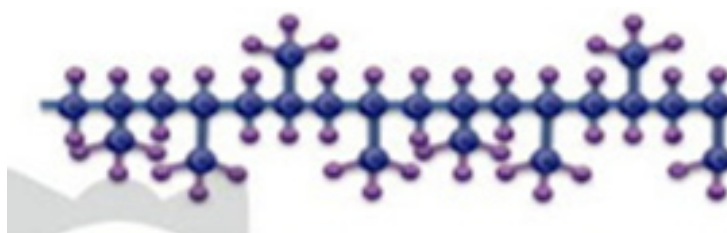


Рис. 5. Атактическая структура молекул полипропилена

Наилучшим по качеству полипропиленом является кристаллический полипропилен синдиотактической и изотактической структуры (рис. 6, 7).



Рис. 6. Синдиотактическая структура молекул полипропилена



Рис. 7. Изотактическая структуры молекул полипропилена

Нужно отметить, что в состав полимеров входят стирол и фенол – пары этих химических загрязнителей оказывают раздражающее действие на слизистые оболочки, могут вызывать головную боль [4]. Средний уровень содержания паров стирола в помещениях, выделяемых из теплоизоляционных материалов, не должен превышать значение ПДК, равное $0,032 \text{ мг/м}^3$.

Полипропилен имеет широкое практическое применение при создании различных теплоизоляционных материалов. Плотность пенополистирола зависит от количества газообразователя или вспенивающего

агента. Полипропиленовые волокна выдерживают без изменения механических свойств нагрев до $105 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 120 ч. Благодаря применению современных технологий получения возможно провести полное обновление отработанного материала без потери его первоначальных свойств.

Литература

1. Авдеев, Г. К. Исследования теплозащитных качеств ограждающих конструкций жилых домов, выполненных с использованием пластмасс : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Г. К. Авдеев ; Академия коммунального хозяйства им. К. Д. Памфилова. – Москва, 1966. – 18 с.
2. Айнбиндер, С. Б. Свойства полимеров в различных напряженных состояниях / С. Б. Айнбиндер – Москва : Химия, 1983. – 248 с.
3. Гуль, В. Е. Структура и механические свойства полимеров : учебник для химико-технологических вузов / В. Е. Гуль. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Лабиринт, 1994. – 367 с.
4. Ярцев, В. П. Физико-механические и технологические основы применения пенополистирола при дополнительном утеплении зданий и сооружений : учебное пособие / В. П. Ярцев, К. А. Андрианов, Д. В. Иванов. – Тамбов : ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 120 с.

T.I. Lohvinskia, E.R. Vudvud

Bendery Polytechnic branch of Taras Shevchenko PSU

ANALYSIS OF FACTORS THAT DETERMINE THE CHARACTERISTICS OF THERMAL INSULATION MATERIALS

This article discusses environmental aspects and the specific of physical processes that occur during the production of polymers. Based on the results of data processing, conclusions are drawn on what affects the thermophysical properties of polypropylene.

Thermal insulation materials, polypropylene, polymer, monomer, foams.



ЗНАЧЕНИЕ ОГРАД В ДИЗАЙН-КОДЕ ИСТОРИЧЕСКОГО ПОСЕЛЕНИЯ «ГОРОД ВОЛОГДА»

В статье рассматривается роль оград и палисадов в формировании дизайн-кода города Вологды, значение в утверждении идентичности исторического города. Автор сообщает об истории их развития, анализирует региональные особенности и проблемы, связанные с нарушением правил строительства оград в центре города.

Дизайн-код города, историческое поселение, Вологда, ограды и палисады, идентичность, историческая среда.

Введение

Дизайн-код города – в последние годы одна из самых актуальных тем в проектировании благоустройства российских городов. Дизайн-код – свод правил и рекомендаций по формированию городской среды, который предполагает формулирование обязательных для исполнения требований к созданию полноценной стилистически единообразной архитектурно-художественной среды. Это касается не только вывесок и наружной рекламы, как принято считать, – необходим комплексный подход к проектированию городской среды, предметное насыщение грамотно выполненным декоративным оформлением фасадов, гармоничным колористическим решением, элементами уличного освещения, малыми архитектурными формами и др.

Вологда – историческое поселение, камерный и уютный, сомасштабный человеку город, наибольший расцвет получил в конце XIX – начале XX веков. Таким образом, в проектировании дизайн-кода предпочтительна концепция создания атмосферы именно этого периода, поиск элементов, подчеркивающих преемственность традиций, идентичность и своеобразие нашего города. Решению этих задач могут послужить наиболее интересные элементы малых архитектурных форм – характерные для Вологды ограды и «резной палисад», воспетый Песнярами.

Отношение к заборам в современном градостроительстве двойственное: по мнению части архитектурной общественности, ограды – «урбанистический архаизм», символ разобщенности между людьми [4], «заборизация» убивает городское пространство.

У сторонников ограждений свои аргументы.

Ограды, ворота занимают важное место в композиции городских ансамблей улиц и площадей. Ограда может стать равноправным продолжением и дополнением архитектурной композиции улицы. С помощью оград можно придать единообразие разнящимся по своему внешнему виду постройкам, выходящим фасадом на улицу. Ограды – один из самых выразительных элементов городского оборудования, придающих характер историчности древнему городу.

Историко-культурный код города

По своей структуре город Вологда – продукт классицистической эпохи: он создан по екатерининскому регулярному плану и с XIX века застраивался в соответствии с жесткой геометрически правильной сеткой улиц. В эпоху классицизма ограды – элемент, организующий, упорядочивающий городскую застройку. Вологда в силу доступности строительного леса исторически была деревянной, как следствие – требование противопожарных разрывов между домами. И, как это было предписано на Руси еще в XV веке «Законом градским», здесь сложилась периметральная пунктирная – с «прозорами» – застройка («Закон градский, глава 49, раздел (грань) 38») [1]. Ориентация объемов деревянных зданий – преимущественно узким фасадом, перпендикулярно улицам. Городские усадьбы исторически огораживались высокой сплошной оградой обязательно в створе с уличными фасадами, по линии застройки или даже вглубь на одно окно, перед самым фасадом разбивали палисадник, обеспечивая таким образом приватность своего жилья (рис. 1).

В 1811 г. Министерством внутренних дел было опубликовано законодательное постановление: «Собрание фасадов, Его Императорским Величеством Высочайше апробованных для заборов и ворот к частным строениям в городах Российской Империи». Согласно ему усадебные участки огораживались глухими высокими деревянными оградами по линии застройки, изолируя хозяев от внешнего мира (рис. 1). В том же 1811 году Министерством внутренних дел было опубликовано, среди прочих, еще одно интересное для нас законодательное постановление, а именно: (Июля 1 – 24703) «О фасадах для ворот и заборов»: «Утвердив фасады для заборов и ворот к частным в городах строениям, Я Повелеваю вам, потребное число экземпляров сих фасадов, для производства впредь по оным строений на том же точно основании, как предписано о фасадах для частных зданий, разослав к Начальникам Губерний, истребовать за напечатание и рассылку оных по семнадцати рублей по пятидесяти копеек за каждый экземпляр из доходов тех городов, для коих экземпляры сии посланы будут».

