

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

**ВЕСТНИК
ВОЛОГОДСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Основан в 2018 г.

№ 3 (17) / 2022

СЕРИЯ: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ВОЛОГДА
2022

№ 3 (17) / 2022 / НОЯБРЬ. 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

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

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:

П.Ю. Бочкарев, д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ,
В.Г. Гагарин, д-р техн. наук, чл.-корр. РААСН,
проф. НИИСФ РААСН,
В.А. Горбунов, д-р физ.-мат. наук, проф. ВоГУ,
В.П. Гусев, д-р техн. наук, зав. лаб. НИИСФ РААСН,
Н.М. Дементьев, канд. техн. наук, доц. ВоГУ,
Р.Ю. Добрецов, д-р техн. наук, проф. ИММиТ (СПб),
И.В. Зефирова, канд. техн. наук, доц. ВГМХА
им. Н.В. Верещагина,
А.Ф. Зубков, д-р техн. наук, проф. ТГТУ,
А.Л. Кузьминов, д-р техн. наук, проф. ЧГУ,
А.Г. Кочев, д-р техн. наук, чл.-корр. РААСН,
проф. ННГАСУ,
Л.Н. Кондратьева, д-р техн. наук, проф. СПБГАСУ,
В.И. Леденев, д-р техн. наук, проф. ТГТУ,
С.В. Лукин, д-р техн. наук, проф. ЧГУ,
О.В. Мкртычев, д-р техн. наук, проф. НИУ МГСУ,

С.Н. Овсянников, д-р техн. наук, проф. ТГАСУ,
В.П. Подольский, заслуженный деятель науки РФ,
д-р техн. наук, проф. ВГТУ,
А.М. Полянский, канд. техн. наук, доц. ВоГУ,
В.А. Пиеничкина, д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ,
В.И. Римшин, д-р техн. наук, чл.-корр. РААСН,
проф. НИИСФ РААСН,
А.С. Степанов, канд. техн. наук, доц. ВоГУ,
А.А. Сукончиков, канд. техн. наук, доц. ВоГУ,
Н.Н. Трушин, д-р техн. наук, проф. ТулГУ,
В.Д. Чертовской, д-р техн. наук, проф. ГУМРФ
им. адм. С.О. Макарова,
Д.С. Шишигин, канд. техн. наук, ВоГУ,
С.Л. Шишигин, д-р техн. наук, проф. ВоГУ,
В.А. Шорин, д-р хим. наук, проф. ВоГУ,
И.Л. Шубин, д-р техн. наук, чл.-корр. РААСН,
директор НИИСФ РААСН

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

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

Оригинал-макет – *Н.В. Подхомутова*

Адрес редакции: 160000, г. Вологда, ул. Галкинская, 3, каб. 326; тел. 8 (8172) 72-47-70

e-mail: vestniktech@vogu35.ru; **http://**vestnik.vogu35.ru

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE RUSSIAN FEDERATION
FEDERAL STATE BUDGETARY EDUCATIONAL INSTITUTION OF HIGHER EDUCATION
VOLOGDA STATE UNIVERSITY

BULLETIN OF VOLOGDA STATE UNIVERSITY

SCIENTIFIC JOURNAL

First published in 2018

No. 3 (17) / 2022

SERIES: TECHNICAL SCIENCES

VOLOGDA
2022

No. 3 (17) / 2022 / NOVEMBER. 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: 2.1.1. Building constructions, buildings and structures; 2.1.3. Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply and lighting; 2.1.8. Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels; 2.1.9. Structural mechanics; 2.3.1. System analysis, management and information processing; 2.3.3. Automation and control of technological processes and productions; 2.3.4. Management in organizational systems; 2.3.7. Computer modeling and design automation; 2.5.6. Mechanical engineering technology; 2.5.11. Surface transport and technological means and complexes.

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:

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

V.G. Gagarin, Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of RAACS, prof. of NIISPh of RAACS,

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

V.P. Gusev, Doctor of Technical Sciences, Head of laboratory of NIISPh of RAACS,

N.M. Demytyev, Ph.D in Technical Sciences, Associate Prof. of VSU,

R.Yu. Dobretsov, Doctor of Technical Sciences, Prof. of IMMiT (St. Petersburg),

I.V. Zefirov, Ph.D in Technical Sciences, Associate prof. of VSDA named after N.V. Vereshchagin,

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

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

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

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

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

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

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

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

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

A.M. Polyansky, Ph.D in Technical Sciences, Associate prof. of VSU,

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

V.I. Rimshin, Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of RAACS, Prof. of NIISPh RAACS,

A.S. Stepanov, Ph.D in Technical Sciences, Associate prof. of VSU,

A.A. Sukonshchikov, Ph.D in Technical Sciences, Associate prof. of VSU,

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

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

D.S. Shishigin, Ph.D in Technical Sciences, Prof. of VSU,

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

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

I.L. Shubin, Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of RAACS, Director of NIISPh of RAACS

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: Office 326, Galkinskaya Street, 3, Vologda, 160000; tel. 8(8172)72-47-70

e-mail: vestniktech@vogu35.ru; **http:** <http://vestnik.vogu35.ru>

ISSN 2658-3399

© FSBEI of HE Vologda

State University, 2022State University, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Строительные конструкции, здания и сооружения

<i>Бормосов Н.А., Лукинов М.М.</i> КОНЦЕПЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА МУСОРОСЖИГАТЕЛЬНЫХ ЗАВОДОВ	7
<i>Инькова Ю.А.</i> ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ДЕРЕВЯННЫХ БАЛОК ПО КРИТЕРИЮ ПРОЧНОСТИ НАКЛОННЫХ СЕЧЕНИЙ	11
<i>Иньков А.Э.</i> АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ УЗЛОВ СТАЛЬНЫХ ФЕРМ ИЗ ГСП ПРИ ИНТЕРВАЛЬНОЙ ОЦЕНКЕ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН	16
<i>Лаврентьев П.С.</i> СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ПО РАСЧЕТУ ТРЕБУЕМОЙ МОРОЗОСТОЙКОСТИ НАРУЖНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ	20
<i>Соловьев С.А., Инькова Ю.А., Соловьева А.А.</i> ВЕРОЯТНОСТНЫЙ РАСЧЕТ НОРМАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ ДЕРЕВЯННЫХ БАЛОК НА ЗАДАННЫЙ ИНДЕКС НАДЕЖНОСТИ.....	24
<i>Соловьев С.А., Нагимзянова Д.А.</i> КОНТРОЛЬ ИНДЕКСА НАДЕЖНОСТИ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ДЕРЕВЯННЫХ БАЛОК	30
<i>Соловьев С.А., Сушев Л.А., Рахманов Р.В.</i> ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ СВАЙ НА ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ ПО НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ОСНОВАНИЯ	34

Технологии теплоснабжения

<i>Фоменко А.И., Назарова М.А.</i> СОПОСТАВИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АДСОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЗОЛЫ, ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ ПРИ СЖИГАНИИ ДРЕВЕСИНЫ ХВОЙНЫХ И ЛИСТВЕННЫХ ПОРОД	38
---	----

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Управление в организационных системах

<i>Галиев Р.М.</i> АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ДОКУМЕНТОВ ОРГАНИЗАЦИИ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА	43
<i>Денисова М.В., Ржеуцкая С.Ю.</i> ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ НЕПРЕРЫВНОЙ ИНТЕГРАЦИИ В ДИСТАНЦИОННОМ ЛАБОРАТОРНОМ ПРАКТИКУМЕ ПО ИТ-ДИСЦИПЛИНАМ	48

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Технология машиностроения

<i>Бормосов Н.А., Лукинов М.М., Соколов А.В.</i> ИССЛЕДОВАНИЯ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ СТАЛЕЙ ДЛЯ КОТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ	51
<i>Бормосов Н.А., Лукинов М.М., Соколов А.В.</i> ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ НА ДЕЙСТВУЮЩЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ	57
<i>Никифоров В.Е., Никитин Л.А.</i> АНАЛИЗ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ И РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ ВАКУУМНО-ИМПУЛЬСНОЙ СУШКИ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ	64
<i>Попов И.П.</i> СИНТЕЗ МЕХАНИЗМА С ФИКСИРОВАННОЙ ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ	68

Наземные транспортно-технологические средства и комплексы

<i>Раков В.А.</i> ОСОБЕННОСТИ ТРАКТОВАНИЯ ПОНЯТИЙ РАСЧЕТНАЯ И АБСОЛЮТНАЯ НАГРУЗКА ДВИГАТЕЛЯ.....	71
<i>Сведения об авторах</i>	75

CONTENTS

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Building constructions, buildings and structures

<i>Bormosov N.A., Lukinov M.M.</i> CONCEPT OF WASTE INCINERATION PLANT CONSTRUCTION	7
<i>Inkova Yu.A.</i> PROBABILISTIC ANALYSIS OF TIMBER BEAMS RELIABILITY BY SHEAR STRENGTH CRITERION.....	11
<i>Inkov A.E.</i> RHS STEEL TRUSSES RELIABILITY ANALYSIS BASED ON RANDOM VARIABLES INTERVAL ESTIMATIONS.....	16
<i>Lavrentyev P.S.</i> STATE OF ART ON CALCULATION OF EXTERNAL FENCING BUILDINGS STRUCTURES REQUIRED FROST RESISTANCE.....	20
<i>Solovev S.A., Inkova Yu.A., Soloveva A.A.</i> PROBABILISTIC CALCULATION OF TIMBER BEAMS STANDARD SECTIONS BY GIVEN RELIABILITY INDEX	24
<i>Solovyov S.A., Nagimzyanova D.A.</i> CONTROL OF RELIABILITY INDEX OF TIMBER BEAMS BEING EXPLOITED	30
<i>Solovyov S.A., Sushev L.A., Rakhmanov R.V.</i> PROBABILISTIC ANALYSIS OF PILES RELIABILITY ON PERMAFROST SOILS BASED ON BASE BEARING CAPACITY	34

Heat supply technologies

<i>Fomenko A.I., Nazarova M.A.</i> COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF ADSORPTION PROPERTIES OF ASH PRODUCED WHEN BURNING CONIFEROUS AND DIFFICULAR SPECIES WOOD.....	38
--	----

INFORMATION TECHNOLOGY

Management in organizational systems

<i>Galiev R.M.</i> AUTOMATED SYSTEM OF DOCUMENTS FORMATION FOR EDUCATIONAL PROCESS ORGANIZATION.....	43
<i>Denisova M.V., Rzhetskaya S.Yu.</i> USE OF CONTINUOUS INTEGRATION TECHNOLOGY IN DISTANT LABORATORY PRACTICE ON IT DISCIPLINES	48

MECHANICAL ENGINEERING

Engineering technology

<i>Bormosov N.A., Lukinov M.M., Sokolov A.V.</i> STUY OF BOILER EQUIPMENT STEELS CORROSION RESISTANCE.....	51
<i>Bormosov N. A., Lukinov M. M., Sokolov A.V.</i> INDUSTRIAL TESTS OF THERMAL WASTE PROCESSING ON OPERATING TECHNOLOGICAL EQUIPMENT	57
<i>Nikiforov V.E., Nikitin L.A.</i> ANALYSIS OF ENERGY CONSUMPTION AND EQUIPMENT OPERATION OF VACUUM-PULSED PLANT MATERIALS DRYER.....	64
<i>Popov I.P.</i> SYNTHESIS OF MECHANISM WITH A FIXED ROTATION SPEED	68

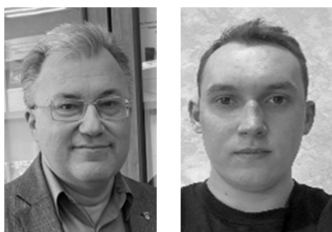
Land transport and technological means and complexes

<i>Rakov V.A.</i> SPECIAL ASPECTS OF INTERPRETATION OF CALCULATE AND ABSOLUTE ENGINE LOAD CONCEPTS	71
<i>Information about the authors</i>	77

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Строительные конструкции, здания и сооружения

УДК 69.01



Н.А. Бормосов, М.М. Лукинов
Вологодский государственный университет

КОНЦЕПЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА МУСОРОСЖИГАТЕЛЬНЫХ ЗАВОДОВ

В данной работе приведен анализ выбора инфраструктуры для раздельного сбора и сортировки мусора для его последующей утилизации на мусоросжигательных заводах. Дана оценка двух вариантов утилизации твердых бытовых отходов при строительстве заводов разной мощности сжигания. Также представлены карты географии расположения мусоросжигательных заводов на территории Российской Федерации в зависимости от количества населения, проживающего на данной территории.

Концепция строительства, инфраструктура, твердые коммунальные отходы, утилизация, сбор мусора, сортировка, мусоросжигательный завод, производство электроэнергии, строительная карта, классификация мусоросжигательных заводов.

Концепция проекта – это система взглядов, описывающая направление будущего проекта, глобальные цели и задачи. Она должна содержать общее видение проекта, стратегию, четкий план действий с ограничениями и допусками. Положения концепции проекта должны быть доступными и понятными.

Решение экологической проблемы захоронения мусора необходимо начинать с разработки инфраструктуры для раздельного сбора и сортировки мусора.

Первой стадией инфраструктуры для сортировки мусора является наличие контейнеров для разного вида мусора возле жилых многоквартирных домов. Количество типов контейнеров варьируется от возможностей сортировочных центров и желания максимального достижения экологичности самих жителей. Основными видами отходов для сортировки являются: органические отходы, металл, пластик, бумага, стекло. На сегодняшний день это было бы идеальным вариантом сортировки мусора возле многоквартирных жилых домов. Для индивидуальных жилых домов, расположенных в деревнях или поселках, где расположение многочисленных баков затруднительно, основными категориями для сбора мусора будут: вторсырье, что поддается вторичной переработке отходов (стекло, бумага, металл, пластик определенных видов), и смешанные отходы, т.е. то сырье, которое будет направлено на получение электроэнергии на мусоросжигательных заводах [1-2]. Также не стоит забывать об общественных местах, таких как школы, университеты, больницы, парки, торговые центры и т. д., в них тоже должен быть предусмотрен раздельный сбор мусора.

Вторым важным этапом в раздельном сборе отходов является его логистика до сортировочных центров. Здесь главным является то, что отсортированные отходы не должны смешиваться, и понимание того, что разные виды контейнеров заполняются с различной скоростью и график их вывозов может отличаться.

Третий этап – строительство сортировочных центров, мусоросжигательных и перерабатывающих заводов – это самый затратный и сложный с технологической точки зрения этап.

Из опыта стран, где переработка отходов приблизилась к 100 %, можно сделать вывод, что соотношение сжигания отходов и переработки приблизительно равно 50 % на 50 %. Поэтому важной и наиболее значимой задачей является правильный расчет мощностей заводов, чтобы избежать дефицита сырья при их эксплуатации.

Как только в населенном пункте будет создана инфраструктура для благоприятного и эффективно использования отходов, необходимо начинать работать с населением. А именно объяснять и показывать, как правильно должна происходить сортировка отходов.

Понимание необходимости сортировки мусора должно закладываться еще с малых лет. Поэтому должны быть разработаны образовательные программы, начиная со школы, лекции, развлекательные мероприятия для обучения человека сортировке отходов. Контейнеры под разные виды мусора должны находиться в каждом образовательном и общественном месте.

На законодательном уровне необходимо разработать ряд законов, обязывающих коммунальные службы

устанавливать контейнеры под разные виды мусора, транспортировать их до сортировочных пунктов, не перемешивая отходы. К сожалению, такая технология приведет к удорожанию тарифов на вывоз мусора, но это обязательный этап на пути к нулевому захоронению отходов в нашей стране. Также необходим закон о переработке упаковки для промышленных и пищевых товаров. Сегодня большое количество производителей используют упаковку, не подлежащую вторичной переработке. Стоит также отметить, что комбинированная упаковка усложняет процесс сортировки.

Понимание объемов образующихся отходов является вопросом первостепенной важности при расчете и составлении экономического плана строительства сортировочных центров, мусоросжигательных и перерабатывающих заводов.

Средние значения вырабатываемых отходов человеком за год составляют от 450 до 500 кг. От этих значений и стоит отталкиваться при расчете инфраструктуры при переработке отходов. Как уже было сказано выше, соотношение сжигания отходов и их переработка составляют 50 % на 50 %. Таким образом, на сжигание приходится от 225 до 250 кг отходов. Поэтому данное значение сжигания отходов необходимо применять при расчете количества мусоросжигательных заводов.

Первый вариант утилизации твердых бытовых отходов основан на строительстве заводов мощностью сжигания 700 000 тонн мусора в год. Завод такой мощности способен обеспечить населенный пункт численностью до 100 000 человек электроэнергией. Согласно данным «Федеральной службы государственной статистики» [3], среднее значение потребления электроэнергии на душу населения в год составляет 5500 кВт. МСЗ мощностью 700 000 тонн в год может выработать 545 млн кВт·ч, что соответствует потребностям города с населением 100 000 человек. Важно отметить, что количество заводов

зависит не от необходимого количества электроэнергии для города или области, а возможностями загрузки завода ТБО, чтобы избежать дефицита топлива. Данные по количеству заводов в зависимости от субъекта Российской Федерации представлены в таблице 1.

Так, для Москвы и Московской области необходимо 7 заводов, которые способны выработать 3395 млн кВт·ч электрической энергии. Для реализации первого варианта утилизации твердых бытовых отходов разработана карта строительства МСЗ в наиболее многочисленных областях и городах, где строительство завода мощностью до 700 000 тонн ТБО в год рационально. Строительство таких заводов не перекрывает вопрос электроэнергии полностью, но позволяет частично обеспечить производство электрической энергии за счет бесплатного топлива.

Второй способ позволяет увеличить возможности производства электроэнергии при помощи строительства МСЗ, но и увеличивает стоимость всего проекта, так как количество заводов увеличивается. Для упрощения достаточно сложного в реализации проекта необходимо разработать 4 унифицированных проекта для мусоросжигательных заводов разных мощностей. Классификация заводов по мощности приведена в таблице 2. Также это поможет разработать точную карту строительства мусоросжигательных заводов в Западной части России в соответствии с количественным показателем населения городов.

Для разработки строительной карты мусоросжигательных заводов за основу взята Западная часть Российской Федерации, на которой расположено 30 городов с населением от 470 тыс. человек до 12,6 млн человек. Соотношение населения городов с классом и количеством заводов приведено в таблице 3. Именно вблизи этих городов необходимо располагать заводы по сжиганию отходов разной мощности.

Таблица 1

Соотношение населения субъектов с количеством заводов

№	Субъект РФ	Население	Количество МСЗ мощностью 700 000 тонн/год
1	Москва, Московская область	20 404 000	7
2	Краснодарский край, Республика Адыгея	6 150 000	2
3	Санкт-Петербург, Ленинградская область	7 290 000	3
4	Свердловская область	4 264 000	1
5	Ростовская область	4 154 000	1
6	Республика Башкортостан	4 002 000	1
7	Республика Татарстан	3 886 000	1
8	Тюменская область (с ХМАО и ЯНАО)	3 806 000	1
9	Челябинская область	3 419 000	1
10	Республика Дагестан	3 153 000	1
11	Нижегородская область	3 144 000	1
12	Самарская область	3 131 000	1
13	Красноярский край	2 850 000	1
14	Новосибирская область	2 780 000	1
15	Ставропольский край	2 780 000	1
16	Кемеровская область	2 604 000	1
17	Пермский край	2 557 000	1
18	Волгоградская область	2 450 000	1

Классификация заводов по мощности

Класс	Мощность, тонн/год	Кол-во людей, чел.
I	700 000	2,8 млн ÷ 3,1 млн
II	500 000	2,0 млн ÷ 2,2 млн
III	250 000	1,0 млн ÷ 1,1 млн
IV	150 000	0,6 млн ÷ 0,66 млн

Соотношение населения городов с классом и количеством заводов

№	Город	Население	Класс и количество МСЗ
1	Москва	12 635 000	I – 5 шт.
2	Санкт-Петербург	5 380 000	I – 2 шт.
3	Новосибирск	1 548 000	II – 1 шт.
4	Екатеринбург	1 412 000	III – 1 шт., IV – 1 шт.
5	Нижний Новгород	1 264 000	III – 1 шт., IV – 1 шт.
6	Казань	1 191 000	III – 1 шт., IV – 1 шт.
7	Самара	1 172 000	III – 1 шт., IV – 1 шт.
8	Челябинск	1 169 000	III – 1 шт., IV – 1 шт.
9	Омск	1 166 000	III – 1 шт., IV – 1 шт.
10	Ростов-на-Дону	1 110 000	III – 1 шт.
11	Уфа	1 097 000	III – 1 шт.
12	Пермь	1 026 000	III – 1 шт.
13	Волгоград	1 010 000	III – 1 шт.
14	Воронеж	1 015 000	III – 1 шт.
15	Саратов	841 000	III – 1 шт.
16	Краснодар	806 000	IV – 1 шт.
17	Тольятти	718 000	IV – 1 шт.
18	Тюмень	680 000	IV – 1 шт.
19	Ижевск	637 000	IV – 1 шт.
20	Ульяновск	617 000	IV – 1 шт.
21	Ярославль	602 000	IV – 1 шт.
22	Оренбург	560 000	IV – 1 шт.
23	Астрахань	531 000	IV – 1 шт.
24	Рязань	530 000	IV – 1 шт.
25	Набережные Челны	522 000	IV – 1 шт.
26	Пенза	521 000	IV – 1 шт.
27	Липецк	510 000	IV – 1 шт.
28	Тула	491 000	IV – 1 шт.
29	Киров	487 000	IV – 1 шт.
30	Чебоксары	469 000	IV – 1 шт.