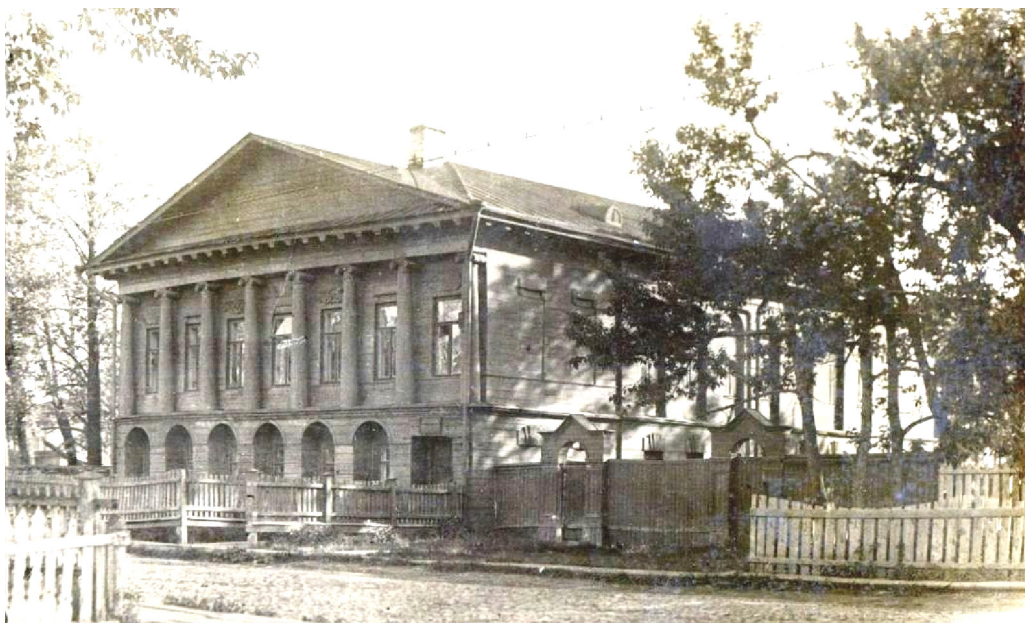


Рис. 1. Дом Левашова, ул. Герцена, 37. Фото первой половины XX века

В «прозорах» между деревянными домами мы видим сложную выразительную композицию: традиционные широкие въездные ворота и симметрично расположенные по обе стороны калитки, ведущие на территорию частной усадьбы (рис. 2). «Еще одна прелестная деталь сооружений Вологды – ворота, – писал Г.К. Лукомский в книге «Вологда в ее старине», – в которых арочки над калитками приподнимаются в виде загнутых кверху кокошников. Тонкой профилировки карнизом покрыты эти подобия фронтонов. На карнизах резьба очень мелкая, на арочках посередине – маленький замок. Створки калиток и ворот украшены ромбами. Но самое интересное – это мелкая орнаментировка и нарезанное зубчиками железо, заканчивающее профиль карниза...» [3].



Рис. 2. Калитка у дома по улице Воровского, 31, в Вологде. Фото из личного архива автора

Преподобный Пимен, настоятель подмосковного Николо-Угрешского монастыря, уроженец Вологды, писал: «...ворота крытые, с коньком и калиткою, на которой толстое кольцо, чтобы, ударяя им по бляхе, пришедший возвестил о своем приходе, и тут же веревочка, продернутая в дверь, посредством которой отдергивали щеколду и входили во двор, к ночи же запирались засовом» [2].

Ограды, согласно правилам, сложившимся с екатерининского времени, объединяли разрозненную, фрагментарную застройку в целостный ансамбль, формируя единый фронт улицы, подчиняясь при этом общим требованиям эпохи – застройка должна быть «сплошной фасадом», что возможно в камне, но не реализуемо в условиях деревянной Вологды.

Перед уличными фасадами устраивали в Вологде палисадники, которые выполняли условно оградительную функцию: они служили для украшения и зонирования территории (рис. 1). Ограды и палисадники четко артикулировали границы домовладений, что актуально в нашем климате с зимними сугробами.

Ограда – средовой объект

В промежутках между домами строились высокие заборы, их высота 1,80–2,00 м. Подавляющее большинство – глухие деревянные ограды. Они защищали и от ветра, иногда между досками оставлялись узкие щели или выполнялась незатейливая пропильная резьба: такой забор регулирует и уменьшает силу ветра лучше, чем сплошной забор, вдоль которого возникают вихри.

Элементы благоустройства перед фасадом являются «визитной карточкой» хозяина дома. В палисадниках всегда высаживались цветы или декоративно-цветущие кустарники (сирень, чубушник) – красивые как со стороны улицы, так и из окон дома – для хозяев. Вокруг палисадников устанавливали ограждения из штакетника с пропильной резьбой – знаменитый вологодский резной палисад высотой до 80 см.

Такие элементы благоустройства создавали систему защиты приватности жилого дома: тротуары –

общественное пространство улицы, палисадники обеспечивали полуприватность среды; непосредственно у калитки или на самом крыльце – промежуток «in-between». Крыльца, что характерно для Вологды XIX – начала XX веков, выходили на улицу, не прятались за заборами, были доступны для посторонних. И, наконец, за высоким забором – двор, частное пространство, замкнутое, интимное, защищенное от посторонних глаз. Ограда отделяет частную жизнь от внешнего мира и создает камерность дворового пространства.

Снесли ограды повсеместно в 1960-е годы в период «борьбы с оградами». Но с конца XX века в исторической части Вологды стали вновь появляться эти элементы предметного наполнения городской среды. Лозунг «лихих 90-х» – «Мой дом – моя кре-

пость», и с этим убеждением владельцы частных домов стали строить высоченные заборы перед своими фасадами – и за городом, и в историческом центре Вологды, при этом нарушая правила традиционного благоустройства (рис. 3).

В XXI веке слово *палисад* опять вернулось в наш обиход.

В исторической части города стали вновь появляться элементы предметного наполнения городской среды (рис. 4). Особое значение для исторической застройки имеет восстановление традиционно используемых элементов малых архитектурных форм: оград и палисадов, исчезнувших в XX веке практически во всех домовладениях в связи с расширением проезжей части улиц.



Рис. 3. Примеры дисгармоничной среды в исторической части города Вологды



Рис. 4. Пример достоверной реконструкции среды исторической части города.
Дом № 2 по улице Ленинградской



Рис. 5. Примеры достоверной реконструкции среды исторической части города (Советский проспект, фрагмент улицы Ленинградской)

Заборы – это хорошо или плохо?

В конце XX века появилась тенденция полностью отделяться от внешнего пространства глухим высоким забором, основная функция которого – защита. Ограды выходят перед фасадами, что искажает образ и геометрию регулярно организованного города, ритм застройки. Важен эмоционально-психологический аспект: загрязнение визуальной среды сплошными глухими заборами вдоль тротуаров угнетает горожанина. Таким же образом искажена атмосфера великолепного фрагмента исторического города – квартал с улицей Засодимского. Глухие заборы, окружившие жилые дома по этой улице, сократили пространство вокруг церквей – Варлаама Хутынского и Ильи Пророка, – замкнули перспективы. Стало тесно, недружелюбно и неприветливо.

Достаточно долго не существовало критериев допустимых норм при строительстве оград. Сейчас действует Приказ Минкультуры России от 12.07.2016 № 1604 «Об утверждении порядка включения населенного пункта в перечень исторических поселений федерального значения, утверждения его предмета охраны, границ территории и требований к градостроительным регламентам в указанных границах», устанавливающий общие принципы требований к градостроительным регламентам. В Приказе прописаны требования к предельным параметрам объектов капитального строительства с учетом, в том числе, ограничений «характера и габаритов оград, заборов, ворот, дорожного покрытия и малых форм». Постановлением правительства Вологодской области от 24.12.2018 № 1200 утвержден предмет охраны, границы территории и требования к градостроительным регламентам в границах территории исторического поселения регионального значения «город Вологда». Но пока ничто не мешает этим заборам существовать в самых туристически привлекательных местах исторической Вологды.

Необходима борьба за чистоту визуальной среды: найти грань между оградой как частью городской среды, организующей ее, или, напротив, загрязняющей; между оградой как частью художественно-эмоционального восприятия среды, украшающей ее,

или, напротив, уничтожающей это пространство. Следует признать сооружение оград перед фасадами недопустимым и сами эти ограды – подлежащими сносу (рис. 3).

В заключение скажем, что обязательным условием сохранения архитектурно-исторической среды является сохранение ее предметного наполнения – именно исторические ограды с воротами и затейливыми калитками и палисады являются визитной карточкой Вологды (рис. 5).

Литература

1. Алферова, Г. В. «Кормчая книга» как ценнейший источник древнерусского градостроительного законодательства: Ее влияние на художественный облик и планировку русских городов / Г. В. Алферова. – Текст : электронный // Византийский временник. – РАН. – 1973. – Т. 35. – Приложение: Кормчая книга. Закон градский, гл. 49, грань 38: О построении новых домов и об обновлении ветхих и о других предметах, л. 695 (изд. 1650 г.) / перевод Е. Н. Бируковой при участии автора и консультации М. В. Щепкиной. – URL: <http://vremennik.biz/opus/BB/35/52232> (дата обращения: 15.03.2021).

2. Вологда в минувшем тысячелетии: памятники истории и культуры / Всероссийская общественная организация «Русское географическое общество», Администрация города Вологды ; [Р. П. Биланчук, М. В. Васильева, И. Б. Воронин и др. ; редколлегия : А. В. Суворов (главный редактор) и др.]. – Вологда : Древности Севера, 2019. – URL: <https://www.booksite.ru/ancient/history/min/ uvs/hee/10.htm> (дата обращения: 08.10.2020). – Текст : электронный.

3. Лукомский, Г. К. Вологда в ее старине./ Г. К. Лукомский. – Репринт. воспроизведение изд. 1914 г. – Вологда : Компьютер, информ.-изд. служба, 1991. – 364 с.

4. Савчук, В. В. Забор – третья беда России / В. В. Савчук. – Текст : электронный // Новое литературное обозрение. – No. 123 НЗ (1/2019). – URL: https://www.nlobooks.ru/magazines/neprikosnovennyu_zapas/123_nz_1_2019/ (дата обращения: 10.03.2021).

E.M. Nikitina
Vologda State University

**SIGNIFICANCE OF FENCES IN DESIGN CODE OF VOLOGDA
HISTORICAL SETTLEMENT**

The article examines the role of fences and palisades in the formation of the design code of the city of Vologda, the importance in establishing the identity of the historic city. The author tells about the history of their development, analyzes regional peculiarities and problems associated with violations of the rules of fences construction in the center of the city.

Design code of the city, historical settlement, Vologda, fences and palisades, identity, historical environment.



Л.И. Огородов¹, В.А. Шапкина²

¹*Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого,*

²*Вологодский государственный университет*

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ПРИ ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ ДВУХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПОЛИМЕРНОЙ ОСНОВЕ С ДИСПЕРСНЫМ АРМИРОВАНИЕМ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Приводятся результаты экспериментального исследования и прогнозирования длительной прочности при одноосном растяжении двух композиционных материалов на полимерной основе с дисперсным армированием при повышенных температурах.

Длительная прочность, одноосное растяжение, композиционные материалы на полимерной основе с дисперсным армированием, повышенная температура.

Исследования композиционных материалов приводят к необходимости изучения и прогнозирования длительной прочности композитов на основе полимеров с дисперсным армированием. В продолжение работ [1–5] в данной статье приводятся сведения по длительной прочности при одноосном растяжении композиционных материалов К-211-2 и К-18-36 на основе фенолформальдегидной смолы с дисперсным армированием древесной мукой и частицами каолина соответственно. Степень наполнения составляла 30–35 %. Образцы композитов прошли естественное старение при хранении 19 лет без доступа солнечного света в отапливаемом складском помещении. В ходе длительного статического нагружения плоских образцов (длина рабочей части 100 мм, ширина 25,4 мм и толщина 1 мм) на установке FPZ-100/1 поддерживались постоянными заданные значения условных напряжений и температуры (20 °С, 60 °С, 100 °С).

Статистическая обработка результатов опытов (два образца композита К-18-36 прошли расчетную базу при испытаниях, эти два результата не учитывались при статистической обработке) позволила определить кривые 1–3 длительной прочности композитов (50 % вероятность разрушения), показанные на рисунке. Коэффициенты корреляционного уравнения длительной прочности композитов приведены в таблице 1 ($\sigma = A - B \lg \tau$).

Воспользуемся результатами опытов на кратковременное нагружение образцов композитов при скорости деформирования 2 мм/мин в условиях температур 60 °С и 100 °С для прогнозирования параметров их длительной прочности. По данным таблицы 1, а также данным работы [6] и целого ряда работ других авторов, можно видеть, что повышение температуры образцов полимерных композитов сказывается в основном на коэффициенте А корреляционного уравнения длительной прочности. Введем в обозначения

коэффициентов А и В индексы 1, 2 и 3 при температурах 20 °С, 60 °С и 100 °С соответственно.

Учитывая 70 % снижение кратковременной прочности композита К-18-36 при температуре 100 °С по сравнению с прочностью при 20 °С (табл. 1 и 3 в [5]) прогнозируем (относительно $A_1=36,07$ МПа) значение коэффициента $A_3=10,82$ МПа. Сравнивая прогнозируемое и экспериментальное (табл. 1) значение A_3 , можно утверждать приемлемую точность прогноза. Коэффициент B_3 в этом случае принимаем равным 1,84 МПа и получаем прогнозируемую кривую длительной прочности композита К-18-36 при 100 °С (линия 4 на рисунке).

В свою очередь, используя экспериментально полученные для композита К-18-36 значения $A_1=36,07$ МПа и $A_3=10,82$ МПа, $B_1=1,84$ МПа и $B_3=1,60$ МПа с учетом имеющихся сведений о кратковременной прочности композита при соответствующих температурах, получаем две прогнозируемые кривые длительной прочности при 60 °С (линии 5 и 6 на рисунке, $A_2=26,69$ МПа, $B_2=1,84$ МПа и $A_2=26,42$ МПа, $B_2=1,60$ МПа).

Для прогноза длительной прочности композита К-211-2 при растяжении в условиях температур 60 °С и 100 °С использовались два варианта расчета значений коэффициента А. В первом варианте (как сделано выше для композита К-18-36) на основе экспериментально определенного значения $A_1=51,40$ МПа высчитывались значения A_2 и A_3 с учетом данных о снижении кратковременной прочности – 52 % при 60 °С и 79 % при 100 °С (табл. 3 в [5]). Во втором варианте использовались экспериментальные значения коэффициента А корреляционного уравнения кривых длительной прочности композита К-18-36 при температурах 60 °С и 100 °С. Значения A_2 и A_3 для композита К-211-2 определялись с использованием соотношений ($C_5=0,8$ и $C_5=0,86$) между пределами кратковременной прочности композитов при скорости деформирования 2 мм/мин и соответствующих температурах (табл. 1 и 4 в [5]). Расчетные значения коэффициента А приведены в таблице 2.