Выбор класса мусоросжигательного завода для некоторых городов осуществляется с запасом при условии, что загрузка мощностей завода будет обеспечиваться и за счет близлежащих городов.

Сортировочные предприятия необходимо строить вблизи мусоросжигательных заводов с целью создания единого центра по переработке отходов.

Таким образом, целью разработки концепции строительства мусоросжигательных заводов должно стать уменьшение захоронения твердых бытовых отходов и получение максимального количества электроэнергии. Это достигается путем комплекса решения сложных задач, начиная с отношения людей к сортировке мусора, заканчивая технологическим процессом, протекающим на заводе. На сегодняшний день эта проблема остро стоит в нашей стране и принятие шагов к ее решению должно быть незамедлительно.

Также необходимо учитывать, что сжигание отходов решает экологическую проблему только на 50 %,

а остальные 50 % приходятся на мусороперерабатывающие заводы, работающие на вторсырье. Это сложный и малоизученный процесс, поэтому строительство таких заводов требует времени. Для решения этого вопроса необходимо в момент строительства МСЗ и сортировочных центров заблаговременно планировать места будущих заводов по переработке отходов и на них складировать отсортированный, упакованный мусор.

Среднее время на реализацию такого объема строительства может составлять от 15 до 25 лет.

Литература

1. Федеральный закон № 261-ФЗ от 23.11.2009 г. «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» // «РГ»-Федеральный выпуск, № 5050, 27.11.2009.

2. Справочник. Санитарная очистка и уборка населенных мест. Под редакцией А.Н. Мирного. – Москва : Акад. Коммунального хозяйства им. К.Д. Пам-филова, 1997.

3. «Федеральная служба государственной статистики»: [Электронный ресурс]. URL: <https://rosstat.gov.ru/> (Дата обращения: 01.05.2022).

N.A. Bormosov, M.M. Lukinov
Vologda State University

CONCEPT OF WASTE INCINERATION PLANT CONSTRUCTION

This paper analyzes the choice of infrastructure for the separate collection and sorting of waste for its subsequent disposal at waste incineration plants. The assessment of two options for disposal of municipal solid waste during the construction of plants with different combustion capacities is given. Also, the maps of the geography of the waste incineration plants location at the territory of the Russian Federation, depending on the number of people living in this territory are presented.

Construction concept, infrastructure, municipal solid waste, recycling, garbage collection, sorting, incineration plant, electricity generation, building map, classification of incinerators.



ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ДЕРЕВЯННЫХ БАЛОК ПО КРИТЕРИЮ ПРОЧНОСТИ НАКЛОННЫХ СЕЧЕНИЙ

В статье представлен вероятностный метод оценки надежности деревянных балок по критерию прочности наклонных сечений. Исследованы различные расчетные ситуации с различным количеством случайных величин в математической модели предельного состояния, что повышает практическую значимость разработанных подходов. Приведена информация о моделях деградации прочностных характеристик опорных участков балок, на основе которой можно рассчитывать срок службы балки до капитального ремонта или замены балки. Метод вероятностного анализа для оценки надежности следует подбирать исходя из степени нелинейности математической модели предельного состояния случайной величины, уровня изменчивости случайных величин и количества/качества полученной статистической информации при обследовании. В простых линейных математических моделях допустимо использование метода двух моментов (FOSM, First Order Second Moment), а в нелинейных математических моделях рекомендуется использовать алгоритм Хасофера – Линда или метод SORM (Second Order Reliability Method).

Надежность, прочность, деревянная балка, вероятность отказа, индекс надежности, наклонные сечения.

«Надежность любой конструкции является по существу конструктивным параметром, который должен вводиться в систему на этапе проектирования. При проектировании любой конструктивной системы следует иметь в виду, что ее рабочие характеристики и параметры являются вероятностными по своей природе. Очевидно, что факторы, определяющие прочность элементов и действующие на них нагрузки, также являются вероятностными. Это означает, что при оценке показателей надежности на этапе проектирования необходимо учитывать вероятностный характер параметров системы» [1].

Обеспечение безопасности эксплуатации деревянных конструкций является базовым принципом расчета и проектирования строительных конструкций на всех стадиях их жизненного цикла. Качественным показателем обеспечения безопасности является подтверждение выполнения требования непревышения предельных состояний, предусмотренных нормативными документами. Однако в таких случаях уровень безопасности не выражается количественно. Для количественной оценки безопасности строительных конструкций может быть использован критерий надежности, мерой которого является вероятность безотказной работы или вероятность отказа.

В древности точных методов расчета инженерных конструкций на прочность, жесткость, устойчивость и надежность не существовало, поэтому строители выбирали более тяжелые конструкции, здания и сооружения строились с очень большими запасами прочности. Иногда постройки были в сотни раз прочнее, чем требовалось, но со временем люди стали рационально подходить к строительству, исключая лишние запасы прочности, поэтому неумение предви-

деть, как будет работать сооружение в тех или иных условиях, приводило к его разрушению, аварии.

С 1 января 1955 г. основным принципом расчета строительных конструкций – метод расчетных предельных состояний. В наши дни он положен в основу большинства стандартов по проектированию, в частности в системе Еврокодов, где получил название «метод частных коэффициентов надежности» [2].

С развитием техники появилась потребность оценивать те или иные механизмы, конструкции, технологические процессы с позиций их устойчивости в работе и безотказности. В ответ на это возникло математическое понятие надежности, в котором надежность выступает как вероятность безотказного функционирования технического объекта [3].

Для начала рассмотрим понятие надежности строительных конструкций. Надежность строительного объекта – его способность выполнять требуемые функции в течение расчетного срока эксплуатации [4].

Доля аварий, произошедших в деревянных зданиях, по статистике с 1981 по 2003 год в среднем составляла 2–8 % от их общего количества [5].

Рассмотрим случаи обрушений деревянных конструкций, произошедшие в Вологодской области.

10.06.2010 (г. Вологда) произошло обрушение чердачного перекрытия жилого двухэтажного дома. Причина – намокшие деревянные конструкции перекрытия. Над обрушенным участком образовались протечки в кровле, а сильные дожди лишь усугубили процесс намокания.

21.03.2012 (пос. Новатор, Великоустюгский район, Вологодская область) произошло обрушение крыши деревянного сарая. Погиб 10-летний мальчик.

Крыша одного из сараев, возле которых играли дети, обвалилась из-за тяжести снега.

Профессор В.В. Леденев отмечает: «Основными ошибками при проектировании деревянных конструкций были: применение непригодных для деревянных конструкций конструктивных схем и узлов, неправильное определение действующих нагрузок; в частности, не учитываются образования снеговых мешков и неравномерное распределение нагрузок по покрытию, отсутствие связей между конструкциями, недостаточно полное оформление чертежей конструкций...», «встречаются неудачно осуществленные опорные узлы конструкций, являющиеся самыми ответственными и весьма уязвимыми конструкциями» [5].

Следует отметить, что существуют как дефекты, так и повреждения деревянных конструкций. Первые могут быть вызваны: ошибками при проектировании, несоблюдением проекта и правил производства работ, нарушением правил эксплуатации конечной продукции, а также воздействием огня. Биоповреждения бывают нескольких видов: нарушение температурно-влажностного режима конструкций и повреждение древесины насекомыми. При нарушении температурно-влажностного режима древесины при ее высыхании возникает усушка, коробление и растрескивание. При наличии избыточной влажности происходит процесс гниения материала. К характерным дефектам и повреждениям деревянных балок можно отнести: использование при строительстве сырой древесины, влажностью более 25 %, отсутствие гидроизоляционного слоя, а также плохую вентиляцию, поражение древесины грибом.

Большинство серьезных повреждений и аварий деревянных конструкций связано с нарушением правил эксплуатации зданий и сооружений – чаще всего именно эти нарушения приводят к загниванию деревянных конструкций. Основные причины загнивания деревянных конструкций: прямое или конденсационное увлажнение, дефекты гидроизоляции и несоблюдение температурно-влажностного режима эксплуатации. Стропильные конструкции наиболее часто повреждаются у торцов зданий из-за протечек в кровле [6].

Причины, вызывающие разрушение деревянных конструкций в ходе эксплуатации: систематическое замачивание конструкций, отсутствие защитных пропиток от разного рода повреждений, несвоевременное проведение ремонтно-восстановительных работ, отсутствие доступа к месту возникновения проблемы для осмотра и своевременного ремонта.

Возведение различных пристроек и надстроек к существующему зданию приводит к изменению схемы приложения снеговой нагрузки на покрытие и схемы водоотвода с крыши. Нарушение водостока приводит к загниванию опорных частей конструкций [6].

Актуальным направлением в развитии теории надежности строительных конструкций также является использование р-блоков [7–11].

В данной статье предлагается исследовать и разработать подходы к вероятностному анализу надежности деревянных балок. В качестве критерия предельного состояния принята прочность наклонных

сечений элемента. Для комплексной оценки надежности необходима разработка методов расчета надежности по всем нормативным критериям предельных состояний и последующая системная оценка надежности элемента.

Математическая модель предельного состояния по критерию прочности наклонных сечений в соответствии с СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции» может быть записана в виде:

$$\frac{QS'_{\bar{o}p}}{I_{\bar{o}p} b_{pac}} \leq R_{ck}, \quad (1)$$

где Q – расчетная поперечная сила;

$S'_{\bar{o}p}$ – статический момент брутто сдвигаемой части поперечного сечения элемента относительно нейтральной оси;

$I_{\bar{o}p}$ – момент инерции брутто поперечного сечения элемента относительно нейтральной оси;

b_{pac} – расчетная ширина сечения элемента;

R_{ck} – расчетное сопротивление скалыванию при изгибе.

Рассмотрим расчетный случай однопролетной балки на шарнирных опорах при равномерно распределенной нагрузке q .

В этом случае расчетная поперечная будет $Q = \frac{ql}{2}$, где l – пролет балки.

Пусть балка является брусом с круглым поперечным сечением. Статический момент сдвигаемой части будет равен произведению площади полусечения балки на расстояние от нейтральной оси до центра тяжести полусечения. Для круглого сечения он составит

$S'_{\bar{o}p} = \frac{2}{3} r^3 = 0,0833d^3$, где r – радиус поперечного сечения балки; d – диаметр поперечного сечения балки. Момент инерции сечения составляет $I_{\bar{o}p} = 0,049 d^4$.

Подставив указанные характеристики в неравенство (1), получим:

$$\frac{Q \cdot 0,0833d^3}{0,049d^4 \cdot d} = 1,7 \frac{Q}{d^2} \leq R_{ck}. \quad (2)$$

Для случая, указанного выше, математическая модель предельного состояния примет вид:

$$0,85 \frac{\tilde{q}l}{d^2} \leq \tilde{\sigma}_{ck}, \quad (3)$$

где волнистыми линиями обозначены случайные величины.

Обозначение введено $\tilde{\sigma}_{ck}$ вместо R_{ck} по причине того, что R_{ck} является нормативной величиной с заданной обеспеченностью. Поэтому в задачах оценки надежности используется не расчетное сопротивление, а прочность при скалывании $\tilde{\sigma}_{ck}$.

Рассмотрим первый вариант расчета надежности по (3), когда нагрузка и прочность древесины являются

ся случайными величинами, а диаметр поперечного сечения бревна определяется точно для конкретной балки и является детерминированной (постоянной) величиной.

В соответствии с СП 64.13330.2017, коэффициент вариации прочности древесины при скальвании составляет 0,2. Прочность древесины при скальвании, как правило, допускается описывать нормальным распределением вероятностей [12]. Если выполняется анализ надежности на стадии проектирования или нет возможности провести исследования прочности при скальвании на контрольных образцах древесины балки, то статистические характеристики могут быть получены исходя из информации СП 64:

$$R_{ск}^H = m_{\sigma,ск} (1 - 1,65v), \quad (4)$$

где $m_{\sigma,ск}$ – математическое ожидание прочности древесины при скальвании;

$R_{ск}^H$ – нормативная прочность (с обеспеченностью 0,95) древесины при скальвании, принимаемая по таблицам СП 64, в зависимости от класса древесины;

$$v = \frac{S_{\sigma,ск}}{m_{\sigma,ск}} \text{ – коэффициент вариации прочности}$$

древесины при скальвании;

$S_{\sigma,ск}$ – среднее квадратическое отклонение прочности древесины при скальвании.

Или параметры $m_{\sigma,ск}$ и $S_{\sigma,ск}$ могут быть получены по результатам испытаний контрольных образцов древесины.

Статистические параметры m_q и S_q для нагрузки могут быть также получены путем анализа статистической информации и проведения испытаний [13].

Индекс надежности балки по критерию прочности наклонных сечений может быть вычислен по формуле:

$$\beta = \frac{m_{\sigma,ск} - k \cdot m_q}{\sqrt{S_{\sigma,ск}^2 + (kS_q)^2}}, \quad (5)$$

$$\text{где } k = 0,85 \frac{l}{d^2}.$$

Вероятность безотказной работы (при условии, что случайные величины описываются нормальным распределением) может быть вычислена как

$$P = \Phi(\beta), \quad (6)$$

где $\Phi(\beta)$ – табличные значения функции Лапласа.

Рассмотрим пример. Исследуется балка пролетом $l=4$ м с диаметром поперечного сечения $d=0,1$ м. Тогда коэффициент $k=340$. Пусть по результатам испытаний древесины установлены статистические параметры ее прочности при скальвании: $m_{\sigma,ск} = 5$ МПа, $S_{\sigma,ск} = 1$ МПа. Нагрузка характеризуется нормальным законом распределения с параметрами: $m_q = 8,0$ кН/м; $S_q = 0,8$ кН/м.

Подставляя указанные параметры в (5) можно вычислить индекс надежности $\beta = 2,2$. Соответствующая вероятность безотказной работы $P=0,9861$.

В [14] предложена модель снижения размеров поперечного сечения древесины:

$$r = k_{wood} k_{climate}, \quad (7)$$

$$t_{lag} = 3r^{-0,4}, \quad (8)$$

где k_{wood} – коэффициент, зависящий от физико-механических характеристик древесины; $k_{climate}$ – коэффициент, зависящий от климатического фактора.

Пусть по результатам вышеописанного примера имеем грибковое поражение опорного участка балки. По (7) примем ежегодное сокращение размеров сечения $r=0,30$ мм/год. Тогда индекс надежности будет изменяться с годами как показано на рисунке.

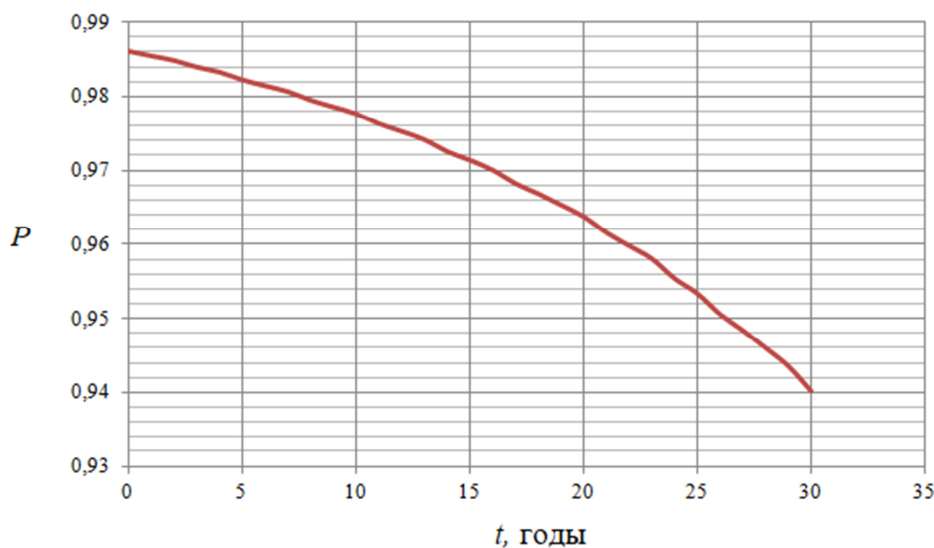


Рис. Снижение индекса надежности с ростом развития грибкового поражения сечения

По рисунку в запас надежности принято полное выключение из работы области сечения, пораженного грибком. В качестве более точной модели можно использовать предложение авторов [15] в виде:

$$A = A_{ND} + \alpha A_D, \quad (9)$$

где A_{ND} – площадь, которая не поражена грибком; A_D – площадь, пораженная грибком; α – коэффициент оставшейся несущей способности, который, как предполагается [15], принимает значения от 0 до 0,5.

В статье [15] отмечается, что деревянные элементы с круглым поперечным сечением имеют наибольший коэффициент вариации размеров поперечного сечения. В связи с этим, необходимо рассмотреть расчетный случай, когда диаметр сечения балки является также случайной величиной. Т.к. в этом случае функция предельного состояния со случайными величинами становится нелинейной, рекомендуется использовать другой алгоритм анализа надежности для более точной оценки. Рассмотрим, например, алгоритм Хасофера – Линда [16].

Запишем математическую модель предельного состояния (3) в виде:

$$\tilde{g}(\tilde{x}_i) = \tilde{x}_1 - 0,85 \frac{\tilde{x}_2 l}{\tilde{x}_3^2} \geq 0. \quad (10)$$

Для функции предельного состояния (10) вычисляется индекс надежности в виде:

$$\beta = \frac{E[g]}{\sigma_g}, \quad (11)$$

где $E[g]$ – математическое ожидание функции $g(\tilde{x}_i)$;

σ_g – среднеквадратическое отклонение функции $g(\tilde{x}_i)$.

Данные параметры определяются с использованием классических методов математической статистики.

В соответствии с алгоритмом Хасофера – Линда для анализа надежности, коэффициенты чувствительности могут быть вычислены как:

$$\alpha_i = - \frac{\frac{\partial g}{\partial x_i} \sigma_{x_i}}{\left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial x_i} \sigma_{x_i} \right)^2 \right]^{1/2}}, \quad (12)$$

где σ_{x_i} – среднеквадратическое отклонение случайной величины \tilde{x}_i .

Затем вычисляются x^* - и u -координаты для функции предельного состояния $g(\tilde{x}_i)$:

$$x_i^* = E[x_i] + \beta \cdot \sigma_{x_i} \cdot \alpha_i, \quad (13)$$

$$u_i = \frac{x_i^* - E[x_i]}{\sigma_{x_i}}, \quad (14)$$

где $E[x_i]$ – математическое ожидание случайной величины \tilde{x}_i .

После чего строится новая функция предельного состояния $g(x_i^*)$, и определяется ее производная

$$\frac{\partial g(x_i^*)}{\partial x_i^*}.$$

Новый индекс надежности β^* можно определить в виде

$$\beta^* = \frac{g(x^*) - \sum \frac{\partial g(x^*)}{\partial x_i} \sigma_{x_i} u_i}{\left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g(x^*)}{\partial x_i} \sigma_{x_i} \right)^2 \right]^{1/2}}. \quad (15)$$

Если индекс надежности, рассчитанный по (15), близок к индексу надежности (11), то его принимают за итоговый результат. Если разница велика, алгоритм расчета повторяют по формулам (12)–(15) (начиная с координат x^* и получая в дальнейшем координаты x^{**}) до требуемой сходимости индекса надежности.

В статье предложены вероятностные подходы к вероятностной оценке надежности наклонных сечений деревянных балок.

Приведена информация о моделях деградации прочностных характеристик опорных участков балок, на основе которой можно рассчитывать срок службы балки до капитального ремонта или замены балки.

В простых линейных математических моделях допустимо использование метода двух моментов (FOSM, First Order Second Moment), а в нелинейных математических моделях рекомендуется использовать алгоритм Хасофера – Линда или метод SORM (Second Order Reliability Method).

Литература

1. Чемодуров, В. Т. Оптимизация и надежность строительных систем / В. Т. Чемодуров, М. С. Сеитжелилов // Строительство и техногенная безопасность. – 2017. – № 9 (61). – С. 83–86.
2. Перельмутер, А. В. Развитие требований к безотказности сооружений // Вестник ТГАСУ. – 2015. – №1 – С. 81–101.
3. Васильев А. И. Основы теории надежности мостов : учебное пособие / А. И. Васильев. – Москва : МАДИ, 2021. – 96 с.
4. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. – Введ. 01.07.2015. – Москва : Издательство стандартов, 2014. – 16 с.
5. Леденев, В. В. Аварии в строительстве. Т. 1. Причины аварий зданий и сооружений : учебное пособие / В. В. Леденев. – Тамбов : ТГТУ, 2014. – 210 с.