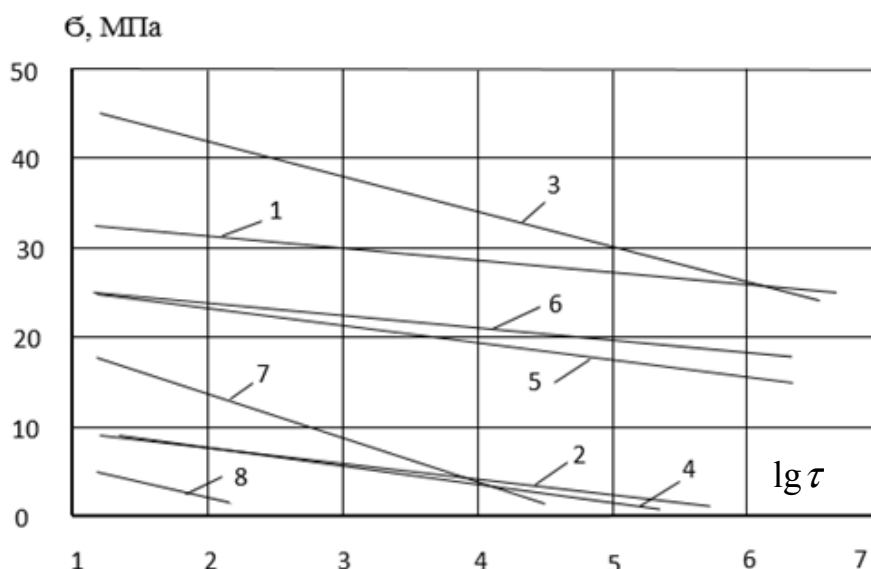


Рис. Экспериментальные и прогнозируемые кривые длительной прочности композитов К-18-36 и К-211-2 при температурах 20 °С, 60 °С, 100 °С

Таблица 1

Результаты статистической обработки данных испытаний длительной прочности композитов при осевом растяжении

Материал	Температура, °С	№ на рис.	Коэффициенты корреляционного уравнения		Коэфф. корреляции	Среднее квадратическое отклонение	Макс. отклонение
			А, МПа	В, МПа			
К-18-36	20	1	36,07	1,84	0,77	0,54	4,55
	100	2	11,21	1,60	0,99	0,31	0,37
К-211-2	20	3	52,87	4,74	0,92	2,38	4,34

Таблица 2

Расчетные значения коэффициента А корреляционного уравнения кривой длительной прочности композита К-211-2 при растяжении

Вариант расчета	А ₂ , МПа (при 60 °С)	А ₃ , МПа (при 100 °С)
1	24,67	10,79
2	21,14	9,54

На рисунке показаны прогнозируемые кривые 7 и 8 длительной прочности композита К-211-2 при растяжении в условиях температур 60 °С и 100 °С. Значения В₂ и В₃ для композита К-211-2 брались равными 4,74 МПа. Длительное сопротивление композита К-211-2 одноосному растяжению при температуре 100 °С практически отсутствует (линия 8 на рисунке).

Полученные экспериментальным и расчетным путем кривые длительной прочности могут быть использованы для расчета меры поврежденности и ресурса элементов конструкций из композитов К-211-2 и К-18-36 при нестационарных режимах нагружения в условиях повышенных температур. С учетом результатов работы [7] можно рекомендовать к применению кинетическое уравнение повреждений наследственного типа.

Литература

1. Павлов, П. А. Сопротивление деформированию и разрушению композитных материалов с дисперсным армированием / П. А. Павлов, Ю. Я. Логинов,

Л. И. Огородов // Вестник машиностроения. – 1991. – № 10. – С. 39–42.

2. Огородов, Л. И. Прочность мелкодисперсно наполненных композитных материалов на основе фенопласта при растяжении / Л. И. Огородов // Прочность и устойчивость инженерных конструкций : Межвузовский сборник научных трудов. – Барнаул, 1991. – С. 66–71.

3. Огородов, Л. И. Результаты исследования сопротивления деформированию и разрушению ряда полимерных композитных материалов / Л. И. Огородов // Механика композитных материалов. – 1994. – № 6. – С. 771–780.

4. Огородов, Л. И. Сопоставление механических характеристик композитов на полимерной основе с органическими и минеральными армирующими частицами / Л. И. Огородов // Технология. Серия: Конструкции из композитных материалов. – 1996. – № 2. – С. 57–60.

5. Огородов, Л. И. Влияние температуры и скорости деформирования на механические характеристики

при одноосном растяжении композиционных материалов на основе фенолформальдегидной смолы с дисперсным армированием древесной мукой и частицами каолина / Л. И. Огородов // Научные труды I Международного Семинара «Актуальные проблемы прочности» имени В. А. Лихачева. – Новгород : НГУ, 1997. – Т. I, ч. 2. – С. 241–246.

6. Павлов, П. А. Совершенствование расчета механического ресурса конструкционных элементов из

полимерных материалов / П. А. Павлов, Л. И. Огородов. – Вологда : ВОПИ, 1991. – 45 с.

7. Павлов, П. А. Процесс повреждений и разрушение стохастически армированных полимерных композитов. I. Анализ моделей и экспериментальных данных при нестационарном пропорциональном нагружении / П. А. Павлов, Л. И. Огородов // Механика композитных материалов. – 1993. – № 6. – С. 755–764.

L.I. Ogorodov¹, V.A. Shapkina²

¹Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University,

²Vologda State University

RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES AND PREDICTION OF LONG-TERM STRENGTH AT UNIAXIAL TENSION OF TWO POLYMER-BASED COMPOSITE MATERIALS WITH DISPERSED REINFORCEMENT AT INCREASED TEMPERATURES

The results of an experimental study and prediction of the long-term uniaxial tensile strength of two polymer-based composite materials with dispersed reinforcement at elevated temperatures are presented.

Long-term strength, uniaxial tension, polymer-based composite materials with dispersed reinforcement, high temperature.



ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВТОРИЧНОГО ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА

В данной статье рассмотрены деформационные свойства поливинилхлорида (ПВХ), полученного при вторичном использовании – рециклинге ПВХ-отходов (технологических оборотных). Статья содержит сведения о критериях испытаний деформационных свойств композиционных материалов, при которых скорость деформирования постепенно ступенчато увеличивается. Предложены технологические параметры, учитывающие данные исследований прочности от скорости деформирования и факт линейно-вязкой чувствительности вторичного ПВХ.

Полимеры, поливинилхлорид, рециклинг, скорость деформирования, технологические параметры.

В конструкционных полимерах, широко применяемых в современном строительстве, при нагрузках, приложенных во время их эксплуатации, одновременно развиваются обратимые и необратимые деформации. При этом конформация макромолекул полимера и контакты между ними сопровождаются принудительными изменениями. С большей скоростью, постепенно во времени, развивается обратимая высокоэластическая деформация. Общий подход можно описать известным графиком зависимости нормального напряжения (σ) от деформации (D) (рис.) [1].

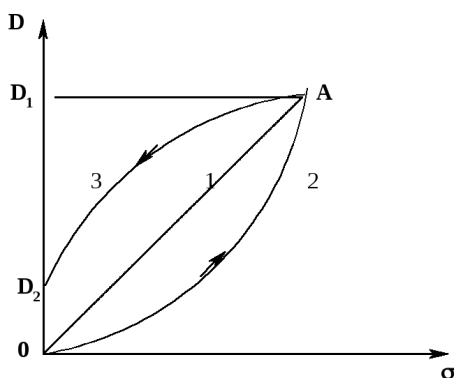


Рис. Развитие обратимой высокоэластической (3) и необратимой (2) деформаций полимера

Для более точного наблюдения за процессами деформирования корректны испытания, при которых скорость деформирования постепенно ступенчато увеличивается. Такие испытания целесообразно использовать для оценки сверхпластичности полимеров, при этом в начальный период испытания при деформации с малыми скоростями структурные изменения обуславливают сильное деформационное упрочнение или разупрочнение.

Известное выражение Гуля (1) [2] – принципиальное описание вязких материалов, дающее зависимость разрушающего напряжения от скорости деформирования, – дает возможность перейти от качественного обсуждения физических аспектов сверхпластичности к количественному описанию процессов сверхпластической деформации. Это способствует не только бо-

лее рациональному использованию эффекта в технологических процессах, но и расширяет общие представления о поведении вязкопластических сред.

При ступенчатом увеличении скорости деформирования необходимо определить механические характеристики полимера, далее по формуле (1) [2] можно найти значение деформационного параметра – скоростную чувствительность n :

$$\sigma_p = av^n, \quad (1)$$

где σ_p – предел прочности, v – скорость деформирования, a – структурный параметр и n – параметр скоростной чувствительности полимера.

В данной работе определяются деформационные свойства поливинилхлорида (ПВХ), полученного при вторичном использовании – рециклинге ПВХ-отходов (технологических оборотных). Состав материала состоит из 70–80 % вторичного ПВХ и 30–20 % композиции, включающей первичный ПВХ, пластификатор, стабилизатор, наполнитель и краситель [3].

Для определения обратимой и необратимой деформации авторами были проведены испытания партии образцов ПВХ на растяжения при скоростях деформирования от 0,08 до 100 мм/мин. Эксперимент был проведен в соответствии с ГОСТ 11262-80 «Пластмассы. Метод испытания на растяжение». Основные характеристики, получаемые с помощью испытания на растяжение при различных скоростях деформирования, – предел прочности при растяжении σ (МПа) и относительную скорость деформации ε (%) – определяли по формулам:

$$\sigma = Fi Li / W,$$

$$\varepsilon = B \cdot vi / Li,$$

где W – объем рабочей части образца, мм³;
 vi – скорость деформирования, мм/мин;
 Fi – разрушающая нагрузка на образец, Н;
 Li – текущая длина образца, мм,
 B – время до разрушения образца, мин.

Обобщенные результаты эксперимента [3], предел прочности при растяжении и относительная деформация, а также качественные параметры изучаемого вторичного ПВХ-материала представлены в таблице.

Механические характеристики ПВХ при разных скоростях деформирования

Скорость деформирования, V мм/мин	0,08	0,4	2,0	4,0	10,0	20,0	40,0	50,0	100,0
Предел прочности при растяжении σ_p , МПа	56,1	53,1	57,3	65,0	69,7	62,9	69,3	71,5	65,3
Относительная деформация ϵ_p , %	5,7	5,4	6,0	7,3	9,2	6,5	8,9	8,7	5,9
Структурный параметр, a	1,78	1,73	1,69	1,71	1,75	1,79	1,80	1,75	1,78
Параметр скоростной чувствительности, n	0,028	0,03	0,031	0,027	0,034	0,029	0,032	0,029	0,035

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что параметр скоростной чувствительности напряжения n вторичного ПВХ при большом диапазоне скорости деформирования от 0,08 до 100 мм/мин имеет значения от 0,028 до 0,034, т.е. меняется незначительно. Это дает возможность утверждать что созданный авторами вторичный ПВХ-материал является линейно вязким.

Структурно-чувствительный и термоактивируемый параметр a , который связан со сдвиговой вязкостью материала, также имеет стабильные значения, меняясь в диапазоне от 1,69 до 1,89.

Учитывая данные исследований прочности от скорости деформирования и факт линейно-вязкой чувствительности вторичного ПВХ предложены технологические параметры: режим прессования и режим вальцевания, необходимые при получении различных изделий. Предварительное прессование при

давлении 5 МПа в течение 5–10 мин, окончательное прессование при давлении 20–25 МПа в течении не более 3 минут [3].

Литература

1. Аскадский А. А. Деформация полимеров : учебник / А. А. Аскадский. – Москва : Химия, 1973. – 448 с.
2. Попова, М. Н. Физико-химия и методы исследования полимерных материалов : учебное издание / М. Н. Попова, А. А. Аскадский, В. И. Кондрашенко. – Москва : АСВ, 2015. – 408 с.
3. Попова, М. Н. Производство вторичного поливинилхлорида и исследование его прочностных и деформационных свойств / М. Н. Попова, А. А. Аскадский, Е. В. Соловьева // Сборник научных трудов ИСА. – Москва : МГСУ, 2008. – С. 30–32.

E.V. Solovyeva, A.N. Surikova
Vologda State University

DEFORMATION PARAMETERS OF THE SECONDARY POLYVINYL CHLORIDE

This article discusses the deformation properties of polyvinyl chloride (PVC) obtained during secondary use - recycling of PVC waste (process recycling). The article contains information about the criteria for testing the deformation properties of composite materials, in which the rate of deformation gradually increases. Technological parameters that take into account the data of strength studies on the rate of deformation and the fact of the linear-viscous sensitivity of secondary PVC are proposed.

Polymers, polyvinyl chloride, recycling, deformation rate, technological parameters.



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ПГМ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ

Данная работа посвящена исследованию влияния химических противогололедных материалов на морозоустойчивость конструкции автомобильных дорог. Приведены методики и технологии введения в грунт солевых добавок. Отражена подготовка грунта, обработанного солевыми добавками, для испытания на морозное пучение. Исследована кинетика процессов морозного пучения эталонного грунта и грунта, обработанного солевыми добавками. Исследовано влияние вида и концентрации солевой добавки на степень морозного пучения грунтов. Выявлены коррелятивные связи влияния химических противогололедных добавок на показатели морозного пучения грунтов.

Грунты, дорожная одежда, химический стабилизатор, укрепление грунтов, морозное пучение, прочность, водостойкость.

В настоящее время химические противогололедные материалы в виде песчано-соляных смесей, рассолов и чистых химических реагентов повсеместно используются в практике дорожного хозяйства Российской Федерации. Исследования, выполняемые в связи с их применением, чаще всего посвящены конкретным характеристикам понижения температуры замерзания, а также экологическим вопросам воздействия этих материалов на окружающую среду. Что касается их влияния на морозоустойчивость дорожной конструкции, то эти сведения в технической литературе отсутствуют. Целью данной работы является исследование влияния химических противогололедных материалов на морозное пучение грунтов земляного полотна автомобильной дороги.

Экспериментальные исследования с целью определения влияния противогололедных хлористых добавок, применяемых на автомобильных дорогах Вологодской области, на морозное пучение грунтов земляного полотна включали разделы:

1. Определение степени засоленности грунта земляного полотна на участке дороги с применением противогололедных добавок.
2. Определение пучинистых свойств грунтов отобранных проб.
3. Определение влияния засоленности на пучинистые свойства искусственно засоленных грунтов.

По первому разделу объектом исследований служила автомобильная дорога III категории регионального значения, на которой уже более 10 лет в качестве противогололедной добавки используется природный соляной рассол.

На выбранном участке дороги в трех створах, расположенных друг от друга на расстоянии 1–1,5 км, отбирались пробы грунта земляного полотна с глубины 1,8–2,0 м. По ГОСТ 25100-2020 этот грунт классифицировался как суглинок тугопластичный легкий пылеватый. Лабораторные испытания показали, что эти пробы имели засоленность 0,07, 0,02, 0,06 %.

Второй этап исследований включал испытание на морозное пучение трех образцов, изготавливаемых из пробы с засоленностью 0,06 %, а также этого же грунта после его рассоления. Работы по рассолению грунта включали высушивание грунта, его измельчение и заливку пятикратным объемом воды. В этом состоянии грунт выдерживали две недели, затем сливали воду и готовили грунт для дальнейших испытаний.

Испытание грунта на морозное пучение выполнялось на приборах конструкции Вологодского государственного университета. Подробнее сведения об этих приборах приведены в статьях авторов [3–9]. Методика проведения этих испытаний принималась в соответствии с рекомендациями ГОСТ 28622-2012.

Информация о засоленных грунтах посвящена рассмотрению вопросов:

- использования искусственного засоления грунта в качестве противопучинного мероприятия в фундаментостроении;
- использования искусственного засоления для комплексного выполнения земляных работ в зимнее время (разработка, транспортировка и укладка с уплотнением грунта);
- изучения характеристик засоленного грунта (в том числе мерзлого) в естественном залегании и их распространения.

Так, для засоления грунтов используются эвтектические растворы хлористого натрия, магния и кальция с температурой замерзания соответственно равной $-21,2$ °С, $-33,6$ °С и -55 °С. Помимо понижения температуры замерзания хлористые соли дают значительный эффект по снижению пучения. Это направление широко используется в фундаментостроении. Для засоления обычно используют как кристаллическую безводную соль, так и солевые растворы. Последние не рекомендуется применять в сильноувлажненных грунтах, во избежание вымывания этих солей из грунта.