6. Пономарева, Н. Г. Анализ причин возникновения дефектов, влияющих на безопасность эксплуатации конструкций деревянных жилых домов / Н. Г. Пономарева, Н. В. Коровкина // Сетевое издание «Безопасность и охрана труда». – 2020. – № 4 (85). – С. 61–62.
7. Соловьева, А. А. Метод оценки надежности элементов плоских ферм на основе р-блоков / А. А. Соловьева, С. А. Соловьев // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16, № 2. – С. 153–167.
8. Соловьева, А. А. Исследование развития моделей случайных величин в расчетах надежности строительных конструкций при неполной статистической информации / А. А. Соловьева, С. А. Соловьев // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16, № 5. – С. 587–607.
9. Соловьева, А. А. Расчет надежности элементов стальных ферм по критерию устойчивости с использованием р-блоков / А. А. Соловьева, С. А. Соловьев // Строительная механика и расчет сооружений. – 2021. – № 1. – С. 45–53.
10. Соловьев, С. А. Анализ надежности элементов стальных ферм при интервальной оценке случайных величин / С. А. Соловьев, А. Э. Иньков, А. А. Соловьева // Вестник ВоГУ. – 2022. – № 1. – С. 53–57.
11. Solovev, S. Structural Reliability Analysis Using Evidence Theory and Fuzzy Probability Distributions / S. Solovev, A. Soloveva // Magazine of Civil Engineering. – 2021. – № 7 (107): 10704.
12. Xiao, Y. An Experimental Study on Shear Strength of Glulam / Y. Xiao, Y. Wu, J. Li & R. Z. Yang // Construction and Building Materials. – 2017. – № 150. – pp. 490–500.
13. Кургузов, К. В. Вероятностно-статистическое моделирование нагрузок и воздействий / К. В. Кургузов, И. К. Фоменко, Д. Д. Шубина // Вестник МГСУ. – 2020. – Т. 15, № 9. – С. 1249–1261.
14. Wang C. Probabilistic Procedure for Design of Untreated Timber Poles in-ground Under Attack of Decay Fungi / Wang C., Leicester R. H., Nguyen M. // Reliab Eng Syst Safety. – 2006. – № 93 (3). – pp. 476–481.
15. In Situ Measured Cross Section Geometry of Old Timber Structures and its Influence on Structural safety / Paulo B. Lourenco, Helder S. Sousa, Ricardo D. Brites, Luis C. Neves. // Materials and Structures. – DOI 10.1617/s11527-012-9964-5.
16. Hasofer. A. M. Exact and Invariant Second-Moment Code Format / A. M. Hasofer, N. C. Lind // Journal of the Engineering Mechanics division. – 1974. – V. 100, № 1. – pp. 111–121.

Yu.A. Inkova
Vologda State University

PROBABILISTIC ANALYSIS OF TIMBER BEAMS RELIABILITY BY SHEAR STRENGTH CRITERION

The article presents a probabilistic method for assessing the reliability of timber beams by the criterion of shear strength. Various design cases are examined with different numbers of random variables in the mathematical model of the limit state. Information is provided on the models of degradation of the strength characteristics of the beams support cross-sections, based on which it is possible to calculate the service life of the beam before major repairs or replacement of the beam. The method of probabilistic analysis for assessing reliability should be selected based on the degree of nonlinearity of the mathematical model of the limit state of a random variable, the level of variability of random variables and the quantity/quality of statistical data obtained during the survey. In simple linear mathematical models, it is permissible to use the two-moment method (FOSM, First Order Second Moment), and in non-linear mathematical models, it is recommended to use the Hasofer-Lind algorithm or the SORM (Second Order Reliability Method).

Reliability, strength, timber beam, failure probability, reliability index, shear.



АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ УЗЛОВ СТАЛЬНЫХ ФЕРМ ИЗ ГСП ПРИ ИНТЕРВАЛЬНОЙ ОЦЕНКЕ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН

В статье представлен новый подход к анализу надежности узлов стальных плоских ферм, основанный на использовании информации о границах изменчивости (интервалах) случайных величин. В классическом вероятностно-статистическом подходе к анализу надежности на практике зачастую используется ряд неподтвержденных статистических гипотез (о виде распределения, значениях параметров закона распределения и т.д.), что может привести к ошибочным результатам и выводам. В интервальном подходе предлагается базироваться только на интервальных оценках границ изменчивости случайных величин. Информация о надежности узлов фермы является необходимой для комплексного анализа надежности фермы как последовательной механической системы. Аналогично может быть решена обратная задача, например оценка допусков площади поперечного сечения стержней при производстве, исходя из требований заданной надежности (вероятности безотказной работы).

Надежность, вероятность отказа, интервальная оценка, теория выпуклых множеств, ферма, вероятностное проектирование.

Надежность является объективной количественной оценкой безопасности запроектированной или эксплуатируемой конструкции. В соответствии со стандартом Eurocode 0 Basis of Structural Design надежность обычно выражается в вероятностных терминах. Понятие вероятности отказа напрямую связано с понятием риска. Понятие риска, в свою очередь, является ключевым в обеспечении механической безопасности зданий и сооружений по Федеральному Закону РФ № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений». Так, в соответствии с Законом № 384-ФЗ, механическая безопасность – «состояние строительных конструкций и основания здания или сооружения, при котором отсутствует недопустимый риск...».

Как отмечают специалисты НИЦ «Строительство» [1], «В настоящее время в отечественной нормативной базе отсутствует возможность применения риск-ориентированного подхода при расчете строительных конструкций, основанного на методиках расчета строительных конструкций вероятностными методами. В процессе изучения нормативной базы установлено, что в последние два года введен в действие большой массив международных стандартов в виде стандартов ГОСТ Р ИСО по оценке рисков в строительстве. Эти стандарты не входят в перечень норм, требования которых обеспечивают соблюдение требований Федерального закона № 384-ФЗ на обязательной или добровольной основе. Представляется, что применение указанных стандартов в принятом виде с целью оценки рисков на практике будет весьма

затруднительно. С учетом этого необходимой представляется разработка именно методической базы вероятностных расчетов строительных конструкций и оценки рисков в части их практического применения на территории нашей страны с учетом имеющейся специфики отечественного процесса проектирования, строительства и эксплуатации».

Актуальность вероятностных расчетов надежности подтверждает и профессор Ю.В. Краснощеников, отмечая, что «существует тенденция к постепенному переходу к вероятностным методам расчета, поскольку путь обеспечения надежности зависит от огромного числа факторов, связанных с эксплуатацией конструкции и влияние которых невозможно оценить частными коэффициентами метода предельных состояний. К тому же полувероятностный метод предельных состояний, который регламентирует ГОСТ 27751, не дает ответа на вопрос, насколько конструкция надежна» [2].

Одной из тенденций научных исследований в области надежности строительных конструкций последних лет является использование неклассических методов анализа надежности, которые моделируют неопределенность в иной форме, нежели стандартные вероятностно-статистические методы: р-блоки [3–7], теория выпуклых множеств [8–11] и др. В данной работе предлагается рассмотреть подход к оценке надежности узлов стальных плоских ферм при интервальной неопределенности данных, т.к. классические вероятностные методы не позволяют решить данную проблему при таком виде неопределенности.

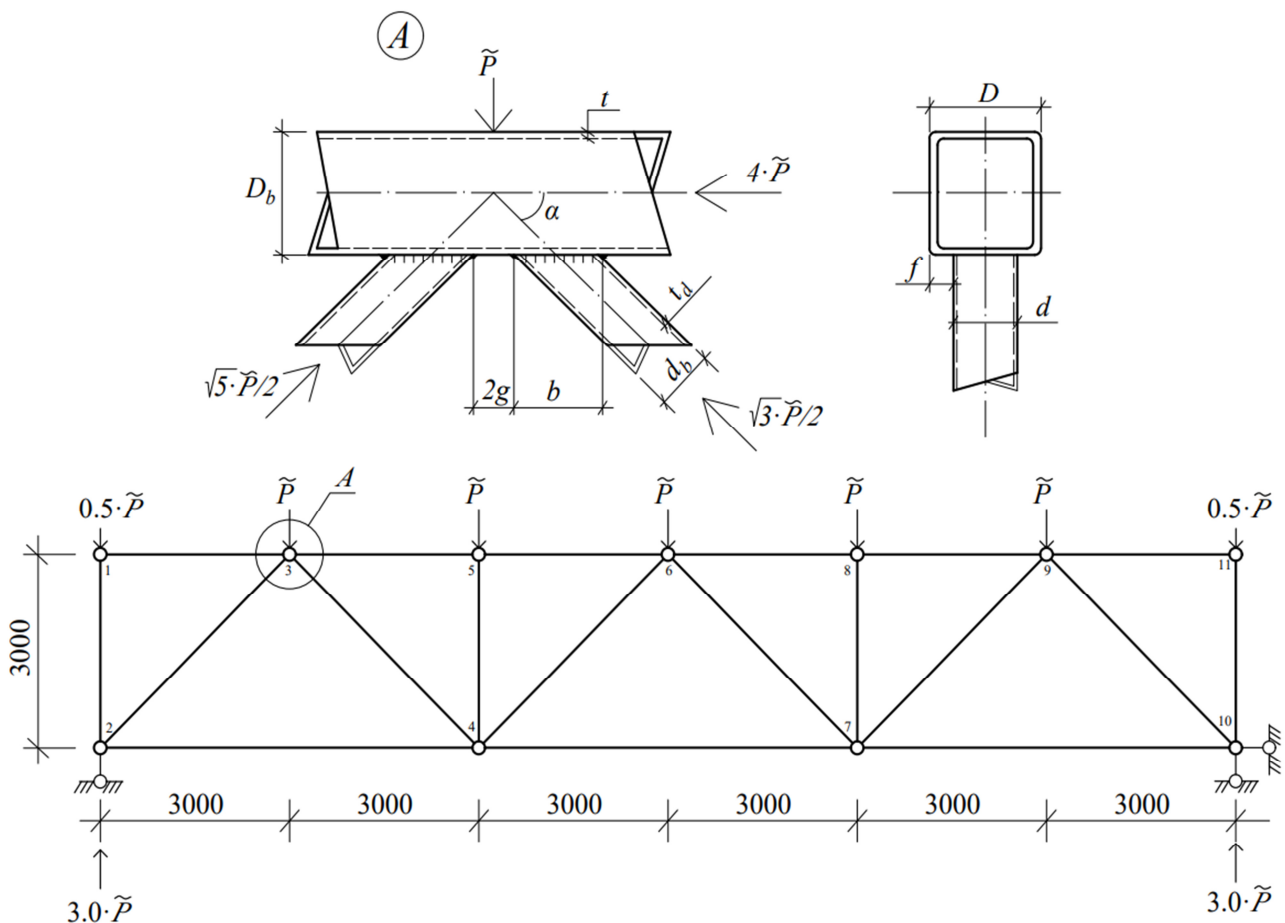


Рис. 1. Пример расчетной схемы фермы и геометрические параметры ее узла

Исследование надежности узлов ферм является актуальной научной задачей вследствие опыта аварий, произошедших из-за отказа узловых соединений ферм. Так, в 1957 году произошло обрушение сварной стропильной фермы в прокатном цехе магнитогорского металлургического комбината при отказе опорных узлов фермы в месте крепления к колонне. В 1955 году произошло обрушение стропильных ферм в прессовом цехе металлургического завода имени Ленина в г. Куйбышеве, в 2005 году произошло обрушение покрытия бассейна «Дельфин» в г. Чусовой.

Расчет узлов ферм из гнутосварных профилей (ГСП) регламентируется стандартом СП 294.1325800.2017 «Конструкции стальные. Правила проектирования».

Например, по п. 14.3.2 СП 294 в случае одностороннего примыкания к поясу двух или более элементов решетки с усилиями разных знаков (рис. 1), а также одного элемента в опорных узлах при $d/D < 0,9$ и $g/b < 0,25$ несущую способность стенки пояса следует проверять для каждого примыкающего элемента по формуле:

$$\left(N + \frac{1,5M}{d_b} \right) \frac{(0,4 + 1,8g/b) \cdot f \cdot \sin \alpha}{\gamma_c \cdot \gamma_d \cdot \gamma_D \cdot R_y \cdot t^2 \cdot (b + g + \sqrt{2Df})} \leq 1, \quad (1)$$

где N – продольная сила; M – изгибающий момент; R_y – расчетное сопротивление стали элемента пояса; остальные параметры приведены на рисунке 1.

Основными случайными величинами на первом этапе анализа надежности фермы выделим узловую нагрузку на ферму \tilde{P} и прочность стали элементов фермы $\tilde{\sigma}_y$. Изгибающий момент в узле будем считать величиной малоизменчивой и учитывать в расчете как детерминированную (постоянную) величину. Тогда математическую модель предельного состояния (1) можно записать как:

$$\left(N(\delta\tilde{P}) + \frac{1,5M}{d_b} \right) \frac{(0,4 + 1,8g/b) \cdot f \cdot \sin \alpha}{\gamma_c \cdot \gamma_d \cdot \gamma_D \cdot t^2 \cdot (b + g + \sqrt{2Df})} \leq \tilde{\sigma}_y, \quad (2)$$

где δ – коэффициент, зависящий от геометрических размеров фермы [3].

Несущую способность элементов пояса других типов узлов, а также элементов решетки можно определить по схожим формулам, которые в общем виде можно обозначить как:

$$N(\delta\tilde{P})c_1 + c_2 \leq \tilde{\sigma}_y, \quad (3)$$

где c_1 и c_2 – коэффициенты, зависящие от размеров и расположения элементов фермы.

Аналогичные математические модели предельного состояния можно найти, например, в зарубежном стандарте «Design Guide for Rectangular Hollow Section (RHS) Joints under Predominantly Static Loading» [12].

Введем обозначения: $N(\delta\tilde{P})c_1 + c_2 = S$, $\tilde{\sigma}_y = R$.

Случайные величины S и R будут представлять собой интервалы, которые характеризуют границы их изменчивости. Границы изменчивости прочности стали элемента пояса R можно получить из допусков по технической документации производителя профиля или по результатам статистического анализа данных при обследовании. Границы изменчивости узловой нагрузки \tilde{P} получаются путем представления составляющих в интервальной форме и их суммирования.

Для получения интервала изменчивости параметра S необходимо отметить базовые принципы арифметических действий с интервальными параметрами:

$$\begin{aligned} [a] + [b] &= [\underline{a}, \bar{a}] + [\underline{b}, \bar{b}] = [\underline{a} + \underline{b}, \bar{a} + \bar{b}] \\ [a] - [b] &= [\underline{a}, \bar{a}] - [\underline{b}, \bar{b}] = [\underline{a} - \bar{b}, \bar{a} - \underline{b}] \\ [a] \cdot [b] &= [\min\{\underline{a}\underline{b}, \underline{a}\bar{b}, \bar{a}\underline{b}, \bar{a}\bar{b}\}, \max\{\underline{a}\underline{b}, \underline{a}\bar{b}, \bar{a}\underline{b}, \bar{a}\bar{b}\}] \\ [a]/[b] &= a \cdot [1/\underline{b}, 1/\bar{b}] \text{ для } b \neq 0 \\ [a] + c &= [\underline{a}, \bar{a}] + c = [\underline{a} + c, \bar{a} + c] \end{aligned}$$

Также возможно и аналитическое решение данной задачи. Так, в [13] приводится аналитическая формула для определения вероятности безотказной работы в данном случае:

$$P(A \leq B) = \max \left\{ \frac{\min(A^R - A^L, B^R - A^L) \times [\max(0, B^R - A^L) + \max(0, B^R - A^R)]}{[2 \operatorname{sgn}(0, 5 + \operatorname{sgn}(A^L - B^L))]} \right\}, \quad (5)$$

$$1 - \frac{[\min(A^R - B^L, B^R - B^L) \times (\max(0, A^R - B^L) + \max(0, A^R - B^R))]}{[2(A^R - A^L) \times (B^R - B^L)]}$$

где A^L, B^L и A^R, B^R – левая (L) и правая (R) границы интервалов A и B .

После получения границ изменчивости S и R , их можно представить в системе координат, как указано на рисунке 2. Плоскость отказа будет характеризоваться зависимостью $R=S$ и будет откладываться из начала координат под углом 45° . Площадь, отсекаемая плоскостью отказа от прямоугольника, называется областью отказа $A_{failure}$. Оставшаяся площадь прямоугольника представляет собой область безотказной работы A_{safe} . Отношение площади области безотказной работы к общей площади прямоугольника будет представлять собой оценку вероятности безотказной работы:

$$P = \Pr(S \leq R) = \frac{A_{safe}}{A}. \quad (4)$$

Такая задача может быть решена графически, например, в графическом редакторе.

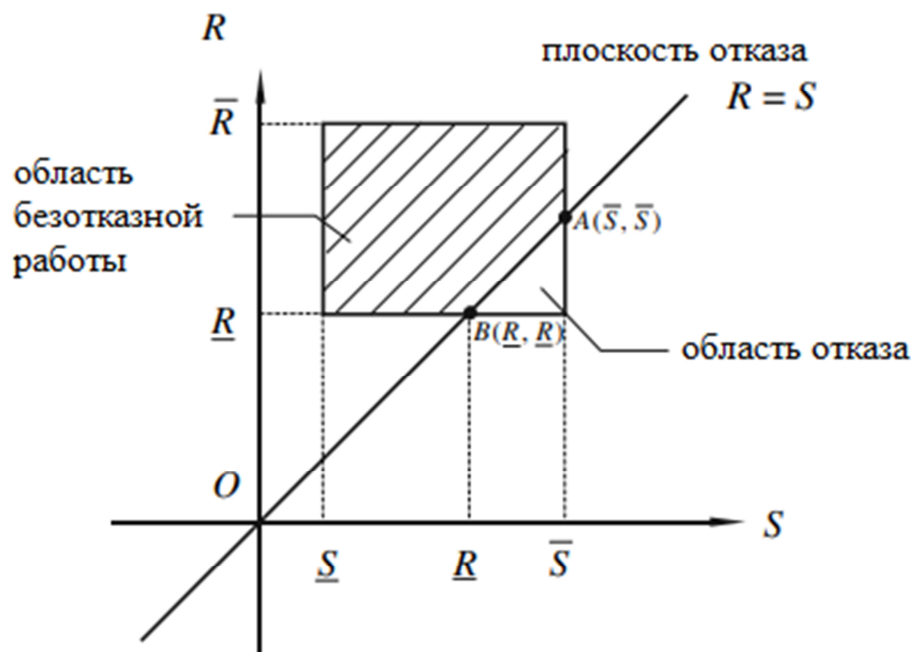


Рис. 2. Графический подход к определению вероятности безотказной работы узла фермы

Для получения расчетной оценки надежности рассматриваемого узла необходимо выполнить анализ надежности по всем критериям предельного состояния для всех элементов узла. Затем, в соответствии с теорией интервального анализа надежности [14], в качестве расчетного значения принимается минимальное значение надежности из подмножества. При наличии значений вероятностей безотказной работы для всех элементов и узлов фермы можно сделать выводы об уровне ее безопасности, а также сравнить различные проектные решения по критерию безопасности эксплуатации.

В статье разработан новый подход к анализу надежности узлов стальных ферм из гнущихся профилей при интервальной оценке случайных параметров. Значения вероятности безотказной работы узлов необходимы для комплексного анализа надежности фермы как последовательной механической системы. Преимуществом подхода является отсутствие необходимости подтверждения статистических гипотез о виде распределения и его параметрах.

Литература

1. Зенин, С. А. Исследование и анализ методов выполнения вероятностных расчетов строительных конструкций / С. А. Зенин [и др.] // Вестник НИЦ «Строительство». – 2020. – № 1. – С. 46–53.
2. Краснощеков, Ю. В. Вероятностный расчет строительных конструкций с учетом асимметрии распределения случайных величин и функций / Ю. В. Краснощеков // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2020. – Т. 17. – № 5 (75). – С. 636–650.
3. Соловьева, А. А. Метод оценки надежности элементов плоских ферм на основе р-блоков / А. А. Соловьева, С. А. Соловьев // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16. – № 2. – С. 153–167.
4. Соловьева, А. А. Исследование развития моделей случайных величин в расчетах надежности строительных конструкций при неполной статистической информации / А. А. Соловьева, С. А. Соловьев // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16. – № 5. – С. 587–607.
5. Соловьева, А. А. Расчет надежности элементов стальных ферм по критерию устойчивости с использованием р-блоков / А. А. Соловьева, С. А. Соловьев // Строительная механика и расчет сооружений. – 2021. – № 1 (294). – С. 45–53.
6. Соловьева, А. А. Разработка уточненного р-блока как модели случайной величины в задачах анализа надежности строительных конструкций / А. А. Соловьева, С. А. Соловьев // Строительная механика и расчет сооружений. – 2022. – № 1 (300). – С. 20–28.
7. Solovev, S. A. Structural Reliability Analysis Using Evidence Theory and Fuzzy Probability Distributions / S. A. Solovev, A. A. Soloveva // Magazine of Civil Engineering. – 2021. – No. 7 (107). – pp. 10704.
8. A Nonprobabilistic Set Model of Structural Reliability Based on Satisfaction Degree of Interval / H. Z. Huang, Z. L. Wang, Y. F. Li [et al.] // Mechanika. – 2011. – Vol. 17 (1). – pp. 85–92.
9. Ben-Haim, Y. Convex Models of Uncertainties in Applied Mechanics / Y. Ben-Haim, I. Elishakoff. – Amsterdam: Elsevier, 1990. – 240 p.
10. A Non-probabilistic Structural Reliability Analysis Method Based on a Multidimensional Parallelepiped Convex Model / C. Jiang, Q. F. Zhang, X. Han [et al.] // Acta Mechanica. – 2014. – Vol. 225 (2). – pp. 383–395.
11. Straub, D. Probabilistic Modeling of Non-destructive Testing of Steel Structures / D. Straub // Proceedings 4th International PhD Symposium in Civil Engineering, Munich. – 2002. – Vol. 2. – pp. 311–320.
12. Design Guide for Rectangular Hollow Section (RHS) Joints under Predominantly Static Loading / J. A. Packer, J. Wardenier, X.-L. Zhao., G.J. van der Vegte, Y. Kurobane // CIDECT. – 2009. – 149 p.
13. Qi, W. C. Non-probabilistic Reliability-Based Structural Design Optimization Based on Interval Analysis Methods / W. C. Qi, Z. P. Qiu // Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica. – 2013. – Vol. 43 (1). – pp. 85–93.
14. Structural Reliability Analysis Using Non-probabilistic Convex Model / C. Jiang, R. G. Bi, G. Y. Lu, X. Han // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2013. – Vol. 254. – pp. 83–98.