При местном засолении грунта возникает диффузия солей из области большей в область меньшей концентрации. Через некоторое время после засоления происходит уменьшение концентрации грунтового раствора в пределах области местного засоления. Скорость проникновения водорастворимых солей в грунт может быть различна. По данным Печорского научно-исследовательского института, диффузия солей в талые связные грунты происходит со скоростью 2–3 см за 10 дней, а в мерзлые – в два раза медленнее.

Как установлено С.Б. Уховым [1] при отсыпке слоями в 30 см и послойном засолении суглинка хлористым натрием его засоление будет практически равномерным через 70–80 дней. В мерзлом суглинке при температуре от -1,4 до -4,8 °С равномерное засоление будет достигнуто через 80–100 дней.

Исследования о влиянии противогололедных добавок на окружающую среду показали, что использование как пескосоляной смеси, так и рассолов приводит к накоплению в грунтах химических элементов и солей. Отмечается изменение их концентрации в различные периоды времени.

К недостаткам метода засоления грунта также относят увеличение морозоопасности грунта при его рассолении, ускорении коррозии металлических конструкций, а в некоторых случаях – разрушение грунтово-битумных покрытий.

Результаты выполненных испытаний представлены на графиках деформации морозного пучения – время для трех образцов грунта из отобранной пробы на рисунке 1, а для рассоленного грунта этой пробы – на рисунке 2.

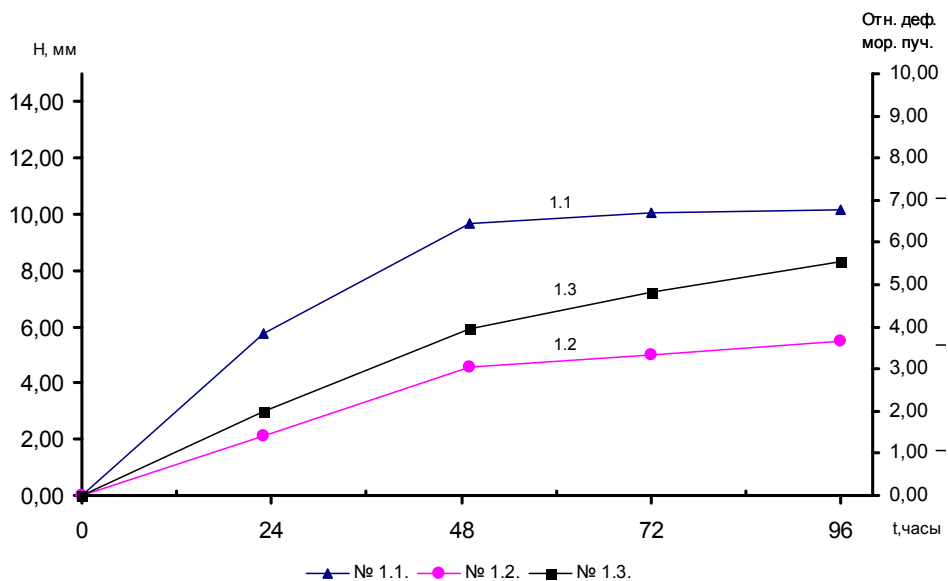


Рис. 1. График зависимости деформации морозного пучения от времени для отобранного образца грунта

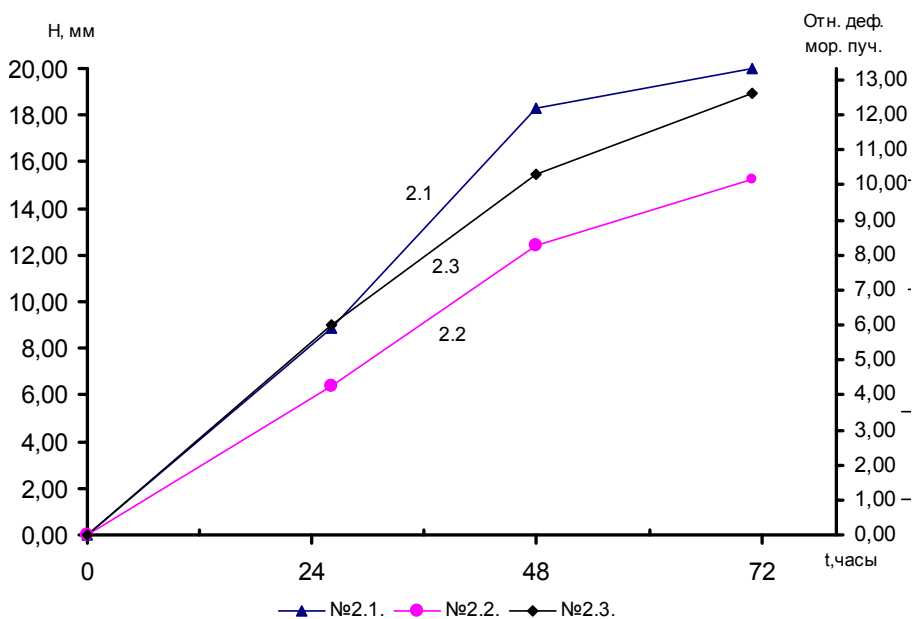


Рис. 2. График зависимости деформации морозного пучения от времени для рассоленного образца грунта

Справа на графике приведена шкала относительной деформации морозного пучения для стадии полного промерзания образца и классификация степени морозного пучения по ГОСТ 25100-2020 [2]. Эти данные показывают, что при 2 рассолении грунта его пучинистые свойства повышаются. Так, среднее значение относительной деформации увеличилось более чем в два раза, а степень морозного пучения со среднепучинистого повысилась до чрезмернопучинистого.

Третий этап исследований включал подготовку двух типов (глинистого и песчаного) искусственно засоленных грунтов и испытание их на морозное пучение. Эти грунты классифицировались как супесь пылеватая и мелкий песок. Для засоления грунтов использовалась соль хлористого натрия. Из каждого вида грунтов изготавливалось по два образца незасоленного грунта и с засоленностью 0,075 % и 0,15 %.

Пример графика нарастания деформации морозного пучения во времени для незасоленного супесчаного грунта и с засоленностью 0,075 % приведен на рисунке 3.

По результатам выполненных испытаний полученные значения относительной деформации мороз-

ного пучения образцов и их классификация по степени морозного пучения приведены в таблице.

Из приведенных данных следует, что уже при значении засоленности, близком к тому, которое было установлено для глинистого грунта земляного полотна на дорогах, где используются противогололедные добавки, относительная деформация морозного пучения уменьшилась примерно в 3 раза.

При традиционной технологии нанесения противогололедных добавок на дорожное покрытие нет уверенности, что засоленность земляного полотна будет постоянной. В первую очередь это связано с применением песчано-соляных смесей, поскольку за счет диффузии солей будет происходить локальное засоление отдельных участков земляного полотна. Неравномерность засоления тела грунта земляного полотна обусловит неравномерность деформации дорожного покрытия, вызванную морозным пучением. Эти деформации могут привести к нарушению морозоустойчивости дорожной конструкции, даже если она была обеспечена расчетом для незасоленного грунта.

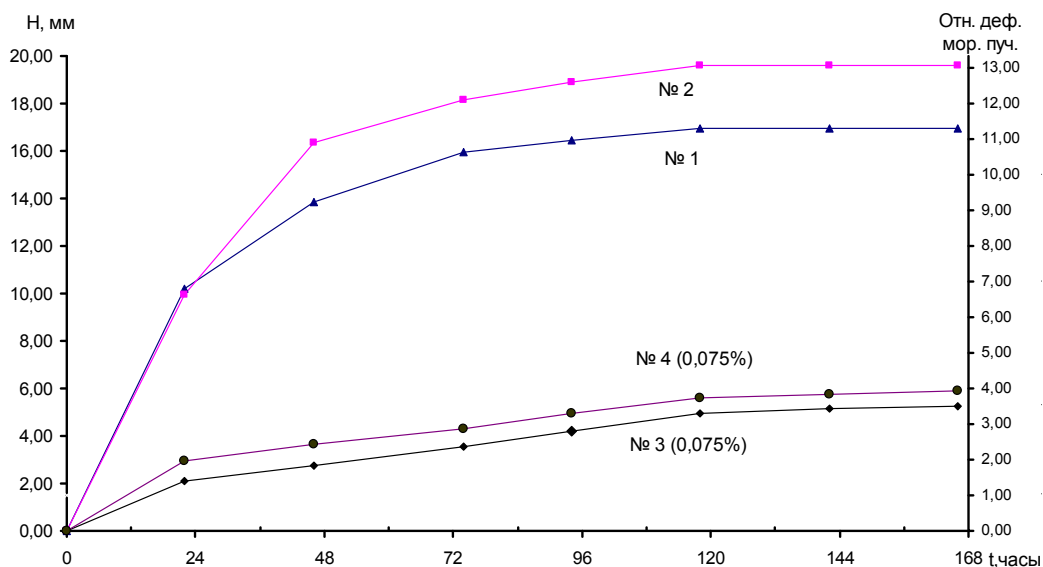


Рис. 3. График зависимости деформации морозного пучения: время для незасоленного грунта – образцы № 1, № 2, с засоленностью 0,075 % – № 3, № 4

Таблица

Значения относительной деформации морозного пучения образцов и их классификация

Вид грунта		ϵ_{fn} , %	$\epsilon_{fn\text{cp}}$, %	Степень морозного пучения по ГОСТ 25100-2020
Эталонный незасоленный грунт	Песчаный	1,73	1,85	Слабопучинистый
		1,97		
	Глинистый	11,29	12,18	Сильнопучинистый
		13,07		
Грунт с засоленностью 0,15 %	Песчаный	1,25	1,18	Слабопучинистый
		1,10		
	Глинистый	4,28	4,00	Среднепучинистый
		3,71		
Грунт с засоленностью 0,075 %	Песчаный	0,99	1,47	Слабопучинистый
		1,95		
	Глинистый	3,50	3,72	Среднепучинистый
		3,94		

В заключение следует отметить, что для решения проблемы, связанной с влиянием противогололедных добавок на морозоустойчивость дорожной конструкции, исследование необходимо продолжить в следующих направлениях:

1. Влияние вида добавки и способа нанесения ее на дорожное покрытие на величину и неравномерность засоленности грунта земляного полотна.

2. Определение характеристик морозного пучения для всех видов глинистых грунтов при засоленности, вызываемой применением противогололедных добавок.

3. Определение засоленности грунтов на стадии инженерно-геологических изысканий при реконструкции и ремонте автомобильных дорог.

Для рекомендации новых химических реагентов в качестве противогололедных добавок необходимо иметь результаты экспериментальных определений их влияния на пучинистые свойства грунта.

Литература

1. Ухов, С. Б. Об искусственном засолении суглинистых грунтов для строительства в зимнее время / С. Б. Ухов // Известия вузов. Серия: Строительство и архитектура. – 1959. – № 1.

2. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация : введен 2021-01-01. – Москва : ФГУП Стандартинформ, 2020. – 38 с.

3. Kagan, G. L. Effective Design Solutions in the Design of Shallow Foundations / G. L. Kagan, V. A. Shorin, A. Y. Velsovskij // IOP Conference Series: Materials

Science and Engineering. – 2018. – Vol. 463, Issue 2. – P. 022073.

4. Kagan, G. L. To the question of improvement the normative methodology for calculating the frost resistance of a road structure / G. L. Kagan, V. A. Shorin, A. Y. Velsovskij // E3S Web of Conferences. – 2018. – Vol. 463, Issue 2. – P. 022073.

5. Velsovskij, A. Y. Development of a New Method for Checking Frost Heave in Roads / A. Y. Velsovskij, V. Karpov, E. Smirnova // Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Civil Engineering. – 2015. – Vol. 168, Issue 5. – P. 49–54.

6. Shorin, V. A. A new diagnostic instrument and method for stabilization of heaving soil in the beds of structures / V. A. Shorin, G. L. Kagan, A. Y. Velsovskij // Soils Mechanics and Foundation Engineering. – 2008. – Vol. 45, Issue 4. – P. 114–147.

7. Shorin, V. A. Reliability of Indirect Methods for Evaluation of the Heaving Properties of Soils / V. A. Shorin, G. L. Kagan, A. Y. Velsovskij // Soils Mechanics and Foundation Engineering. – 2012. – Vol. 49, Issue 3. – P. 111–114.

8. Kagan, G. L. Effective Design Solutions in the Design of Shallow Foundations // G. L. Kagan, V. A. Shorin, A. Y. Velsovskij // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 463, Issue 2. – P. 022073.

9. Kagan, G. L. A method for construction of an energy-efficient ice floating pier in the Arctic using hardened ice / G. L. Kagan, L.R. Mukhametova, A. Y. Velsovskij // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 178. – P. 01064.

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

INVESTIGATION OF CHEMICAL PGMS EFFECT ON CHARACTERISTICS OF AUTOMOBILE ROADS BED

This work is devoted to the study of the influence of chemical deicing materials on the frost resistance of the road structure. Methods and technologies for introducing salt additives into the soil are presented. The preparation of the soil treated with salt additives for testing for frost heaving is reflected. The authors study the kinetics of the processes of frost heaving of reference soil and soil treated with salt additives. The influence of the type and concentration of the salt additive on the degree of frost heaving of soils is examined. Correlative relationships of the influence of chemical deicing additives on the indicators of frost heaving of soils are revealed.

Chemical deicing additives, saline soil, frost heaving of soils, highways, frost resistance.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Булавин Вячеслав Федорович,

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
bulavin35@mail.ru

Вельсовский Анатолий Юрьевич,

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автомобильных дорог Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
vau@vogu35.ru

Вихарева Наталья Николаевна,

старший преподаватель кафедры архитектуры и градостроительства Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
vikharevann@vogu35.ru

Вудвуд Екатерина Руслановна,

обучающийся Бендерского политехнического филиала ГОУ «ПГУ им. Т.Г. Шевченко» (Бендеры, Приднестровская Молдавская Республика)
katia-vudvud@mail.ru

Гудков Александр Геннадьевич,

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теплогазоводоснабжения Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
gudkovag@vogu35.ru

Карпов Денис Федорович,

старший преподаватель кафедры теплогазоводоснабжения Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
karpovdf@vogu35.ru

Колобова Светлана Владимировна,

старший преподаватель кафедры теплогазоводоснабжения Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
kolobovasv@vogu35.ru

Комиссарова Ирина Игоревна,

кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных дорог Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
IRIGKOM@mail.ru

Коппалина Анастасия Александровна,

обучающийся Института математики, естественных и компьютерных наук Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
ana.koppalina@yandex.ru

Корнеев Андрей Петрович,

старший преподаватель кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Белорусско-Российского университета (Могилев, Республика Беларусь)
AnKorn@tut.by

Кузнецов Дмитрий Васильевич,

обучающийся Инженерно-технического института Череповецкого государственного университета (Череповец, Россия)
kuznetcovdimitri@gmail.com

Левичев Евгений Владиславович,

обучающийся Инженерно-технического института Череповецкого государственного университета (Череповец, Россия)
evlevichev@gmail.com

Лохвинская Татьяна Ивановна,

кандидат технических наук, доцент Бендерского политехнического филиала ГОУ «ПГУ им. Т.Г. Шевченко» (Бендеры, Приднестровская Молдавская Республика)
lohvinskaia57@mail.ru

Никитина Елена Михайловна,

старший преподаватель кафедры архитектуры и градостроительства Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
elniki1@yandex.ru

Огородов Леонид Иванович,

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры гидравлики и прочности Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (Санкт-Петербург, Россия)
l.ogorodov@mail.ru

Павлов Михаил Васильевич,

кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоводоснабжения Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
pavlovmv@vogu35.ru

Петряшов Игорь Сергеевич,

обучающийся Института машиностроения, энергетики и транспорта Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
toolzz@yandex.ru