A.E. Inkov

Vologda State University

RHS STEEL TRUSSES RELIABILITY ANALYSIS BASED ON RANDOM VARIABLES INTERVAL ESTIMATIONS

The article presents a new approach to reliability analysis of steel trusses based on the data about the variability limits (intervals) of random variables. In the classical probabilistic-statistical approach to reliability analysis, in practice, a number of unconfirmed statistical hypotheses are often used (about the type of distribution, the values of the parameters of the distribution function, etc.), which can lead to erroneous results and conclusions. In the interval approach, it is proposed to be based only on interval estimates of the limits of variability of random variables. The information about the reliability of the truss joints is necessary for a comprehensive analysis of the truss reliability as a sequential mechanical system. Similarly, the inverse problem can be solved, for example, estimating the tolerances of the cross-sectional area of the bars during production, based on the requirements of a given reliability (probability of non-failure).

Reliability, failure probability, interval estimation, convex sets, truss, probabilistic design.



СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ПО РАСЧЕТУ ТРЕБУЕМОЙ МОРОЗОСТОЙКОСТИ НАРУЖНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ

В статье рассмотрены существующие методы расчета требуемой морозостойкости наружных ограждающих конструкции. Выполнен анализ научных трудов, в которых исследуются долговечность, энергоэффективность, безопасность наружных ограждающих конструкции из различных строительных материалов. Произведена оценка существующей нормативной литературы, связанной с темой данного исследования.

Требуемая морозостойкость, ограждающие конструкции, расчет морозостойкости, долговечность.

Долговечность наружных ограждающих конструкций в регионах с низкой температурой окружающей среды в первую очередь необходимо определять по их морозостойкости. Исходя из того, что на показатель морозостойкости облицовочных материалов влияет регион строительства, конструктивное решение ограждающих конструкций, температурный режим помещения и другие факторы, возникает необходимость в разработке метода определения требуемой морозостойкости наружного слоя.

Разработка метода расчета требуемой морозостойкости наружных ограждающих конструкций позволит обеспечить создание безопасных условий для людей, энергосбережение, увеличение срока безремонтной эксплуатации наружной ограждающей конструкции здания.

Ограждающие конструкции являются важной частью зданий, которые должны обеспечивать энергоэффективность зданий и комфортные условия в помещении на весь срок его эксплуатации. Однако в настоящее время проектный комплекс не располагает методами расчета требуемой морозостойкости наружных ограждающих конструкций.

Долговечность облицовочного слоя трехслойных кирпичных стен с применением утеплителя толщиной 120–150 мм ниже, чем долговечность аналогичных конструкций с применением утеплителя толщиной 50 мм. Это связано с тем, что большая толщина утеплителя приводит к большим температурным деформациям, и к большим напряжениям в толще облицовочного кирпича, данные факторы способствуют ускоренному разрушению наружного слоя [1, 2].

Разрушение облицовочной кладки также происходит в связи с низким качеством работ и ошибках при проектировании, которые возникали в том числе и из-за отсутствия методов расчета узлов сопряжения конструкций. Некоторые дефекты проявляются на самых ранних этапах эксплуатации здания (до 5 лет) [3, 4]. Часто в России применяют пустотелый лицевой кирпич в условиях, не соответствующих его области применения. Даже выполнение ремонтов таких фасадов не приводит к остановке отслоения и падения облицовочного кирпича, которые представляют большую опасность для людей. Применение облицовочного кирпича повышенной морозостойкости позволяет увеличить долговеч-

ность наружного слоя трехслойных стен с повышенным уровнем теплоизоляции [4].

Отличающееся расположение пустот в лицевых керамических материалах в тычковом и ложковом направлениях создает в облицовочном слое участки с пониженными теплозащитными свойствами и повышенной паропроницаемостью. Повышенная паропроницаемость приводит к концентрации влаги на внутренней поверхности облицовочного слоя кирпича, как следствие, к переувлажнению и преждевременному разрушению [5, 6].

Исходя из этого, А.Ю. Ионов и В.Д. Котляр представили конструкцию кирпича с расположением пустот таким образом, чтобы их коэффициенты теплопроводности и паропроницаемости были одинаковыми в тычковом и ложковом направлениях (рис. 1) [7].

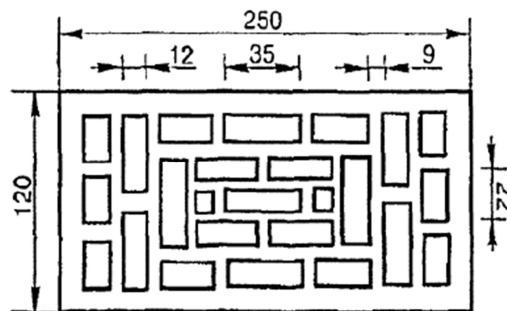


Рис. 1. Конструкция лицевого кирпича с рациональным расположением пустот

На данный момент существует несколько методик расчета количества циклов перехода через ноль для различных конструкций стен. В [8] представлена одна из таких методик. В ее основу положено решение дифференциального уравнения теплопроводности Фурье, определяющее одномерную теплопередачу при нестационарных условиях при постоянных коэффициентах методом конечных разностей. При разработке методики необходимо правильно оценивать скорость разрушения материалов, входящих в состав конструкции. Морозостойкость является основным критерием долговечности в северных широтах. В связи с этим возникает необходимость в определении и учете количества циклов перехода температуры через ноль в сечениях, расположенных на разной глубине ограждающей конструкции [8].

Сравнение СП 15.13330.2020 и СП 15.13330.2012

Вид конструкций	Значение морозостойкости (F) кладочных материалов при предполагаемом сроке службы конструкций, лет (СП 2020 года)			Значение морозостойкости (F) кладочных материалов при предполагаемом сроке службы конструкций, лет (СП 2012 года)		
	100	50	25	100	50	25
1. Лицевой слой кладки наружных однослойных стен в зданиях с влажностным режимом помещений:						
а) сухим и нормальным,	25	25	25	25	25	15
б) влажным,	35	25	25	35	25	15
в) мокрым	50	35	25	50	35	25
2. Лицевой слой кладки двухслойных стен при плотности кладки внутреннего слоя 1400 кг/м ³ и более в зданиях с влажностным режимом помещений:						
а) сухим и нормальным,	25	25	25	25	25	15
б) влажным,	35	25	25	35	25	15
в) мокрым	50	35	25	50	35	25
3. Лицевой слой кладки двухслойных стен при плотности кладки внутреннего слоя менее 1400 кг/м ³	35	25	15	35	25	15
4. Внутренний слой кладки двухслойных стен при плотности кладки внутреннего слоя менее 1400 кг/м ³ и толщине лицевого слоя 120 мм и менее	25	25	15	25	25	15
5. Наружные трехслойные стены с эффективным утеплителем:						
а) лицевой слой кладки толщиной 120 мм,	50	35	25	50	35	15
б) лицевой слой кладки толщиной 250 мм и более	35	25	15	35	25	15
6. Фундаменты, цоколи и подземные части стен:						
а) из бетонных блоков, кирпича керамического пластического формования полнотелого (в т.ч. клинкерного), силикатных блоков прочностью М200 и более,	100	50	25	100	50	25
б) из природного камня	35	25	25	35	25	25

В [9] представлен методологический подход, разработанный на форме представления климатических данных в виде типового года с почасовым изменением параметров. Такой подход позволяет установить количество переходов через ноль в толще и на поверхности облицовочного кирпича при изменяющихся внешних климатических условиях. Главным достоинством данного метода можно считать его высокую точность определения количества циклов перехода через ноль. К недостаткам же можно отнести то, что он основан на почасовых параметрах типового года. Такие данные невозможно получить в открытых источниках, а их сбор является дорогостоящим, что не позволяет широко применять данный метод при проектировании зданий и сооружений.

При разработке метода расчета требуемой морозостойкости наружных ограждающих конструкции, т.е. определения предельного количества циклов замораживания-оттаивания, при котором конструкция ограждения будет выполнять свои функции без ухудшения характеристик, также необходимо оценить уже существующие нормативные требования.

В новой редакции СП 15.13330 «Каменные и армокаменные конструкции» от 2020 года были расширены возможности применения в строительстве многослойных ограждающих конструкций, а также ужесточены требования по морозостойкости при предполагаемом сроке службы конструкций в 25 лет (табл.).

Повышение требований к морозостойкости лицевых кладочных материалов было вызвано тем, что последнее время все чаще можно наблюдать преждевременное разрушение керамического лицевого кирпича и камня (рис. 2).



Рис. 2. Разрушение облицовочного слоя из лицевого пустотелого керамического кирпича в 10-этажном жилом доме (Вологда, ул. Старое шоссе)

Также стоит отметить, что в СП15.13330.2020 указано требуемое значение морозостойкости кладочных материалов в зависимости от конструктивного решения ограждения и от предполагаемого срока службы конструкции. Однако нужно отметить, что подобное требование к морозостойкости нельзя считать корректным, т.к. в данном случае не уделяется внимание температуре наружного воздуха. Россия является самой большой (по площади) страной в мире, где средние температуры января могут значительно отличаться в зависимости от климатического пояса (в соответствии с СП 131.13330.2020 средние температуры января находятся в диапазоне от $-46,2^{\circ}\text{C}$ до $+6,1^{\circ}\text{C}$), поэтому применение одного параметра, жестко регламентирующего требуемую морозостойкость, является нерациональным с экономической точки зрения.

В ГОСТ 13996-2019 «Плитки керамические. Общие технические условия» также были увеличены требования по морозостойкости с 40–50 циклов (в сравнении с ГОСТ 13996-93) до 100 циклов для всех групп плитки, используемой снаружи. Для определения морозостойкости данный ГОСТ ссылается на ГОСТ 27180-2019 «Плитки керамические. Методы испытаний».

В соответствии с СП 70.13330.2012 «Несущие и ограждающие конструкции» контроль морозостойкости бетона выполняется по ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости», используя образцы по ГОСТ 28570-2019 «Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобранным из конструкций».

В ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости» приведены базовые методы при многократном замораживании и оттаивании.

ГОСТ 379-2015 «Кирпич, камни, блоки и плиты перегородочные силикатные» и ГОСТ 530-2012 «Кирпич и камень керамические» для определения морозостойкости кирпича, камня керамического и силикатного ссылаются на ГОСТ 7025-91 «Кирпич и камни керамические силикатные. Методы определения водопоглощения, плотности и контроля морозостойкости».

В ГОСТ 7025-91 «Кирпич и камни керамические силикатные. Методы определения водопоглощения, плотности и контроля морозостойкости» контроль морозостойкости выполняется при объемном и одностороннем замораживании.

В ГОСТ 30629-2011 «Материалы и изделия облицовочные из горных пород. Методы испытаний» представлен метод определения морозостойкости горных пород, сущность метода заключается в определении потери прочности горной породы после заданного числа циклов попеременного замораживания и оттаивания по сравнению с прочностью водонасыщенного образца.

В последних редакциях нормативных документов требования к морозостойкости наружных ограждений увеличивались, вероятно, что основанием для этого было разрушение лицевого слоя различных видов многослойных конструкций. Несмотря на это отсут-

ствует нормативная литература, в которой представлен метод определения и расчета требуемой морозостойкости в зависимости от региона и конструкции наружного ограждения здания.

На данный момент есть необходимость в разработке относительно простого метода определения требуемой морозостойкости ограждающей конструкции, который будет учитывать не только предположительный срок эксплуатации здания, но и температуру наружного воздуха. Новый подход в расчете требуемой морозостойкости должен быть доступен и удобен для проектировщиков, его внедрение в проектный комплекс позволит обеспечить безопасные условия для людей, энергосбережение, увеличение срока безремонтной эксплуатации ограждающей конструкции здания.

Литература

1. Умнякова, Н. П. Долговечность трехслойных стен с облицовкой из кирпича с высоким уровнем тепловой защиты / Н. П. Умнякова // Вестник МНСУ. – 2013. – № 1. – С. 94–100.
2. Лобов, О. И. Энергоэффективность, долговечность и безопасность наружных стен зданий из керамических материалов / О. И. Лобов, А. И. Ананьев, А. А. Ананьев // Строительные материалы. – 2010. – № 4. – С. 10–14.
3. Ананьев, А. И. Долговечность и энергоэффективность наружных стен из облегченной кирпичной кладки / А. И. Ананьев, А. А. Ананьев // Academia. Архитектура и строительство. – 2010. – № 3. – С. 352–356.
4. Лобов, О. И. Долговечность облицовочных слоев наружных стен многоэтажных зданий с повышенным уровнем теплоизоляции / О. И. Лобов, А. И. Ананьев // Строительные материалы. – 2008. – № 4. – С. 56–59.
5. Ананьев, А. А. Долговечность лицевого керамического кирпича и камня в наружных стенах зданий / А. А. Ананьев, В. В. Козлов, Г. Я. Дуденкова, А. И. Ананьев // Строительные материалы. – 2007. – № 2. – С. 56–59.
6. Казаченко, В. П. Решение проблемы долговечности облицовочных слоев наружных стен многоэтажных зданий с повышенным уровнем теплоизоляции / В. П. Казаченко, А. Н. Комиссаров // Стены и фасады. – 2008. – № 3. – С. 52.
7. Ионов, А. Ю. Влияние расположения пустот в керамическом кирпиче на его долговечность / А. Ю. Ионов, В. Д. Котляр // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. – 2016. – № 1. – С. 19–23.
8. Желдаков, Д. Ю. Сегментный метод расчета распределения температуры по сечению ограждающей конструкции здания / Д. Ю. Желдаков, А. А. Фролов // Жилищное строительство. – 2017. – № 6. – С. 36–39.
9. Умнякова, Н. П. Расчет колебаний температуры в кирпичной облицовке трехслойных стен на основе почасовых параметров типового климатического года / Н. П. Умнякова // Строительные материалы. – 2016. – № 8. – С. 45–50.

P.S. Lavrentyev
Vologda State University

**STATE OF THE ART ON CALCULATION OF EXTERNAL FENCING BUILDINGS STRUCTURES
REQUIRED FROST RESISTANCE**

The article considers the existing methods for calculating the required frost resistance of external enclosing structures. An analysis of scientific papers, in which the durability, energy efficiency, and safety of external enclosing structures made of various building materials are studied, has been carried out. The assessment of the existing normative literature related to the topic of this study was made.

Required frost resistance, enclosing structures, calculation of frost resistance, durability.



ВЕРОЯТНОСТНЫЙ РАСЧЕТ НОРМАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ ДЕРЕВЯННЫХ БАЛОК НА ЗАДАННЫЙ ИНДЕКС НАДЕЖНОСТИ

Ключевым требованием при проектировании несущих элементов сооружений является обеспечение их механической безопасности. В статье разработаны подходы к вероятностному проектированию деревянных балок на заданный индекс надежности. Рассмотрены различные расчетные ситуации с различными комбинациями случайных величин в математических моделях предельных состояний. Рост числа случайных величин приводит к снижению надежности вследствие возрастания алеаторной неопределенности модели. Увеличение степени нелинейности математической модели предельного состояния приводит к росту вычислительной ошибки алгоритма FOSM (First Order Second Moment). Для более достоверной оценки необходимо использовать алгоритм FORM (First Order Reliability Method). Преимуществом разработанных подходов является то, что они могут быть использованы при оценке безопасности эксплуатируемых балок без необходимости введения коэффициентов надежности или коэффициентов запаса.

Надежность, прочность, деревянная балка, вероятность отказа, индекс надежности, нормальные сечения.

Надежность – один из главных показателей качества строительной продукции, характеризующий безопасность эксплуатации строительных конструкций. Развитие методов оценки надежности строительных конструкций, в т.ч. деревянных, является принципом обеспечения механической безопасности на основе Федерального Закона РФ № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений». Профессора И.И. Ведяков и К.П. Пятикрестовский, внесшие значительный вклад в развитие норм расчета и проектирования в т.ч. деревянных конструкций, отмечают [1] предложения о включении в нормы проектирования расчеты на надежность и живучесть, основанные на совместной работе элементов и несущих каркасов.

Для развития деревянного домостроения в Вологодской области в прошлом году утвердили паспорт регионального стратегического проекта «Кластер деревянного домостроения». Его основная задача – увеличить объемы малоэтажного и многоэтажного строительства через ввод новых мощностей и продуктов, привлечение учебной и научной базы региональных высших учебных заведений, расширение внедрения добровольной сертификации и повышение квалификации кадров, использование различных региональных форм поддержки развития индивидуального домостроения. В соответствии с паспортом регионального кластера Вологодской области «Кластер деревянного домостроения» к 2024 году объем ввода жилья, построенного населением, составит 0,279 миллионов квадратных метров, а доля жилья, построенного с применением древесины, от общего объема ввода жилья, построенного населением, составит 81 %.

В данной статье предлагается исследовать подходы к вероятностному проектированию деревянных балок на заданный индекс надежности. В качестве

критерия предельного состояния принята прочность нормальных сечений элемента. Для комплексной оценки надежности необходима разработка методов расчета надежности по всем нормативным критериям предельных состояний и последующая системная оценка надежности элемента.

Математическая модель предельного состояния по критерию прочности нормальных сечений в соответствии с СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции» может быть записана в виде:

$$\frac{M}{W_{расч}} \leq R_u, \quad (1)$$

где M – расчетный изгибающий момент;

$W_{расч}$ – расчетный момент сопротивления поперечного сечения элемента; для цельных элементов $W_{расч} = W_{нт}$,

где $W_{нт}$ – момент сопротивления поперечного сечения нетто;

R_u – расчетное сопротивление древесины при изгибе.

Рассмотрим расчетный случай однопролетной балки на шарнирных опорах при равномерно распределенной нагрузке q .

В этом случае расчетный изгибающий момент будет $M = \frac{ql^2}{8}$, где l – пролет балки.

Пусть в первом варианте расчета балки на заданный уровень надежности случайной величиной является только нагрузка. Такой вариант возможен на стадии проектирования элемента, когда нет возможности получить информацию о качестве древесины балки. В таком варианте элемент должен быть про-

анализирован на надежность повторно после его введения в составе зданий и сооружений.

С учетом вышеизложенного, математическую модель предельного состояния (1) можно переписать в виде:

$$\tilde{q} \leq \frac{8R_u W_{nm}}{l^2}, \quad (2)$$

где \tilde{q} – равномерно распределенная нагрузка на балку (случайная величина).

Если балка находится в составе перекрытия (на нее не действует снеговая нагрузка), то, как правило, все составляющие расчетной нагрузки могут быть описаны нормальным распределением. Так, в соответствии с п. С6 Еврокода 0 для оценки целевых индексов надежности используются нормальные распределения собственного веса и нормальные распределения временных воздействий для всех расчетов кроме усталостных (в данном случае более корректным является использование распределений экстремальных значений).

В стандарте Joint Committee on Structural Safety Probabilistic Model Code (2001) также отмечается, что «удельный вес и размеры элемента конструкции подчиняются гауссовскому распределению. Для упрощения расчетов в качестве приближения может быть сделано допущение о том, что собственный вес G распределяется по гауссовскому закону».

С учетом того, что расчетная нагрузка включает в себя несколько составляющих, математическая модель предельного состояния может быть записана как:

$$\sum_{i=1}^n \tilde{q} \leq \frac{8R_u W_{nm}}{l^2}, \quad (3)$$

где n – количество видов нагрузок, входящих в расчетную нагрузку.

Индекс надежности β вычисляется по формуле (3) в виде:

$$\beta = \frac{\frac{8R_u W_{nm}}{l^2} - \sum_{i=1}^n m_{q,i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n S_{q,i}^2}}, \quad (4)$$

где $m_{q,i}$ – математическое ожидание i -ой нагрузки;

$S_{q,i}$ – среднеквадратическое отклонение i -ой нагрузки.

Т.к. классически задача расчета деревянной балки заключается в поиске размеров поперечного сечения при заданной нагрузке и расчетном сопротивлении, выразим из уравнения (4) момент сопротивления балки:

$$W_{nm} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n S_{q,i}^2} \cdot \beta + \sum_{i=1}^n m_{q,i}}{8 \cdot R_u} \cdot l^2. \quad (5)$$

Рассмотрим пример. Пусть требуется запроектировать деревянную балку с индексом надежности, находящимся в интервале $\beta \in [3,5; 4,1]$. Значение

индекса надежности менее 3,5 условно не допускается вследствие низкого уровня безопасности эксплуатации, значение индекса надежности более 4,1 условно не допускается вследствие нерационального расхода материала.

Пусть известно, что требуемый пролет балки $l=3,6$ м; расчетное сопротивление древесины $R_u = 10,4$ МПа (сосна, II сорт).

Информация о нагрузках приведена в таблице 1.