Попов Игорь Павлович,

старший преподаватель кафедры технологии машиностроения, металлорежущих станков и инструментов Курганского государственного университета (Курган, Россия)
ip.porow@yandex.ru

Порядина Татьяна Дмитриевна,

инженер-технолог ООО «Алькор» (Вологда, Россия)
tany-poryadin@yandex.ru

Сафронова Елизавета Сергеевна,

обучающийся Инженерно-строительного института Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
aig@vogu35.ru

Соловьева Екатерина Вячеславовна,

кандидат технических наук, доцент, и. о. зав. кафедрой архитектуры и градостроительства Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
evsvologda@mail.ru

Сурикова Алиса Николаевна,

старший преподаватель кафедры теплогазоводоснабжения Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
surikovaan@vogu35.ru

Степанов Александр Сергеевич,

кандидат технических наук, заведующий кафедрой технологии машиностроения Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
alex.stepanov@mail.ru

Суконщиков Алексей Александрович,

кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой автоматизации и вычислительной техники Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
avt@vogu35.ru

Уткин Дмитрий Евгеньевич,

обучающийся Института математики, естественных и компьютерных наук Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
keer22steam@gmail.com

Фролов Сергей Анатольевич,

заведующий лабораторией Института машиностроения, энергетики и транспорта Вологодского государственного технического университета (Вологда, Россия)
fsa84@bk.ru

Шапкина Вероника Андреевна,

кандидат педагогических наук, доцент кафедры автомобильных дорог Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
vrnk@bk.ru

Шорин Владимир Александрович,

доктор химических наук, профессор, профессор кафедры автомобильных дорог Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
ad@vogu35.ru

Якунина Валентина Алексеевна,

обучающийся Инженерно-технического института Череповецкого государственного университета (Череповец, Россия)
valentinayakuninaa@mail.ru

Яняк Сергей Владимирович,

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
tms@vogu35.ru

Яхричев Виктор Васильевич,

старший преподаватель кафедры технологии машиностроения Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
yahrichev@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Bulavin Vyacheslav Fyodorovich,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Vologda State University (Vologda, Russia)
bulavin35@mail.ru

Velsovsky Anatoly Yurievich,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Highways, Vologda State University (Vologda, Russia)
vau@vogu35.ru

Vikhareva Natalia Nikolaevna,

Senior Lecturer, Department of Architecture and Urban Planning, Vologda State University (Vologda, Russia)
vikharevann@vogu35.ru

Vudvud Ekaterina Ruslanovna,

Student of Bendery Polytechnic Branch of State Educational Institution PSU named after. T.G. Shevchenko (Bendery, Pridnestrovskaya Moldavskaya Respublika)
katia-vudvud@mail.ru

Gudkov Alexander Gennadievich,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply, Vologda State University (Vologda, Russia)
gudkovag@vogu35.ru

Karpov Denis Fyodorovich,

Senior Lecturer, Department of Heat and Gas Supply, Vologda State University (Vologda, Russia)
karpovdf@vogu35.ru

Kolobova Svetlana Vladimirovna,

Senior Lecturer, Department of Heat and Gas Supply, Vologda State University (Vologda, Russia)
kolobovasv@vogu35.ru

Komissarova Irina Igorevna,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Highways, Vologda State University (Vologda, Russia)
IRIGKOM@mail.ru

Koppalina Anastasia Alexandrovna,

Student of the Institute of Mathematics, Natural and Computer Sciences, Vologda State University (Vologda, Russia)
ana.koppalina@yandex.ru

Korneev Andrey Petrovich,

Senior Lecturer, Department of Electric Drive and Automation of Industrial Installations, Belarusian-Russian University (Mogilev, Republic of Belarus)
AnKorn@tut.by

Kuznetsov Dmitry Vasilyevich,

Student of the Engineering and Technical Institute of Cherepovets State University (Cherepovets, Russia)
kuznetcovdimitri@gmail.com

Levichev Evgeny Vladislavovich,

Student of the Engineering and Technical Institute of Cherepovets State University (Cherepovets, Russia)
evlevichev@gmail.com

Lokhvinskaya Tatiana Ivanovna,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Bendery Polytechnic Branch of the State Educational Institution PSU named after T.G. Shevchenko (Bendery, Pridnestrovskaya Moldavskaya Respublika)

lohvinskaia57@mail.ru

Nikitina Elena Mikhailovna,

Senior Lecturer, Department of Architecture and Urban Planning, Vologda State University (Vologda, Russia)

elniki1@yandex.ru

Ogorodov Leonid Ivanovich,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Hydraulics and Strength, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (St. Petersburg, Russia)

l.ogorodov@mail.ru

Pavlov Mikhail Vasilievich,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply, Vologda State University (Vologda, Russia)

pavlovmv@vogu35.ru

Petryashov Igor Sergeevich,

Student of the Institute of Mechanical Engineering, Energy and Transport, Vologda State University (Vologda, Russia)

toolzz@yandex.ru

Popov Igor Pavlovich,

Senior Lecturer, Department of Mechanical Engineering Technology, Metal-Cutting Machine Tools and Tools, Kurgan State University (Kurgan, Russia)

ip.popov@yandex.ru

Poryadina Tatiana Dmitrievna,

Process Engineer, Alkor LLC (Vologda, Russia)

tany-poryadin@yandex.ru

Safronova Elizaveta Sergeevna,

Student of the Civil Engineering Institute of Vologda State University (Vologda, Russia)

aig@vogu35.ru

Solovieva Ekaterina Vyacheslavovna,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Architecture and Urban Planning of Vologda State University (Vologda, Russia)

evsvologda@mail.ru

Surikova Alisa Nikolaevna,

Senior Lecturer, Department of Heat and Gas Supply, Vologda State University (Vologda, Russia)

surikovaan@vogu35.ru

Stepanov Alexander Sergeevich,

Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Mechanical Engineering Technology, Vologda State University (Vologda, Russia)

alex.stepanov@mail.ru

Sukonshchikov Alexey Alexandrovich,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Automation and Computer Engineering, Vologda State University (Vologda, Russia)

avt@vogu35.ru

Utkin Dmitry Evgenyevich,

Student of the Institute of Mathematics, Natural and Computer Sciences, Vologda State University (Vologda, Russia)

keer22steam@gmail.com

Frolov Sergey Anatolievich,

Head of Laboratory, Institute of Mechanical Engineering, Energy and Transport, Vologda State Technical University (Vologda, Russia)

fsa84@bk.ru

Shapkina Veronika Andreevna,

Candidate of Pedagogy, Associate Professor of the Department of Highways, Vologda State University (Vologda, Russia)

vrnk@bk.ru

Shorin Vladimir Alexandrovich,

Doctor of Chemistry, Professor, Professor of the Department of Highways, Vologda State University (Vologda, Russia)

ad@vogu35.ru

Yakunina Valentina Alekseevna,

Student of the Engineering and Technical Institute of Cherepovets State University (Cherepovets, Russia)

valentinayakuninaa@mail.ru

Yanyak Sergey Vladimirovich,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Vologda State University (Vologda, Russia)

tms@vogu35.ru

Yakhrichev Viktor Vasilievich,

Senior Lecturer, Department of Mechanical Engineering Technology, Vologda State University (Vologda, Russia)

yahrichev@yandex.ru

Научное издание

ВЕСТНИК ВОЛОГОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

Серия: Технические науки
№ 1 (11) / 2021

Главный редактор А. А. Кочкин

Свидетельство о регистрации СМИ: ПИ № ФС77-75456 от 05.04.2019 г.
выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций
(Роскомнадзор)

Подписано в печать 24.03.2021. Выпуск в свет 30.03.2021. Формат 60 × 84/8
Уч.-изд. л. 10,1. Усл. печ. л. 10,25. Тираж 76 экз. Заказ № 810. Цена свободная

ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет»
160000, 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