Таблица 1

Статистические данные по нагрузкам q_i

№, i	Вид нагрузки	$m_{q,i}$, Н/м	$S_{q,i}$, Н/м	$S_{q,i}^2$, Н ² /м ²
1	Технологическая нагрузка	2500	300	90000
2	Нагрузка от настила на балку	1000	100	10000
3	Звукоизоляция	300	20	400
4	Вес перегородки	500	30	900
Сумма		4300	-	101300

Подставляя нижнее и верхнее значение индекса надежности в (5), получим допустимый интервал момента сопротивления сечения балки:

$$W_{nm} \in [843,33; 873,10] \text{ см}^3.$$

В соответствии с сортаментом пиломатериала по ГОСТ 24454-80 «Пиломатериалы хвойных пород. Размеры» рассмотрим наиболее близки варианты поперечных сечений к заданным (табл. 2).

Таблица 2

Варианты сечений и моментов их сопротивления

Сечение, см	22,5×1 0,0	20,0×1 5,0	17,5×1 7,5	27,5×7, 5	22,5×1 2,5
Момент сопротивления нетто W_{nm} , см ³	843,8	1000,0	893,2	945,13	1054,6 9

С первоначальной позиции, вариант сечения 225×100 мм является оптимальным. Однако в расчете не был учтен собственный вес балки. Поэтому при выборе типа сечения необходимо сделать небольшой запас для учета этого фактора.

Примем сечение 175×175 мм. Пусть плотность древесины принятой 500 кг/м³. Тогда погонный метр балки весит:

$$q_{s-w} = 0,175 \cdot 0,175 \cdot 500 = 15,31 \text{ кг/м} = 153,1 \text{ Н/м}.$$

Вычислим уточненный индекс надежности по формуле:

$$\beta = \frac{\frac{8R_u W_{nm}}{l^2} - \sum_{i=1}^n m_{q,i} - q_{s-w}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n S_{q,i}^2}}. \quad (6)$$

По (6) индекс надежности составит $\beta = 4,03$.

Если принять сечение 225×100 мм, то вес погонного метра такой балки составит:

$$q_{s-w} = 0,225 \cdot 0,100 \cdot 500 = 11,25 \text{ кг/м} = 112,5 \text{ Н/м}.$$

Тогда по (6) индекс надежности составит $\beta = 3,16$, что ниже предельной границы по требованию безопасности.

Следовательно, для заданных условий оптимальным является поперечное сечение балки 175×175 мм.

В отдельных случаях, например если допускаются с архитектурной или иной точки зрения только квадратные поперечные сечения, можно изначально записать условие (6) в виде:

$$\beta = \frac{8R_u b^3 - \sum_{i=1}^n m_{q,i} - b^2 \rho}{\sqrt{\sum_{i=1}^n S_{q,i}^2}}, \quad (7)$$

где ρ – плотность древесины;

Для уточнения расчета, плотность древесины также может быть представлена случайной величиной. В этом случае слагаемое $-b^2 \rho$ в (7) может быть включено в сумму $\sum m_{q,i}$. В качестве статистических данных о плотности древесины можно использовать, например, сведения из стандарта Joint Committee on Structural Safety Probabilistic Model Code (2001).

Подставляя в (7) все известные значения и решая уравнение, например, в MathCAD, можно сразу найти минимальный размер стороны квадратного сечения по требованию уровня надежности.

Как было отмечено выше, предлагаемый подход рекомендуется использовать при обосновании допустимости применения нормального закона распределения для всех составляющих нагрузки. Если деревянная балка является элементом покрытия, то на нее действует также снеговая нагрузка. Снеговая нагрузка лучше описывается законом распределения Гумбеля [2], нежели нормальным. Таким образом, в составе математической модели предельного состояния будут присутствовать случайные величины с различными законами распределения. Для более удобной работы с математической моделью предельного состояния (7) преобразуем ее к виду:

$$\sum_{i=1}^{n-1} \tilde{q}_i \leq \frac{8R_u W_{nm}}{l^2} - \tilde{q}_{snow}, \quad (8)$$

где \tilde{q}_{snow} – снеговая нагрузка (случайная величина).

Для общности введем обозначения $\sum_{i=1}^{n-1} \tilde{q}_i = X$ и

$$\frac{8R_u W_{nm}}{l^2} - \tilde{q}_{snow} = Y.$$

Случайная величина X описывается нормальным распределением, случайная величина Y – законом распределения Гумбеля. В общем случае для модели вида $X \leq Y$ можно записать уравнение для оценки вероятности безотказной работы в виде:

$$P = \int_0^{+\infty} f_y(x) \cdot F_x(x) dx, \quad (9)$$

где $f_y(x)$ – плотность распределения случайной величины Y ;

$F_x(x)$ – функция распределения случайной величины X .

С учетом принятых выше законов распределения для модели (8) или $X \leq Y$ можно записать выражение (9) в виде:

$$P = \int_0^{+\infty} \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{x - m_x}{\sqrt{2 \cdot S_x^2}} \right) \right] \cdot \frac{1}{S_y \sqrt{6}} \exp \left[-\frac{m_y - 0,45 \cdot S_y - x}{S_y \sqrt{6}} - \exp \left(\frac{m_y - 0,45 \cdot S_y - x}{S_y \sqrt{6}} \right) \right] dx \quad (10)$$

В данном случае: $m_y = \frac{8R_u W_{nm}}{l^2} - m_{q,snow}$,

$$S_y = S_{q,snow}.$$

В рассмотренных подходах фигурирует предположение о предельном напряжении древесины при изгибе равном расчетному сопротивлению. Расчетное сопротивление древесины при изгибе определяют путем деления нормативного сопротивления древесины при изгибе на коэффициент надежности по материалу. Нормативное сопротивление древесины при изгибе в свою очередь определяется с обеспеченностью 0,95. В связи с этим возникают определенные противоречия – когда в вероятностной модели используются отдельные значения, полученные из другой вероятностной модели и деленные на коэффициент надежности по материалу.

С позиции вероятностных расчетов, когда детерминированные величины считаются за ожидаемые, такие подходы занижают действительный уровень надежности. Для рационализации метода проектирования необходимо использовать прямую вероятностную модель описания предельного напряжения в древесине при изгибе.

Представим математическую модель предельного состояния (8) в виде:

$$\sum_{i=1}^n \tilde{q}_i \leq \frac{8\tilde{\sigma}_{u,ult} W_{nm}}{l^2}, \quad (11)$$

где $\tilde{\sigma}_{u,ult}$ – предельное напряжение в древесине при изгибе (случайная величина).

В соответствии с [3], предельное напряжение в древесине может описываться нормальным распределением.

Рассмотрим случай расчета деревянной балки перекрытия, когда нагрузки также описываются нормальным распределением. Т.к. функция предельного состояния является линейной, то для вероятностного расчета может быть использован метод FOSM.

Введем обозначение: $\tilde{q}_{ult} = \frac{8\tilde{\sigma}_{u,ult} W_{nm}}{l^2}$. Тогда статистические параметры данной величины можно записать как: математическое ожидание $m_{q,ult} = \frac{8m_{\sigma,u,ult} W_{nm}}{l^2}$, стандартное отклонение $S_{q,ult} = \frac{8S_{\sigma,u,ult} W_{nm}}{l^2}$. Индекс надежности вычисляется как:

$$\beta = \frac{m_{q,ult} - \sum_{i=1}^n m_{q,i}}{\sqrt{S_{q,ult}^2 + \sum_{i=1}^n S_{q,i}^2}}. \quad (12)$$

Подставив статистические параметры для предельного напряжения при изгибе, получим:

$$\beta = \frac{\frac{8m_{\sigma,u,ult} W_{nm}}{l^2} - \sum_{i=1}^n m_{q,i}}{\sqrt{\left(\frac{8S_{\sigma,u,ult} W_{nm}}{l^2}\right)^2 + \sum_{i=1}^n S_{q,i}^2}}. \quad (13)$$

Откуда можно выразить требуемый момент сопротивления сечения:

$$W_{nm} = \frac{\beta \cdot l^2 \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n S_{q,i}^2 \cdot m_{\sigma,u,ult} - \sum_{i=1}^n S_{q,i}^2 \cdot \beta^2 \cdot S_{\sigma,u,ult}^2 + \left(\sum_{i=1}^n m_{q,i}\right)^2 \cdot S_{\sigma,u,ult}^2} + l^2 \cdot m_{\sigma,u,ult} \sum_{i=1}^n m_{q,i}}{8 \cdot m_{\sigma,u,ult}^2 - 8 \cdot \beta^2 \cdot S_{\sigma,u,ult}^2}. \quad (14)$$

Для более удобного представления введем статистический параметр – коэффициент вариации предельного напряжения древесины при изгибе $v_{\sigma,u,ult} = \frac{S_{\sigma,u,ult}}{m_{\sigma,u,ult}}$.

Тогда выражение (14) можно записать как:

$$W_{nm} = \frac{l^2 \cdot \sum_{i=1}^n m_{q,i} + \beta \cdot l^2 \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n S_{q,i}^2 - \sum_{i=1}^n S_{q,i}^2 \cdot \beta^2 \cdot v_{\sigma,u,ult}^2 + \left(\sum_{i=1}^n m_{q,i}\right)^2 \cdot v_{\sigma,u,ult}^2}}{8 \cdot m_{\sigma,u,ult} - 8 \cdot \beta^2 \cdot v_{\sigma,u,ult}^2 \cdot m_{\sigma,u,ult}}. \quad (15)$$

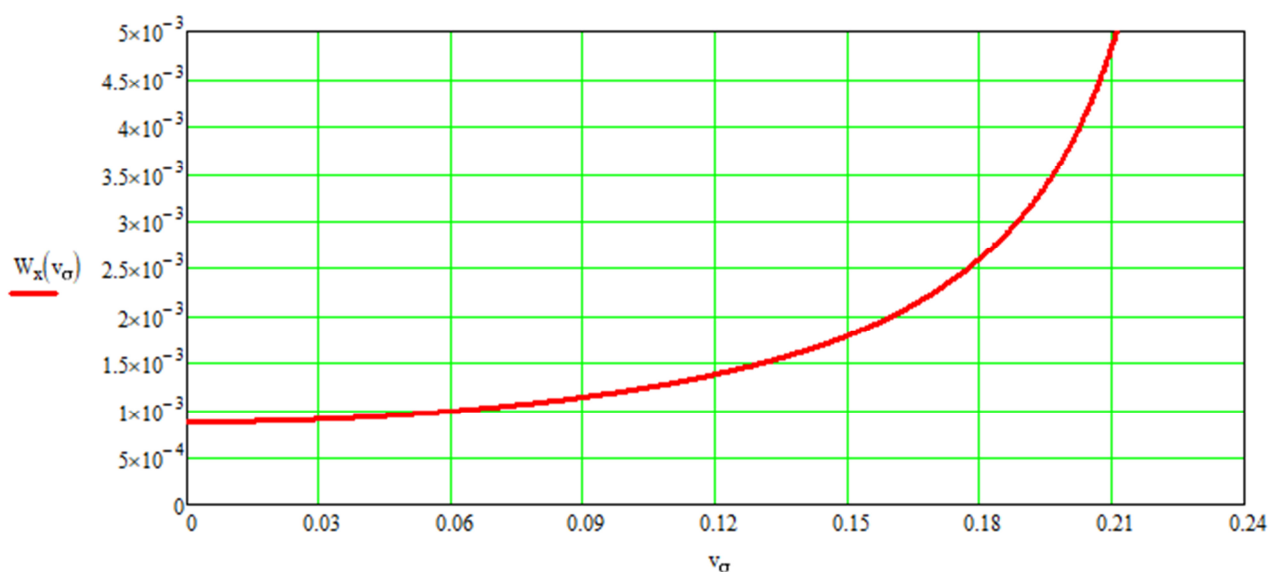


Рис. 1. Зависимость требуемого момента сопротивления сечения в зависимости от коэффициента вариации предельного напряжения

Проанализируем влияние коэффициента вариации $v_{\sigma,u,ult}$ предельного напряжения на требуемый момент сопротивления сечения W_{nm} . Используем данные о нагрузке по примеру выше. Вместо расчетного сопротивления древесины при изгибе R_u примем математическое ожидание предельного напряжения $m_{\sigma,u,ult}$. На рисунке 1 представлена динамика изменения требуемого момента сопротивления сечения в зависимости от коэффициента вариации $v_{\sigma,u,ult}$.

Как видно из рисунка 1, при коэффициенте вариации равном $v_{\sigma,u,ult}=0$ решение получается такое же, как в случае с одним случайным параметром. Рост коэффициента вариации (рост стандартного отклонения при постоянном математическом ожидании) приводит к росту требуемого момента сопротивления, т.к. возрастает статистическая неопределенность. Причем до значения $v_{\sigma,u,ult}=0,06$ рост требуемого момента сопротивления не такой существенный, а после значения $v_{\sigma,u,ult}=0,06$ можно наблюдать резкое увеличение требуемого момента сопротивления.

В общем виде прямоугольное сечение деревянной балки (при учете изменчивости размеров поперечного сечения) можно представить следующим образом (рис. 2).

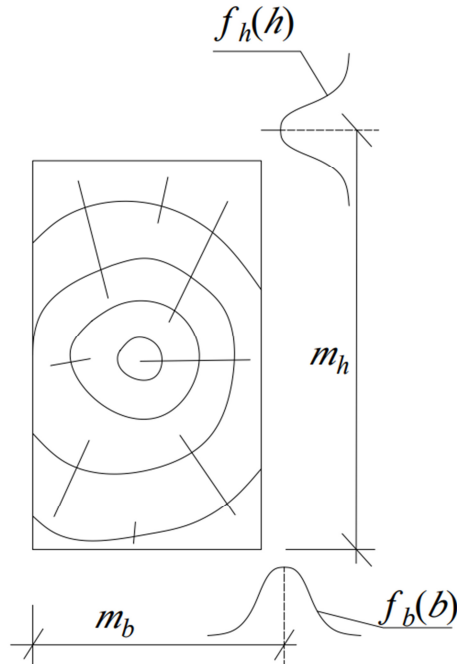


Рис. 2. Поперечное сечение деревянной балки со случайными размерами

Запишем математическую модель предельного состояния (11) с кодированием случайных величин в следующем виде:

$$g(\tilde{x}_i) = \frac{\tilde{x}_1 \cdot l^2}{8} - \tilde{x}_2 \cdot \frac{\tilde{x}_3 \cdot \tilde{x}_4^2}{6} \leq 0. \quad (16)$$

Для функции предельного состояния (16) вычисляется индекс надежности в виде:

$$\beta = \frac{E[g]}{\sigma_g}, \quad (17)$$

где $E[g]$ – математическое ожидание функции $g(\tilde{x}_i)$;

σ_g – среднеквадратическое отклонение функции $g(\tilde{x}_i)$.

Данные параметры определяются с использованием классических методов математической статистики [3].

В соответствии с FORM-алгоритмом [4, 5] для анализа надежности, коэффициенты чувствительности могут быть вычислены как:

$$\alpha_i = -\frac{\frac{\partial g}{\partial x_i} \sigma_{x_i}}{\left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial x_i} \sigma_{x_i} \right)^2 \right]^{1/2}}, \quad (18)$$

где σ_{x_i} – среднеквадратическое отклонение случайной величины \tilde{x}_i .

Затем вычисляются x^* - и u -координаты для функции предельного состояния $g(\tilde{x}_i)$:

$$x_i^* = E[x_i] + \beta \cdot \sigma_{x_i} \cdot \alpha_i, \quad (19)$$

$$u_i = \frac{x_i^* - E[x_i]}{\sigma_{x_i}}, \quad (20)$$

где $E[x_i]$ – математическое ожидание случайной величины \tilde{x}_i .

После чего строится новая функция предельного состояния $g(x_i^*)$, и определяется ее производная

$$\frac{\partial g(x_i^*)}{\partial x_i^*}.$$

Новый индекс надежности β^* можно определить в виде:

$$\beta^* = \frac{g(x^*) - \sum \frac{\partial g(x^*)}{\partial x_i} \sigma_{x_i} u_i}{\left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g(x^*)}{\partial x_i} \sigma_{x_i} \right)^2 \right]^{1/2}}. \quad (21)$$

Если индекс надежности, рассчитанный по (21), близок к индексу надежности (17), то его принимают за итоговый результат. Если разница велика, алгоритм расчета повторяют по формулам (18)–(21) (начиная с координат x^* , и получая в дальнейшем координаты x^{**}) до требуемой сходимости индекса надежности.

В статье предложены вероятностные подходы к расчету нормальных сечений деревянных балок на заданный индекс надежности.

Рост числа случайных величин в математических моделях предельных состояний приводит к

снижению надежности вследствие роста алеаторной неопределенности.

Увеличение степени нелинейности математической модели предельного состояния приводит к росту вычислительной ошибки алгоритма FOSM. Для более достоверной оценки необходимо использовать алгоритм FORM.

Литература

1. Ведяков, И. И. Перспективы совершенствования норм проектирования деревянных конструкций / И. И. Ведяков, А. А. Погорельцев, К. П. Пятикрестовский // Промышленное и гражданское строительство. – 2015. – № 4. – С. 28–32.

2. Соловьева, А. А. Метод оценки надежности элементов плоских ферм на основе р-блоков / А. А. Соловьева, С. А. Соловьев // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16. – № 2. – С. 153–167.

3. Райзер, В. Д. Теория надежности сооружений / В. Д. Райзер. – Москва : АСВ, 2010. – 384 с.

4. Nie, J. Directional Methods for Structural Reliability Analysis / J. Nie, B. R. Ellingwood // Structural Safety. – 2000. – Vol. 22. – No. 3. – pp. 233–249.

5. Keshtegar, B. A Hybrid Relaxed First-order Reliability Method for Efficient Structural Reliability Analysis / B. Keshtegar, Z. Meng // Structural Safety. – 2017. – Vol. 66. – pp. 84–93.

S.A. Solovev, Yu.A. Inkova, A.A. Soloveva
Vologda State University

PROBABILISTIC CALCULATION OF TIMBER BEAMS STANDARD SECTIONS BY GIVEN RELIABILITY INDEX

The key requirement in structural design is safety ensuring of buildings and structures. The article presents new approaches to probabilistic design of timber beams by the reliability index. There are different design cases with different combinations of random variables in mathematical models of limit states. Increasing of random variable numbers leads to decreasing of reliability level by the reason of aleatory uncertainty. If a limit state model is highly non-linear, then the FOSM (First Order Second Moment) will lead to increasing of the computational error. In this case, the FORM (First Order Reliability Method) can be used for more accurate result. The advantage of proposed methods is the opportunity to use them on the existing beams without introduction of any safety factors.

Reliability, strength, timber beam, failure probability, reliability index, normal cross-section.



С.А. Соловьев, Д.А. Нагимзянова
 Вологодский государственный университет

КОНТРОЛЬ ИНДЕКСА НАДЕЖНОСТИ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ДЕРЕВЯННЫХ БАЛОК

Индекс надежности элемента строительной конструкции является количественным показателем его безопасности эксплуатации. В статье разработана методика оценки и контроля индекса надежности деревянной балки по критерию прочности нормальных сечений балки. Контролируемыми случайными параметрами являются нагрузка, прочность древесины при изгибе и эксплуатационная влажность древесины. Периодический контроль индекса надежности эксплуатирующей организацией позволит спрогнозировать остаточный ресурс балки до проведения капитального ремонта. Отмечается высокая степень влияния влажности древесины на индекс надежности деревянной балки. Оценку индекса надежности следует проводить как для наиболее нагруженных сечений элемента, так и для сечений, подверженных повышенной влажности при протечках кровли, при разнице температур и т.д.

Надежность, вероятность отказа, деревянная балка, случайные величины, теория надежности, вероятностное проектирование.

Обеспечение надежности строительных конструкций зданий и сооружений является главной задачей при эксплуатации зданий и сооружений. В соответствии с текущими строительными нормами в РФ, надежность строительных конструкций обеспечивается за счет проверки всех нормативных критериев предельных состояний. Однако надежность не обретает количественной оценки, что не позволяет сравнить несколько проектных решений по уровню безопасности. Для количественной оценки надежности может быть использован такой показатель, как индекс надежности β .

Как отмечают авторы исследования [1], «по данным В.В. Большакова, в 1929 г. впервые (не только в СССР, но и за границей) были опубликованы технические условия и нормы проектирования деревянных конструкций (ДК). Обновлялись они довольно часто — в 1931, 1938, 1940 гг., т.е. через 2–7 лет. В последние годы у нас и в технически развитых зарубежных странах новые редакции норм выходили через 8–10 лет». На данный момент в РФ актуальным нормативным документом по расчету деревянных конструкций является Свод Правил СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80» с Изменением № 3, утвержденным и введенным в действие приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) от 23 декабря 2021 г. № 988/пр с 24.01.2022.

Одним из направлений развития методов проектирования деревянных конструкций является использование вероятностных методов строительной механики и положений теории надежности строительных конструкций. Использование частных коэффициентов надежности без четкого соотношения с

вероятностью безотказной работы может привести к перерасходу материала при проектировании строительных конструкций. Так, в исследовании [2] отмечено, что увеличение коэффициента надежности деревянных конструкций на 10 % в Финляндии 20 лет назад привело бы к увеличению затрат на строительство по меньшей мере в 200 раз по сравнению с получением меньшего ущерба.

Проектированию деревянных конструкций на заданный уровень надежности с использованием вероятностных подходов посвящено несколько фундаментальных исследований [3–6]. Текущей задачей в развитии данных подходов является вероятностный анализ усовершенствованных математических моделей предельного состояния, а также использование новых моделей случайных величин для анализа надежности [7–11].

Для развития деревянного домостроения в Вологодской области в прошлом году утвердили паспорт регионального стратегического проекта «Кластер деревянного домостроения». Его основная задача – увеличить объемы малоэтажного и многоэтажного строительства через ввод новых мощностей и продуктов, привлечение учебной и научной базы региональных высших учебных заведений, расширение внедрения добровольной сертификации и повышение квалификации кадров, использование различных региональных форм поддержки развития индивидуального домостроения. В соответствии с паспортом регионального кластера Вологодской области «Кластер деревянного домостроения» к 2024 году объем ввода жилья, построенного населением, составит 0,279 миллионов квадратных метров, а доля жилья, построенного с применением древесины, от общего объема ввода жилья, построенного населением, составит 81 %.

Математическую модель предельного состояния прочности нормальных сечений балки можно записать в виде:

$$M \leq M_{ult} = R \cdot W_x, \quad (1)$$

где M – максимальный изгибающий момент; M_{ult} – предельно допустимый изгибающий момент из условия прочности нормальных сечений балки; R – расчетное сопротивление древесины; W_x – момент сопротивления сечения балки.

Расчетное сопротивление древесины в Своде Правил СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции» приводится для влажности 12 %. В процессе эксплуатации балки могут возникнуть протечки кровли, нарушения гидроизоляции и прочие дефекты, увеличивающие влажность древесины и снижая ее прочность. Формулу (1) с коррекцией на прочность можно записать в виде:

$$M \leq M_{ult} = \frac{R \cdot W_x}{[1 + 0,04(W - 12)]}, \quad (2)$$

где W – эксплуатационная влажность древесины в месте оценки прочности по нормальным сечениям, %;

Влажность древесины может быть определена неразрушающими методами контроля [12] или путем отбора контрольных образцов по ГОСТ 16588-91 (ИСО 4470-81).

Параметр R в (2) является детерминированной величиной с заданной обеспеченностью. При решении задач на определение индекса надежности и вероятности безотказной работы корректнее использовать показатель предела прочности древесины при изгибе σ_{ult} . Данный параметр будет являться случайной величиной. Определить предел прочности древесины при изгибе можно по результатам лабораторных испытаний контрольных образцов или путем использования методов неразрушающего контроля [13].

Сформируем математическую модель предельного состояния на основе неравенства (2) с учетом наличия в ней случайных величин в виде:

$$\frac{\tilde{M}}{\tilde{\sigma}_{ult} \cdot \sum m_i} [1 + 0,04(\tilde{W} - 12)] \leq W_x, \quad (3)$$

где m_i – коэффициенты условий работы; волнистой линией обозначены случайные величины.

Сформируем функцию предельного состояния g , включающую в себя случайные все величины математической модели предельного состояния (3):

$$\tilde{g} = \frac{\tilde{M}}{\tilde{\sigma}_{ult} \cdot \sum m_i} [1 + 0,04(\tilde{W} - 12)].$$

Индекс надежности по данной функции предельного состояния определяется в виде:

$$\beta = \frac{W_x - m_g}{S_g}, \quad (4)$$

где m_g – математическое ожидание функции g ; S_g – среднее квадратическое отклонение функции g .

Математическое ожидание функции предельного состояния g вычисляется как:

$$m_g = \frac{m_M}{m_\sigma \cdot \sum m_i} [1 + 0,04(m_W - 12)], \quad (5)$$

где m_M , m_σ , m_W – математические ожидания изгибающего момента, предела прочности при изгибе и влажности соответственно.

Среднеквадратическое отклонение функции предельного состояния g вычисляется по формуле:

$$S_g = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial M}\right)^2 S_M^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial \sigma_{ult}}\right)^2 S_\sigma^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial W}\right)^2 S_W^2}, \quad (6)$$

где S_M , S_σ , S_W – среднеквадратические отклонения изгибающего момента, предела прочности при изгибе и влажности соответственно.

В аналитическом виде для данной задачи можно записать:

$$\left(\frac{\partial g}{\partial M}\right)^2 = \frac{(0,04m_W + 0,52)^2}{m_\sigma^2},$$

$$\left(\frac{\partial g}{\partial \sigma_{ult}}\right)^2 = \frac{0,0016 \cdot (m_M)^2}{m_\sigma^2},$$

$$\left(\frac{\partial g}{\partial W}\right)^2 = \frac{(0,04m_W + 0,52)^2 \cdot (m_M)^2}{m_\sigma^4}.$$

Рассмотрим пример. Пусть требуется оценить индекс надежности деревянной балки по критерию прочности нормальных сечений. Балка представляет собой брус 150×150 мм с моментом сопротивления сечения $W_x = 5,625 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$.

Пусть известны следующие статистические параметры про случайные величины: $m_M = 5 \text{ кН} \cdot \text{м}$; $m_\sigma = 15 \text{ МПа}$; $m_W = 17 \text{ \%}$; $S_M = 0,5 \text{ кН} \cdot \text{м}$; $S_\sigma = 2 \text{ МПа}$, $S_W = 1 \text{ \%}$. Также пусть $\sum m_i = 1$.

Параметры функции предельного состояния можно вычислить по формулам (5) и (6):

$$m_g = 4,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3,$$

$$S_g = 6,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

Тогда индекс надежности по (4) составит $\beta = 2,39$.

Если все случайные величины имеют нормальное распределение вероятностей, то вероятность безотказной работы балки по данному критерию составит 0,9916. С практической точки зрения такая вероятность безотказной работы довольно низкая для зданий и сооружений нормального уровня ответственности. Увеличить индекс надежности можно путем ограничения допустимой нагрузки на балку, повышения прочности древесины, усиления конструкции и других мероприятий.

На рисунке представлен график зависимости индекса надежности от математического ожидания влажности древесины в рассматриваемом сечении.

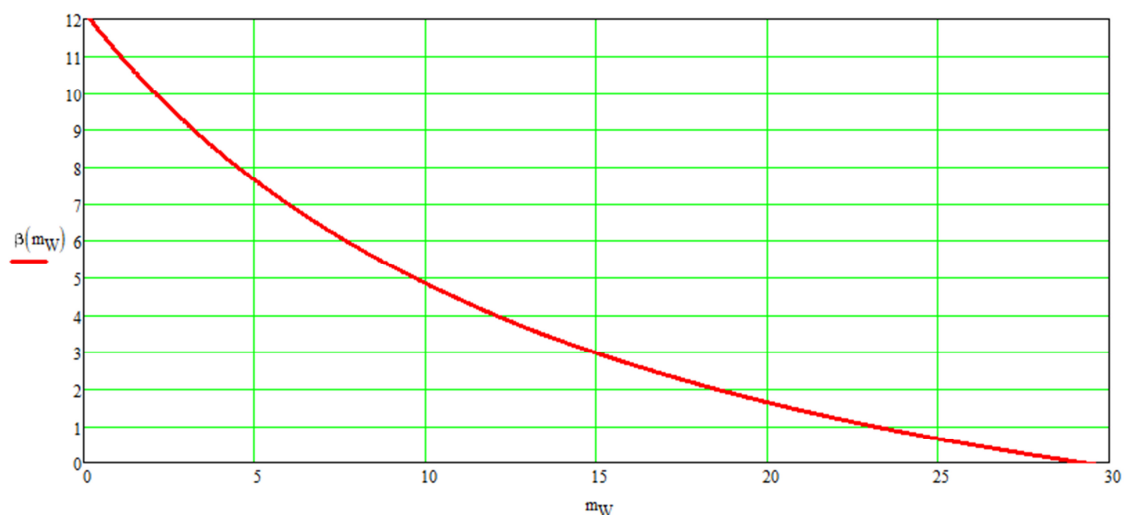


Рис. График зависимости индекса надежности от математического ожидания влажности древесины в рассматриваемом сечении

Как видно из рисунка, рост средней влажности деревянной балки приводит к существенному снижению индекса надежности и вероятности безотказной работы.

Таким образом, при обследовании деревянных конструкций зданий и сооружений, безопасность эксплуатации может быть количественно представлена индексом надежности. На значение индекса надежности существенно влияет значение влажности древесины. Контроль статистических параметров влажности позволит получить более объективную оценку надежности [14].

Литература

1. Строительные нормы проектирования деревянных конструкций. Состояние, проблемы и перспективы / Е. Н. Серов, А. Г. Черных, А. Е. Серов [и др.] // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – № 3 (32). – С. 107–114.
2. Ranta-Maunus, A. Theoretical and Practical Aspects of the Reliability Analysis Of Timber Structures / A. Ranta-Maunus // WCTE 2004 conference, Lahti. – 2004. – pp. 1–5.
3. Ranta-Maunus, A. Reliability Analysis of Timber Structures / A. Ranta-Maunus, M. Fonselius, J. Kurkela, T. Toratti. – VTT Technical Research Centre of Finland. – 2001. – 107 p.
4. Köhler, J. Probabilistic Modeling of Timber Structures / J. Köhler, J. D. Sørensen, M. H. Faber // Structural safety. – 2007. – Vol. 29. – No. 4. – pp. 255–267.
5. Sousa, H. S. On the Use of NDT Data for Reliability-based Assessment of Existing Timber Structures / H. S. Sousa [et al.] // Engineering Structures. – 2013. – Vol. 56. – pp. 298–311.
6. Cheng, F. Reliability Analysis of Timber Structure Design of Poplar Lumber with Nondestructive Testing Methods / F. Cheng, Y. Hu // BioResources. – 2011. – Vol. 6. – No. 3. – pp. 3188–3198.
7. Соловьева, А. А. Исследование развития моделей случайных величин в расчетах надежности строительных конструкций при неполной статистической информации / А. А. Соловьева, С. А. Соловьев // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16. – № 5. – С. 587–607.
8. Соловьева, А. А. Разработка уточненного р-блока как модели случайной величины в задачах анализа надежности строительных конструкций / А. А. Соловьева, С. А. Соловьев // Строительная механика и расчет сооружений. – 2022. – № 1 (300). – С. 20–28.
9. Соловьев, С. А. Анализ надежности элементов стальных ферм при интервальной оценке случайных величин / С. А. Соловьев, А. Э. Иньков, А. А. Соловьева // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2022. – № 1 (15). – С. 53–57.
10. Соловьев, С. А. Методы оценки надежности стальных ферм с использованием р-блоков / С. А. Соловьев, А. А. Соловьева. – Вологда : Вологодский государственный университет, 2022. – 143 с. – ISBN 978-5-907606-02-9.
11. Соловьева, А. А. Метод оценки надежности элементов плоских ферм на основе р-блоков / А. А. Соловьева, С. А. Соловьев // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16. – № 2. – С. 153–167.
12. Чубинский, А. Н. Физические неразрушающие методы испытания и оценка структуры древесных материалов / А. Н. Чубинский // Дефектоскопия. – 2014. – № 11. – С. 76–84.
13. Прохоров, С. А. Математическая модель зависимости предела прочности древесины от плотности с использованием функции распределения Вейбулла / С. А. Прохоров, М. С. Даниленко // Естественные и технические науки. – 2017. – № 1. – С. 139–144.
14. Сухина, К. Н. Вероятностный анализ ресурса конструкций покрытия промышленного здания с учетом случайного характера снеговой нагрузки / К. Н. Сухина, В. А. Пшеничкина // Инженерный вестник Дона. – 2015. – Т. 38. – № 4–1. – С. 83–95.

S.A. Solovyov, D.A. Nagimzyanova
Vologda State University

CONTROL OF RELIABILITY INDEX OF TIMBER BEAMS BEING EXPLOITED

The reliability index of structural element is a quantitative indicator of its operational safety. The article develops a methodology for evaluating and controlling the reliability index of timber beams by the criterion of normal-sections strength. The controlled random parameters are the load, the wood flexural strength of and the operational humidity. Periodic monitoring of the reliability index by the maintaining organization will make it possible to predict the remaining life of the beam before major repairs. There is a high degree of influence of wood humidity on the reliability index of a timber beam. The reliability index should be evaluated both for the most loaded cross-sections of the element, and for cross-sections exposed to high humidity with roof leaks, temperature differences, etc.

Reliability, probability of failure, timber beam, random variables, reliability theory, probabilistic design.



ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ СВАЙ НА ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ ПО НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ОСНОВАНИЯ

Деградация вечной мерзлоты создает новые вызовы в области обеспечения надежного и безопасного функционирования зданий и сооружений на вечномерзлых грунтах. В статье представлен новый подход к анализу надежности свай на вечномерзлых грунтах по критерию несущей способности грунта основания. Предложены различные расчетные алгоритмы для получения оценки индекса надежности и вероятности безотказной работы свай. Разработаны формулы для аппроксимации зависимостей расчетного сопротивления грунтов сдвигу по таблице ВЗ СП 25.13330.2020 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах». Для комплексной оценки надежности сваю необходимо рассматривать как условную механическую последовательную систему, включающую в себя элементы в виде вероятностей безотказной работы по всем нормативным критериям предельных состояний.

Надежность, вероятность отказа, вечная мерзлота, сваи, несущая способность, вероятностное проектирование.

Надежность является одним из главных показателей качества и безопасности эксплуатации несущих элементов строительных конструкций. Надежность в совокупности с фактором экономических и неэкономических потерь являются базовыми параметрами для оценки риска, что позволяет выполнять требования Федерального Закона № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» в области обеспечения механической безопасности. Как отмечено в стандарте Eurocode 0 «Basis of Structural Design», надежность обычно выражается в вероятностных терминах.

Свайные фундаменты являются распространенным конструктивным решением для многих зданий и сооружений, эксплуатируемых в условиях вечной мерзлоты. Так как тепловой поток от зданий оказывает негативное воздействие на вечную мерзлоту, еще в начале XX века было предложено использовать вентилируемые свайные фундаменты для защиты вечной мерзлоты от оттаивания, так как цокольная часть сооружения проветривается зимой и обеспечивает затенение летом.

В исследовании [1] отмечается, что «антропогенное влияние на температуру воздуха стало практически заметным начиная с 1970 г., что приводит к повышению температуры вечномерзлых грунтов и, как следствие, к потере несущей способности оснований. Данный процесс уже наблюдается в настоящее время и сопровождается деформациями инженерных сооружений». С учетом глобальных экспериментальных исследований глубины активного слоя грунта (слоя, в котором происходит процесс промерзания-оттаивания грунта) с 1995 по 2007 годы в регионах с вечной мерзлотой [2] установлено, что в среднем за год глубина активного слоя повышается на 5 см. Как отмечено в исследованиях [3, 4], «многие сооружения построены на свайных фундаментах, используют

многолетнемерзлый грунт в качестве оснований и рассчитаны на эксплуатацию в определенных температурных условиях. За последние 30 лет в Якутске из-за просадок мерзлого грунта серьезные повреждения получили более 300 зданий. Уже в 1992 году процент поврежденных зданий составлял 10 % в Норильске, 22 % в Тикси, 35 % в Дудинке, 50 % в Певеке и Амдерме, 55 % в Магадане, 60 % в Чите и 80 % – в Воркуте. С 1990 по 1999 год число сооружений, получивших повреждения из-за неравномерных просадок фундаментов, увеличилось по сравнению с предшествующим десятилетием в Норильске на 42 %, в Якутске – на 61 %, в Амдерме на 90 %». Следовательно, вопрос оценки безопасности эксплуатации фундаментов строительных конструкций и инженерных сооружений является крайне актуальным.

В фундаментальном исследовании влияния потепления климата на деградационные процессы в вечной мерзлоте [5] отмечено, что деградация вечной мерзлоты может иметь серьезные социально-экономические последствия, поскольку большая часть существующей инфраструктуры потребует дорогостоящих инженерных решений для поддержания экономической деятельности на вечной мерзлоте. Согласно отчетам Международной организации АМАР (Программа арктического мониторинга и оценки), Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) и Росгидромета [5], каждые 10 лет происходит увеличение температуры окружающей среды в районах с вечномерзлыми грунтами до 1 °С – быстрее, чем в других регионах. Близкие цифры показывают авторские экспериментальные исследования: в западных районах РФ наблюдается ежегодное увеличение температуры вечной мерзлоты от 0,01 до 0,04 °С/год [6], в восточных до 0,08 °С/год [7]. В исследовании [8] выполнен прогноз деформаций основа-

ния и снижения несущей способности свайных фундаментов в криолитозоне.

Изменение климата в регионах с вечной мерзлотой резко повышает экономические затраты на обеспечение безопасности инфраструктуры. На обслуживание трубопроводов в районах вечной мерзлоты России ежегодно требуется более 1,5 млрд долларов [5, 9]. Важным выводом исследования [5] является то, что «несмотря на растущую сеть наблюдений и попытки восстановления имеющихся данных, вечная мерзлота по-прежнему остается областью исследований с ограниченной статистической информацией».

Согласно [10], «обязателен мониторинг существующей инфраструктуры и быстрое принятие инженерных решений, направленных на сохранение температуры многолетнемерзлых пород. В настоящее время возможны только качественные оценки климатических изменений и вызванных ими опасных геологических процессов и снижения несущей способности мерзлых грунтов. Необходимо развитие локальных климатических моделей и сценариев возможных климатических изменений».

Надежность строительных конструкций, в свою очередь, является объективной количественной оценкой безопасности эксплуатации конструкции. Методы оценки надежности строительных конструкций активно изучаются и совершенствуются [11–14].

В соответствии с п. 7.2.2 СП 25.13330.2020 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах», математическую модель несущей способности сваи по критерию несущей способности основания F_u можно записать в виде:

$$F_u = \gamma_t \gamma_c \left(RA + \sum_{i=1}^n R_{af,i} A_{af,i} \right), \quad (1)$$

где γ_t – температурный коэффициент, учитывающий изменения температуры грунтов, принимаемый по Приложению П СП 25; γ_c – коэффициент условий работы основания; R – расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи; A – площадь опирания сваи на грунт; $R_{af,i}$ – расчетное сопротивление i -го слоя мерзлого грунта сдвигу по боковой поверхности сваи; $A_{af,i}$ – площадь поверхности смерзания i -го слоя грунта с боковой поверхностью сваи.

Коэффициент γ_t в расчетах на надежность не учитывается, т.к. вариация температур грунта будет включена в прямую вероятностную модель. Коэффициент условий работы также исключается из вероятностных расчетов, т.к. его использование обусловлено использованием метода предельных состояний или метода частных коэффициентов надежности.

Математическую модель предельного состояния для расчета надежности можно сформировать в виде:

$$\tilde{F} \leq \tilde{\sigma}A + \sum_{i=1}^n \tilde{\sigma}_{af,i} A_{af,i}, \quad (2)$$

где \tilde{F} – эксплуатационная нагрузка на сваю; $\tilde{\sigma}$ и $\tilde{\sigma}_{af,i}$ – предельные напряжения грунта, которые

вводятся взамен расчетных сопротивлений, т.к. расчетные сопротивления являются детерминированным числом с заданной обеспеченностью.

Для дальнейших расчетов введем функцию резерва несущей способности сваи, которая на основе (2) будет иметь вид:

$$\tilde{g} = \tilde{\sigma}A + \sum_{i=1}^n \tilde{\sigma}_{af,i} A_{af,i} - \tilde{F} \geq 0. \quad (3)$$

Индекс надежности по математической модели (3) вычисляется по формуле:

$$\beta = \frac{m_g}{S_g}, \quad (4)$$

где m_g – математическое ожидание функции предельного состояния g ; S_g – среднеквадратическое отклонение функции предельного состояния g .

Введем обозначения $\tilde{\sigma}A = \tilde{x}_1$, $\tilde{F} = \tilde{x}_2$, $\tilde{\sigma}_{af,i} A_{af,i} = \tilde{x}_{i+2}$.

Тогда в общем виде индекс надежности можно записать в виде:

$$\beta = \frac{\sum m_{x,i}}{\sum S_{x,i}^2}, \quad (5)$$

где $m_{x,i}$ и $S_{x,i}$ – математическое ожидание и стандартное отклонение случайной величины \tilde{x}_i .

Если все случайные величины в (5) можно описать нормальным распределением вероятностей, то вероятность безотказной работы сваи по критерию несущей способности грунта основания определяется по формуле:

$$P = 0,5 + \Phi(\beta), \quad (6)$$

где Φ – табличные значения функции Лапласа.

Эксплуатационную нагрузку \tilde{F} можно также разделить на составляющие в математической модели предельного состояния (3). Например, нагрузка от собственного веса конструкций и оборудования может быть определена экспериментально-теоретически на основе патента [15], вероятностная модель снеговой нагрузки может быть принята с учетом рекомендаций [16] и т.д.

При росте количества i -ых слоев грунта ниже глубины активного слоя грунта расчет проводится аналогичным образом, лишь увеличивается число слагаемых в выражениях (3) и (5).

В соответствии с СП 25.13330.2020 для сооружений пониженного уровня ответственности, а также сооружений нормального уровня ответственности габаритными размерами не более 24 м, расположенных на изученных участках и при отсутствии опасных геокриологических процессов, допускается принимать расчетное сопротивление сдвигу грунта по таблице В3 СП 25.13330.2020.

На рисунке представлена зависимость в виде символов между расчетным сопротивлением сдвигу грунта по поверхности смерзания от темпера-

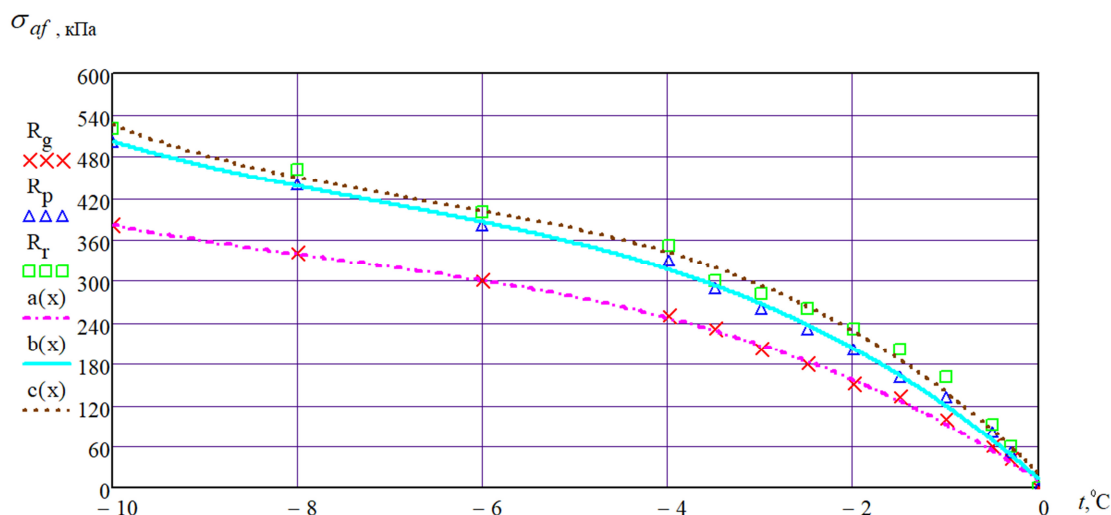


Рис. Аппроксимация зависимости расчетного сопротивления сдвигу грунта по поверхности смерзания (R_g – для глинистых грунтов; R_p – для песчаных грунтов; R_r – для известково-песчаного раствора) от температуры

Данная зависимость может быть аппроксимирована следующими функциями:

- для глинистых грунтов:

$$a(t) = -0,412t^3 - 9,418t^2 - 89,917t + 10,914$$

(в кПа);

- для песчаных грунтов:

$$b(t) = -0,605t^3 - 12,974t^2 - 118,003t + 13,261$$

(в кПа);

- для известково-песчаного раствора:

$$c(t) = -0,835t^3 - 16,627t^2 - 133,076t + 21,336$$

(в кПа);

Приняв линейное распределение температуры грунта вдоль длины сваи, что идет в запас надежности по рисунку, можно получить выражение для расчета силы смерзания F_r , удерживающей сваю:

$$F_r = u \cdot \int_0^{t_H} a(t) dt, \text{ кН}, \quad (7)$$

где t_H – температура грунта у нижнего конца сваи; u – периметр поперечного сечения сваи.

Выражение (7) можно использовать вместо сла-

гаемого $\sum_{i=1}^n \tilde{\sigma}_{af,i} A_{af,i}$ в (3).

После интегрирования, выражение (7) примет вид полинома 4 степени. Поиск его статистических параметров для выражения (5) может быть выполнен методами Монте-Карло [17].

Индекс надежности и вероятность безотказной работы сваи являются количественными показателями ее безопасности эксплуатации. На основе этих показателей может быть принято решение о дальнейшей эксплуатации сооружения и необходимости проведения капитального ремонта сооружения.

Литература

1. Хрусталева, Л. Н. Прогноз потепления климата и его учет при оценке надежности оснований зданий на вечномёрзлых грунтах / Л. Н. Хрусталева, И. В. Давыдова // Криосфера Земли. – 2007. – № 2. – С. 68–75.

2. Wu, Q. Changes in Active Layer Thickness over the Qinghai-Tibetan Plateau from 1995 to 2007 / Q. Wu, T. Zhang // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2010. – Vol. 115. – pp. 1–12.

3. Анисимов, О. А. Оценка влияния изменения климата и деградации вечной мерзлоты на инфраструктуру в северных регионах России / О. А. Анисимов, М. А. Белолуцкая // Метеорология и гидрология. – 2002. – № 6. – С. 15–22.

4. Анисимов, О. А. Глобальное потепление и таяние вечной мерзлоты: оценка рисков для производственных объектов ТЭК / О. А. Анисимов, С. А. Лавров // Технологии ТЭК. – 2004. – № 3. – С. 78–83.

5. Streletskiy, D. Permafrost Degradation / D. Streletskiy, O. Anisimov, A. Vasiliev // Snow and ice-related hazards, risks and disasters. Academic Press. – 2015. – pp. 303–344.

6. Malkova, G. V. Mean-annual ground Temperature Monitoring on the Steady-state-station “Bolvan-sky” / G. V. Malkova // Earth's Cryosphere. – 2010. – Vol. 14. – No. 3. – pp. 3–14.

7. Oberman, N. G. Contemporary Permafrost Degradation of the European North of Russia / N. G. Oberman // Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost, June 29-July 3. – 2008. – pp. 1305–1310.

8. Nikiforova, N. Forecast of the soil deformations and Decrease of the Bearing Capacity of Pile Foundations Operating in the Cryolithozone / N. Nikiforova, A. Konnov // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2022. – Vol. 18. – No. 1. – pp. 141–150.

9. Streletskiy, D. A. Infrastructure and a Changing Climate in the Russian Arctic: a Geographic Impact Assessment / D. A. Streletskiy, N. I. Shiklomanov, E. Hatleberg // Proceedings of the 10th International Conference on Permafrost. – 2012. – Vol. 1. – pp. 407–412.

10. Стрелецкий, Д. А. Изменение несущей способности мерзлых грунтов в связи с потеплением климата на Севере Западной Сибири / Д. А. Стрелецкий, Н. И. Шикломанов, В. И. Гребенец // Криосфера Земли. – 2012. – Т. 16. – № 1. – С. 22–32.

11. Соловьева, А. А. Исследование развития моделей случайных величин в расчетах надежности строительных конструкций при неполной статистической информации / А. А. Соловьева, С. А. Соловьев // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16. – № 5. – С. 587–607.

12. Соловьева, А. А. Разработка уточненного р-блока как модели случайной величины в задачах анализа надежности строительных конструкций / А. А. Соловьева, С. А. Соловьев // Строительная механика и расчет сооружений. – 2022. – № 1 (300). – С. 20–28.

13. Соловьев, С. А. Анализ надежности элементов стальных ферм при интервальной оценке случайных величин / С. А. Соловьев, А. Э. Иньков, А. А. Соловьева // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2022. – № 1 (15). – С. 53–57.

14. Соловьев, С. А. Методы оценки надежности стальных ферм с использованием р-блоков / С. А. Соловьев, А. А. Соловьева. – Вологда : Воло-

годский государственный университет, 2022. – 143 с. – ISBN 978-5-907606-02-9.

15. Патент № 2765358 С1 Российская Федерация, МПК E02D 33/00. Способ определения значения эксплуатационной нагрузки на железобетонную сваю в составе зданий или сооружений : № 2021106432 : заявл. 12.03.2021 : опубл. 28.01.2022 / В. С. Уткин, Л. А. Сушев, С. А. Соловьев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодский государственный университет».

16. Соловьева, А. А. Метод оценки надежности элементов плоских ферм на основе р-блоков / А. А. Соловьева, С. А. Соловьев // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16. – № 2. – С. 153–167.

17. Naess A., Leira B. J., Batsevych O. System reliability analysis by enhanced Monte Carlo simulation // Structural safety. – 2009. – Vol. 31. – No. 5. – pp. 349–355.

S.A. Solovyov, L.A. Sushev, R.V. Rakhmanov
Vologda State University

PROBABILISTIC ANALYSIS OF PILES RELIABILITY ON PERMAFROST SOILS BASED ON BASE BEARING CAPACITY

The degradation of permafrost creates new challenges in the field of ensuring the reliable and safe functioning of buildings and structures on permafrost soils. The article presents a new approach to the reliability analysis of piles on permafrost soils by the criterion of the soil base bearing capacity. Various design algorithms are proposed to obtain an estimate of the reliability index and the probability of no-failure operation of the pile. The equations have been developed for approximating the dependencies of the design resistance of soils to shear according to Table V3 SP 25.13330.2020 "Foundations on permafrost soils". For a comprehensive assessment of reliability, the pile must be considered as a conditional mechanical sequential system that includes elements in the form of no-failure probabilities for all standard criteria of limit states.

Reliability, failure probability, permafrost, piles, bearing capacity, probabilistic design

УДК 628.161.2:54.414



А.И. Фоменко, М.А. Назарова
Вологодский государственный университет

СОПОСТАВИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АДсорбЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЗоЛы, ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ ПРИ СЖИГАНИИ ДРЕВЕСИНЫ ХВОЙНЫХ И ЛИСТВЕННЫХ ПОРОД

Представлены результаты исследования сорбционных характеристик золы, образующейся при сжигании древесного топлива хвойных и лиственных пород (сосны, березы). На основании значений коэффициентов регрессии, констант и параметров уравнений адсорбционных моделей Ленгмюра и Фрейндлиха, использованных для аппроксимации экспериментальных изотерм адсорбции, проведена сопоставительная оценка адсорбционных свойств исследованных образцов золы по отношению к красителю метиленовому голубому, применяемого в водоочистке в качестве вещества-маркера при тестировании адсорбционной способности адсорбентов.

Адсорбция, зола древесная, метиленовый голубой, изотермы адсорбции, адсорбционная емкость.

На тепловых электростанциях в огромных объемах (сотни млн т) накапливаются золы, образующиеся при сжигании твердого топлива (каменного угля, отходов переработки древесины, торфа) [4, 9]. Общеизвестно, что древесина и отходы ее переработки являются типичным местным топливом и используются в отрасли малой энергетики. По данным [6] себестоимость выработки единицы тепла на местном биотопливе практически равна единице тепла на природном газе и в 2 раза ниже, чем на привозном угле. Зола, получаемая при сжигании древесного топлива, с давних времен используется как минеральное удобрение в сельском хозяйстве [2, 7].

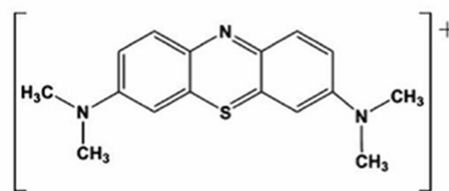
Большие возможности утилизации золы, получаемой при сжигании древесного топлива, связаны с ее сорбционными свойствами. Из публикаций в научной литературе известно, что зола древесная по составу близка к неорганическим катионообменникам и является эффективным адсорбентом для извлечения из водных растворов биогенных элементов и тяжелых металлов [8, 10]. Не сгоревшие частицы угля, содержащиеся в золе, также являются активным адсорбентом по отношению к органическим малодиссоциирующим веществам. Такие свойства золы указывают на возможность применения ее для очистки загрязненных сточных вод от примесей различной природы. Однако сорбционные свойства золы зависят от многих факторов, включая физические и химические характеристики используемого топлива.

Целью настоящего исследования является сопоставительная характеристика адсорбционной активности зольных отходов, образующихся при сжигании древесного топлива хвойных и лиственных пород. Свойства зольных отходов изучены по экспериментальным данным равновесной адсорбции метиленового голубого. Метиленовый голубой (3,7-бисдиметиламинофеноцианин хлорид) – органический основной краситель, относящийся к группе триа-

зиновых красителей, является одним из веществ-маркеров, которые рекомендованы рядом статей для оценки адсорбционной способности сорбентов [1, 5]. В водоочистке при тестировании активированных углей применение метиленового голубого рекомендовано ГОСТ 4453-74 «Уголь активный осветляющий древесный порошкообразный. Технические условия».

В эксперименте использовали образцы подовой золы древесной, полученной от сжигания древесных отходов (щепы, стружки, опилок) хвойных пород (сосны) и лиственных пород (березы). Подготовка образцов к эксперименту включала рассев по классам крупности ситовым методом. Для сорбции использовали фракцию с размером зерен 0,25–0,5 мм.

Для приготовления водных растворов красителя использовали метиленовый голубой (C₁₆H₁₈N₃SCl) марки «хч». В водном растворе в области значений pH от 2 до 10 метиленовый голубой находится преимущественно в виде однозарядного катиона [3]:



Равновесие адсорбции из водных растворов метиленового голубого на взятых в эксперимент образцах зольных отходов исследовали в статических условиях при температуре 25 °С методом переменных концентраций красителя. Растворы метиленового голубого готовили в диапазоне концентраций от 6,4 до 64 мг/дм³ разбавлением дистиллированной водой основного раствора концентрацией 320 мг/дм³, приготовленного по навеске красителя. Опыты, необходимые для построения изотерм сорбции, проводили, помещая в водные растворы одинакового объема (100 см³) с разными исходными концентрациями красителя

навески золы одинаковой массы (1 г). Суспензию перемешивали с использованием магнитной мешалки в течение 1 ч. С учетом данных о времени установления равновесия в изучаемых системах, адсорбцию в экспериментах проводили на протяжении 24 часов. Через сутки значение оптической плотности устанавливалось на постоянной величине, что свидетельствовало об окончании процесса адсорбции и установлении равновесия адсорбция/десорбция. После установления гетерогенного равновесия, водный раствор метиленового голубого отделяли от адсорбента. Раствор анализировали на содержание красителя. Определение исходной и остаточной (равновесной) концентрации красителя в растворе проводили фотометрическим методом при использовании фотоэлектроколориметра марки КФК-2МП. Измерения оптической плотности водных растворов метиленового голубого проводили при длине волны 670 нм с использованием кюветы с толщиной поглощающего свет слоя 50 мм на фоне холостой пробы.

Степень извлечения красителя из модельных водных растворов (степень очистки) α , %, и величину адсорбции Γ , мг/г, рассчитывали по разности концентраций начальной C_0 и остаточной (равновесной) $C_{равн}$ по формулам:

$$\alpha = \frac{(C_0 - C_{равн})}{C_0} \cdot 100,$$

$$\Gamma = \frac{(C_0 - C_{равн}) \cdot V}{m_{сорбента}},$$

где α – степень очистки (%); Γ – величина адсорбции (мг/г); C_0 и $C_{равн}$ – исходная и остаточная (равновесная) концентрации метиленового голубого (мг/дм³); V – объем исследуемого раствора (дм³); $m_{сорбента}$ – масса навески золы (г).

На рисунке 1 в координатах $\alpha = f(C_0)$ представлены экспериментальные данные изменения величины степени извлечения метиленового голубого из водно-

го раствора от исходной концентрации красителя в исследованном диапазоне.

Как установлено из представленных графических зависимостей, характер адсорбционной активности золы древесной, образующейся при сжигании березы и сосны, имеет значительные различия. В исследованном диапазоне исходной концентрации метиленового голубого (6,4–64 мг/дм³) степень извлечения красителя из водного раствора золой, образующейся при сжигании березы, остается практически на одном уровне. Снижение величины α при увеличении исходной концентрации красителя в растворе в исследованном диапазоне от 6,4 мг/дм³ до 64 мг/дм³ менее 9 %. Степень извлечения молекул метиленового голубого из водного раствора составила более 80 %. Для золы, образующейся при сжигании сосны, характер сорбционной активности зависит от исходной концентрации раствора. Высокая сорбционная активность, достигая степень извлечения молекул метиленового голубого из водного раствора более 90 %, характерна в области низких концентраций. При увеличении концентрации красителя в растворе до 40 мг/дм³ и более наблюдалось резкое снижение сорбционной активности золы.

Степень насыщения активной поверхности адсорбентов молекулами метиленового голубого представлена в координатах $\Gamma = f(C_{равн})$ на рисунке 2.

Форма изотермы адсорбции метиленового голубого из раствора на образцах золы, образующейся при сжигании березы, (рис. 2а) указывает, что в интервале исследованных концентраций красителя адсорбция не достигает максимального значения. Линейная форма в области малых концентраций раствора красителя и образование плато на изотерме адсорбции метиленового голубого из раствора на образцах золы, образующейся при сжигании сосны (рис. 2б) позволяет предположить, что адсорбция ограничивается монослоем.

Данные, представленные на рисунке 2, линеаризованы в координатах уравнения Ленгмюра (рис. 3) и уравнения Фрейдлиха (рис. 4).

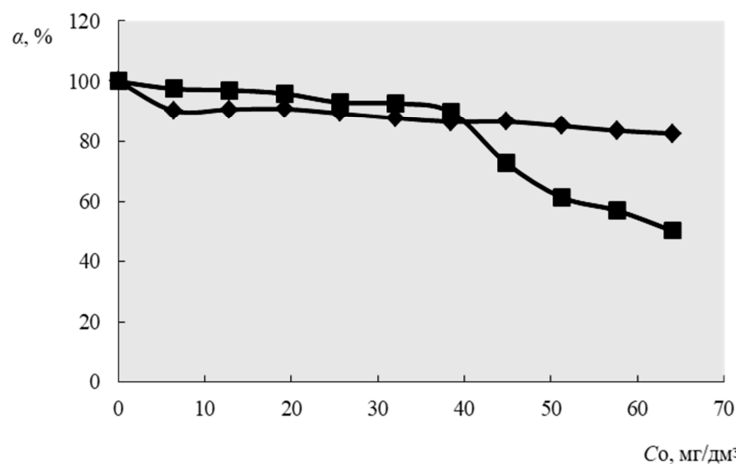
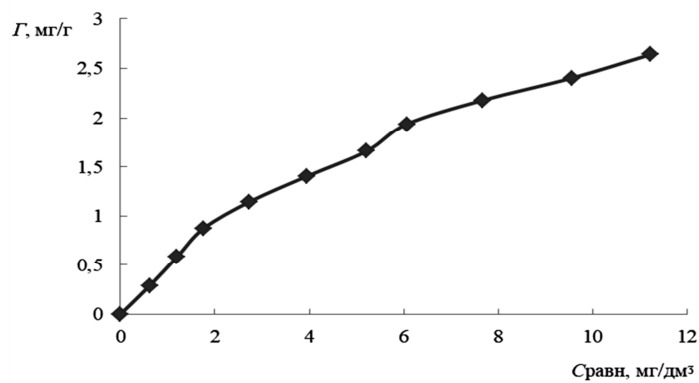
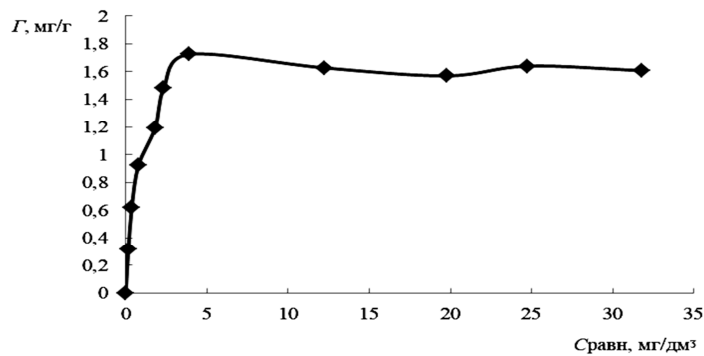


Рис. 1. Зависимость степени извлечения метиленового голубого из водного раствора α (%) от исходной концентрации красителя и вида сорбента:

- ◆ – золы древесной, полученной от сжигания березы;
- – золы древесной, полученной от сжигания сосны

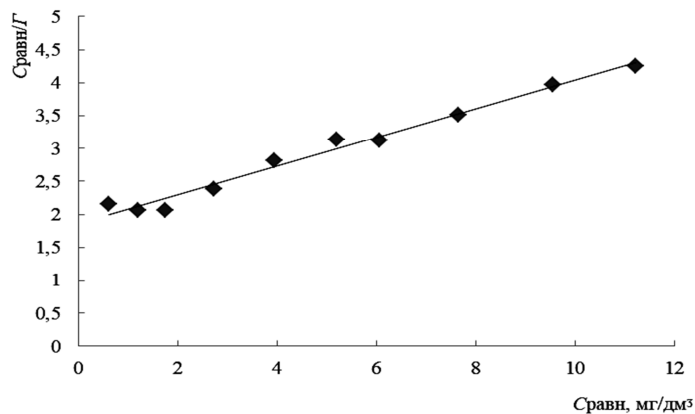


а

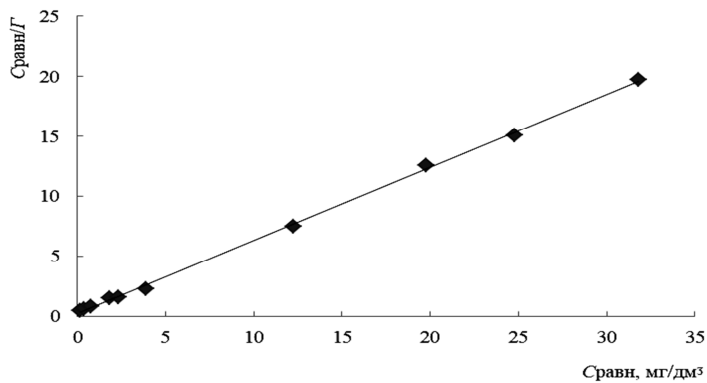


б

Рис. 2. Изотермы адсорбции метиленового голубого из раствора на образцах золы древесной, полученной от сжигания березы (а) и сосны (б)



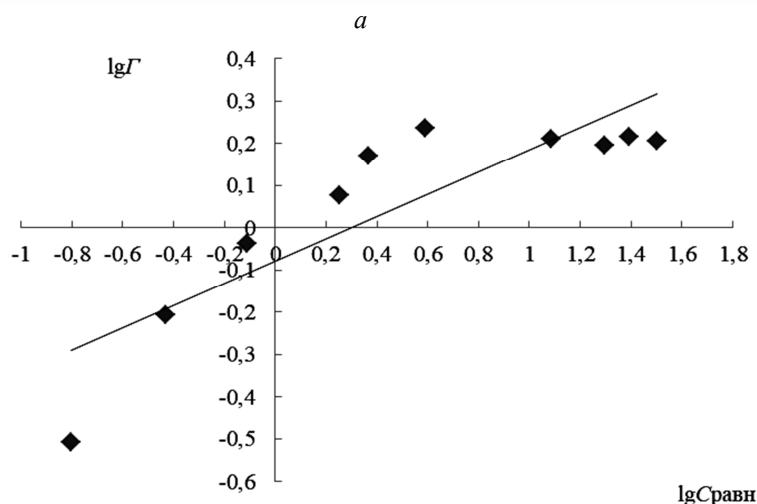
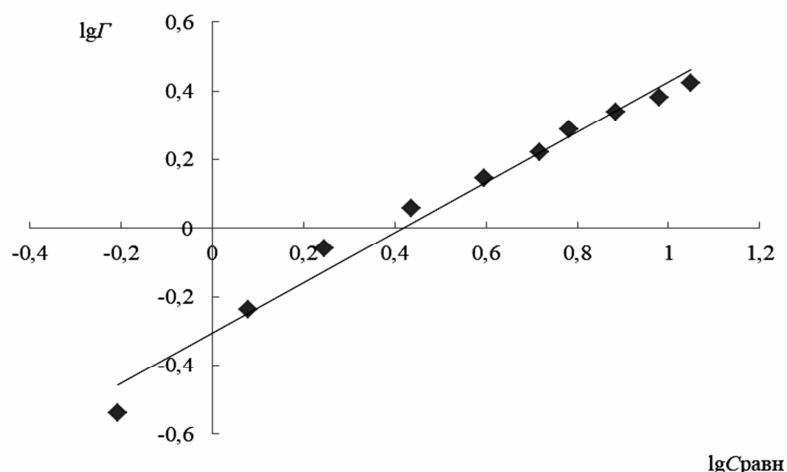
а



б

Рис. 3. Изотермы адсорбции метиленового голубого из раствора на образцах золы древесной, полученной от сжигания березы (а) и сосны (б), линейризованные в координатах уравнения Ленгмюра:

■ – экспериментальные данные, — — данные расчета по модели в программе MS Excel



б

Рис. 4. Изотермы адсорбции метиленового голубого из раствора на образцах золы древесной, полученной от сжигания березы (а) и сосны (б), линейаризованные в координатах уравнения Фрейндлиха: ■ – экспериментальные данные, — – данные расчета по модели в программе MS Excell

Результаты расчетов приведены в таблице, которые показывают, что предельное значение статистической адсорбционной емкости относительно метиленового голубого на образцах золы, образующейся при сжигании березы, составляет 4,6020 мг/г, что значительно больше, чем на образцах золы, образующейся при сжигании сосны, для которой это значение составляет 1,6426 мг/г (табл.).

Таблица

Параметры изотерм адсорбции метиленового голубого на образцах золы древесной, образующейся при сжигании березы и сосны, рассчитанные в рамках моделей Ленгмюра и Фрейндлиха

Модель	Параметры модели	Образцы золы древесной, полученной от сжигания	
		березы	сосны
Ленгмюра	Γ_{\max} , мг/г	4,6020	1,6426
	k	0,1166	2,3210
	R^2	0,9932	0,9991
Фрейндлиха	$1/n$	0,7332	0,2635
	K	0,4943	0,8329
	R^2	0,9801	0,7543

Коэффициенты корреляции R^2 линейных зависимостей по линейной форме уравнения изотермы Ленгмюра и в координатах логарифмической формы уравнения Фрейндлиха близки к единице, что определяет возможность описания процесса адсорбции с использованием данных видов математической обработки к образцам исследованных адсорбентов. Модель Ленгмюра хорошо согласуется с экспериментальными данными. Коэффициенты корреляции для изотермы адсорбции метиленового голубого из раствора на образцах золы, полученной от сжигания сосны, в координатах уравнения Фрейндлиха ниже, чем для изотермы Ленгмюра, что указывает на большую аппроксимирующую способность модели Ленгмюра для равновесной адсорбции метиленового голубого данными адсорбентами. Полученные из уравнения Фрейндлиха значения $1/n$ меньше единицы указывают на то, что исследованные образцы золы, как образующейся при сжигании березы, так и сосны, являются эффективными адсорбентами метиленового голубого.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что исследованные образцы золы в отношении метиленового голубого обладают достаточной адсорбционной активностью, поэтому их применение в

очистке водных растворов от соединений, схожими по строению с метиленовым голубым, является целесообразным. С учетом полученных в условиях лабораторного эксперимента данных можно предположить, что для глубокой очистки мало концентрированных сточных и поверхностных вод использование золы, образующейся при сжигании сосны, по сравнению с золой, образующейся при сжигании березы, будет более эффективным. Однако в системах с более концентрированными растворами красителя наиболее перспективно использование для этих целей золы, образующейся при сжигании березы, обладающей большей адсорбционной активностью по сравнению с золой, образующейся при сжигании сосны.

Установлено, что для описания адсорбционных процессов на зольных материалах изотермы адсорбции с использованием моделей Ленгмюра и Фрейндлиха хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Показано, что исследованные образцы золы, образующейся как при сжигании березы, так и сосны, являются эффективными адсорбентами для метиленового голубого, поэтому их применение в очистке водных растворов от соединений, схожими по строению с метиленовым голубым, является целесообразным.

Установлено, что степень извлечения метиленового голубого из водных растворов достигает более 90 % и может быть доведена до полного удаления красителя без применения дополнительных реагентов. Предельная сорбционная емкость золы, образующейся при сжигании березы, по отношению к метиленовому голубому, составила 4,6020 мг/г, золы, образующейся при сжигании сосны, 1,6426 мг/г.

Литература

1. Балыкин, В.П. Адсорбция метиленового синего и метанилового желтого на углеродной поверхности / В. П. Балыкин, О. А. Ефремова, А. В. Булатов // Вестник Челябинского государственного университета. – 2004. – № 4 (1). – С. 310–319. (С. 46–54).
2. Вильдбахер, Н. Утилизация золы котельных, работающих на древесном топливе / Н. Вильдбахер. – Минск. 2007. – 28 с.
3. Котова, Д. Л. Равновесная сорбция метиленового голубого на клиноптилолите / Д. Л. Котова, А. И. Сокрыкина, Т. А. Крысанова // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2019. – Т. 19. – № 2. – С. 174–178. DOI: <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2019.19/735>.
4. Крылов, Д. А. Негативное влияние элементов-примесей от угольных ТЭС на окружающую среду и здоровье людей // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 12. – С. 77–87.
5. Лишай, А. В. Адсорбция метиленового голубого энтеросорбентами различной природы / А. В. Лишай, Т. А. Савицкая, Н. Г. Цыганкова, Д. Д. Гриншпан, Джун Чен // Журнал Белорусского государственного университета. Химия. – 2021. – № 1. – С. 58–74. DOI: <https://doi.org/10.33581/2520-257X-2021-1-58-74>.
6. Марков, В. И. Торф – возобновляемый ресурс у нас под ногами / В. И. Марков, Н. И. Волкова // Экология и промышленность России. – 2014. – № 1. – С. 58–60.
7. Соловьев, Л. П., Пронин, В. А. Утилизация зольных отходов тепловых электростанций // Современные наукоемкие технологии. – 2011. – № 3. – С. 40–42.
8. Фоменко, А. И., Соколов, Л. И. Применение зол тепловых электростанций для очистки сточных вод // Экология и промышленность России. – 2022. – Т. 26. – № 1. – С. 14–18. DOI: 10.18412/1816-0395-2022-1-14-18.
9. Худякова, Л. И. Решение проблемы утилизации золошлаковых отходов / Л. И. Худякова, О. В. Войлошников // Безопасность жизнедеятельности. – 2016. – № 3. – С. 39–41.
10. Fomenko, A. I. A Study of Sorption of Phosphate Ions from Aqueous Solutions by Wood Ash / A.I. Fomenko, L.I.Sokolov // Russian Journal of Applied Chemistry. 2015. – Vol. 88. – No. 4. – pp. 652–656. DOI: 10.1134/S1070427215040175.

A.I. Fomenko, M.A. Nazarova
Vologda State University

COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF ADSORPTION PROPERTIES OF ASH PRODUCED WHEN BURNING CONIFEROUS AND DECIDUOUS SPECIES WOOD

The results of a study of the sorption characteristics of ash formed during the combustion of wood fuel of coniferous and hardwood species (pine, birch) are presented. Based on the values of the regression coefficients, constants and parameters of the equations of the Langmuir and Freundlich adsorption models used to approximate the experimental adsorption isotherms, a comparative assessment of the adsorption properties of the studied ash samples with respect to the methylene blue dye used in water treatment as a substance-marker when testing the adsorption capacity of adsorbents was carried out.

Adsorption, wood ash, methylene blue, adsorption isotherms, adsorption capacity.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Управление в организационных системах

УДК 005.92



Р.М. Галиев

Вологодский государственный университет

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ДОКУМЕНТОВ ОРГАНИЗАЦИИ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА

В статье обоснована актуальность создания автоматизированной системы формирования документов организации учебного процесса вуза. Используются современные международные и отечественные профессиональные стандарты и методики составления учебных планов, различные нормативные документы сферы труда и сферы образования. Сформулированы требования к функциональности автоматизированной системы, установлены виды и источники необходимой информации.

Профессиональные компетенции, федеральные государственные образовательные стандарты, автоматизированные средства управления, SWEBOK, компетентностный подход.

Актуальность разработки программных продуктов, позволяющих автоматизировать методы разработки образовательных программ и учебных планов, обуславливается непрерывным изменением и согласованием больших объемов информации в основе высшего образования под воздействием различных требований и рекомендаций работодателей. Главной задачей, стоящей перед высшими учебными заведениями, является формирование качественного учебного процесса. В свою очередь, главной задачей у работодателей является поиск высококлассных специалистов, обладающих необходимыми компетенциями, получаемыми в процессе обучения. Иногда возникают настолько большие проблемы, связанные с программным обеспечением, что государственные органы вынуждены вводить жесткую процедуру лицензирования. Существует задача по отделению специалистов от программистов-любителей. Такие тенденции, естественным образом, затрагивают вузы. Перед вузами стоит важная задача наделить студентов фундаментальными знаниями.

В настоящее время рынок систем автоматизации образовательных учреждений достаточно насыщен и на нем представлены специализированные решения для учебных заведений, которые изначально разрабатывались с учетом российских законов об образовании, специфики процессов образования. Рассмотрим более подробно некоторые из них.

Структура системы «GS-Ведомости» состоит из отдельных модулей и позволяет:

1. Сократить время и повысить эффективность планирования и управления деятельностью учебного учреждения.

2. Обеспечить удобный доступ к документам, которые необходимы для функционирования учебного

заведения. К таким документам относятся учебный план, расписание занятий и др.

3. Получить необходимую информацию о студенте и проследить за его успеваемостью.

4. Вести систему электронного документооборота между структурами образовательного учреждения, тем самым уменьшить временные издержки на согласование различных документов.

5. Получать заинтересованным лицам доступ к информации об учебном процессе с помощью web-технологий: расписания занятий, экзаменов, зачетов и др.

6. Обеспечить связь между лицами вовлеченных в учебный процесс с помощью web-технологий в режиме online.

Благодаря модульной структуре «Галактика Управление Вузом», при настройке может быть выбран нужный функционал системы. Из множества существующих модулей рассмотрим модуль «Учебный процесс». Модуль предназначен для планирования и автоматизации учебного процесса вуза и позволяет:

1. Осуществлять работу с набором регламентирующих образовательный процесс стандартов второго (ГОС ВПО) и третьего поколения (ФГОС ВПО).

2. Формировать учебные планы в соответствии с образовательными стандартами. В модуле формируются планы для подготовки специалистов, бакалавров, магистров по всем формам обучения. Возможно формирование учебных графиков. В системе предусмотрен механизм сверки составленных планов по различным нормативным требованиям.

3. Выполнять расчет нагрузки кафедр и распределять ее по профессорско-преподавательскому составу. Может выполняться корректировка нагрузки в соответствии с внесенными изменениями в учебные планы.

Программный комплекс «Планы ВПО» предназначен для создания, хранения и обработки учебных планов специальностей. Содержит механизм проверки корректности составления учебного плана. Если измененный учебный план по каким-либо параметрам расходится с государственным стандартом специальности, то программа выдает сообщение об ошибке.

Главной особенностью и главной причиной, по которой система «ГОС-Мастер» была взята в качестве аналога, является возможность системы работать с классификаторами разных объектов и упорядочить элементы по многоуровневому классификатору и связывать их. Данная возможность будет реализована в нашей программе. В основе программного средства «ГОС-Мастер» лежат два основных инструмента:

1. Классификаторы позволяют описать поэлементный состав понятий, их атрибуты и иерархически упорядочить входящие в них элементы.

2. Проекция устанавливает связи между понятиями, зафиксированными в классификаторах.

Представленные на ИТ-рынке программы и системы позволяют выполнять различные функции по расчету и балансированию нагрузки учебных программ и дисциплин. При анализе аналогов не было выявлено продуктов, которые бы имели в своем распоряжении возможности по сопоставлению понятий и терминов из документов Федеральных государственных образовательных стандартов [1] (далее – ФГОС) и Профессиональных стандартов [2] (далее – ПС). Разрабатываемая система даст возможность объединить множество документов в единый комплекс. Данное действие позволит избежать ошибок несоответствия понятий этих документов. Разрабатываемая система должна помогать пользователю в принятии решения при понятийно-терминологических расхождениях сферы труда и сферы образования, автоматизировано получать и сопоставлять информацию из документов, изменять основные документы управления учебным процессом на кафедре. Автоматизированная программная система позволит обеспечить обратную связь с работодателями, решить проблемы противоречивости нормативных документов, комплексно решать задачи сферы труда и образования.

Целью исследования является определение максимально широкого спектра возможностей онтологического подхода к построению автоматизированных систем управления образованием.

Задачи исследования были сформулированы следующим образом:

1. Обосновать применимость предметных онтологий для создания образовательных систем, сочетающих свойства трудовых функций из ПС с реализацией профессиональных задач и профессиональных компетенций из ФГОС и освоения индивидуальных траекторий учебного материала.

2. Продемонстрировать работоспособность специальных программ – интеллектуальных агентов – при автоматической генерации физических или имитационных моделей, шаблонов рабочих программ.

3. В общем виде и на примере конкретной предметной области исследовать методику автоматического совмещения формулировок ФГОС в части компетентностной модели и профессиональных тре-

бований со структурой концептов онтологической базы знаний, построенной для выбранного образовательного направления и трудовых функций из профессиональных стандартов.

4. Разработать программу для ЭВМ «Система для разработки профессиональных образовательных программ».

Научная новизна заключается в рассмотрении онтологической экспертной системы управления дистанционным обучением как подмножества информационных семантических систем, подчиняющегося основным принципам их топологии, целеполагания, коммуникационной и логической интерпретации. Онтологическая модель предметной области – строится на основе анализа документов предметной области и метода слияния онтологий.

Был проведен анализ предметной области сферы труда и сферы образования. При анализе документационного обеспечения управления учебным процессом были выявлены основные компоненты: ФГОС, ПС, Основные профессиональные образовательные программы (далее – ОПОП), Примерные основные общеобразовательные программы (далее – ПООП), Рабочие программы дисциплин (далее – РПД).

ФГОС – комплекс неотъемлемых требований к образованию определенного уровня, к профессии, специальности и направленности подготовки, утвержденных федеральным органом исполнительной власти, которая осуществляет различные функции в сфере образования.

ОПОП определяет цели, ожидаемые результаты, условия при которых протекает образовательный процесс, а также позволяет определиться с оценкой качества подготовки студента по различным направлениям.

Результатами освоения ПООП являются приобретенные выпускником компетенции, т.е. его способность применять знания, умения и приобретенные навыки при решении задач, связанных с его профессиональной деятельностью.

Одной из главных проблем оценки способностей студента к будущей профессиональной деятельности является формирование необходимого и достаточного набора знаний, умений и навыков, которые бы признавались и системой профессионального образования, и работодателями. Компетентностный подход [3] является современным методологическим инструментарием в формировании ФГОС и реализующих их ОПОП. Компетентность включает в себя следующие понятия:

- знание;
- способность применять полученные знания;
- способность применять приобретенные навыки.

Компетенции формируются и закрепляются в процессе обучения. Результатом компетентностного подхода является:

- сформулированный набор компетенций, которыми должен обладать выпускник;
- к выполнению каких функций выпускник должен быть подготовлен;
- степень готовности выпускника к выполнению конкретных функций.

В настоящее время в высшем образовании выделяют следующие компетенции:

- общекультурные или универсальные компетенции;
- общепрофессиональные компетенции;
- сгруппированные по видам профессиональной деятельности профессиональные компетенции;
- профессионально-специализированные компетенции.

Идентификация всех компетенций в основном осуществляется путем анкетирования работодателей, академического сообщества и выпускников с целью адаптации образовательных программ к требованиям рынка.

Учитывая все это, кафедра выполняет следующие операции:

- составление учебного плана;
- распределение нормы нагрузки;
- составление расписания занятий за семестр;
- составление рабочей программы учебной дисциплины (РПД).

РПД направлена на подготовку определенного специалиста и представляет собой базовый учебно-методический документ.

Также были исследованы многие стандарты, в том числе и SWEBOOK [4]. SWEBOOK является руководством к своду знаний в области программной инженерии и содержит развернутое описание необходимых уровней компетенций программиста в 15 различных областях знаний.

Цели SWEBOOK:

- единое представление;
- определение границ;
- содержание;
- единый свод знаний и предоставление к нему доступа;
- разработка учебных планов и материалов;
- лицензирование;
- сертификация.

На основе SWEBOOK мы можем создать собственный словарь синонимов предметной области, с помощью которого мы будем проверять наличие необходимых компонентов в содержании ФГОС. На основе ФГОС необходимо проанализировать понятия и термины, которые обязаны быть в данном документе и которые должны быть отражены в ПС. При поиске аналогов не было найдено автоматизированных средств для подобного структурирования.

Все вышеперечисленные документы являются основой учебного процесса, составлению которого уделяется огромное значение, ведь он напрямую влияет на уровень подготовки будущих специалистов. Учет всех этих компонентов необходим при автоматизации в сфере образования.

Для предъявления требований к функционалу нашей системы рассмотрим алгоритм и некоторую последовательность действий при составлении основных профессиональных образовательных программ высшего образования с учетом профессиональных стандартов. Для этого необходимо провезти анализ трудовых функций и уточнить задачи профессиональной деятельности, к решению которых готовится

выпускник. Вышеперечисленные операции можно изобразить в виде таблицы 1.

Таблица 1

Сопоставление профессиональных задач ФГОС и трудовых функций ПС

Требования ФГОС ВО	Требования ПС
Профессиональные задачи	Обобщенные трудовые функции (ОТФ), трудовые функции (ТФ)

Для нашей системы также необходимо формирование перечня компетенций, вносимых в ОПОП дополнительно к компетенциям ФГОС. Предлагаемые работодателем описания трудовых функций могут носить несколько иной характер, чем формулировки профессиональных компетенций, формируемых в период обучения, в связи с тем, что трудовые функции предполагают наличие практического опыта, которого нет у обучающихся и который может быть сформирован у выпускников только в объеме трудоемкости практической подготовки, предусмотренной ФГОС. Оформим эти действия в виде таблицы 2.

Таблица 2

Сопоставление профессиональных компетенций ФГОС и трудовых функций ПС

Требования ФГОС ВО	Требования ПС
Профессиональные компетенции по каждому ВД	Трудовые функции по каждой ОТФ и квалификационные требования к ним, сформулированные в ПС

Вуз может изменять и расширять компетенции в соответствии с идеологией последнего поколения федеральных государственных образовательных стандартов. Также нельзя забывать, что при учете требований работодателей к профессиональным квалификациям будущих работников возникает ряд проблем. В первую очередь к ним относятся понятийно-терминологические расхождения сферы труда и сферы образования. Это происходит во многом из-за того, что документы, регулирующие развитие сфер труда и образования, разрабатываются разными ведомствами. В сфере труда и в сфере образования часто применяются термины, имеющие разную смысловую нагрузку, однако, несмотря на различия в определениях, имеются сопоставимые термины:

- «вид трудовой деятельности» из профессиональных стандартов и «основной вид профессиональной деятельности» из федеральных государственных образовательных стандартов;
- «трудовая функция» из профессиональных стандартов и «профессиональная компетенция», «профессиональная задача» из федеральных государственных образовательных стандартов;

Функция учета взаимосвязи трудовой деятельности, трудовых функций, профессиональных компетенций, профессиональных задач в интерпретации различных стандартов необходима и представляет интерес для всех вовлеченных в этот процесс сторон. Например, в основной профессиональной образовательной программе высшего образования и учебном плане прослеживается связь между дисциплинами и набором компетенций. В свою очередь, в рабочей программе учебной дисциплины

ны существует связь между компетенцией и основными темами дисциплины. С другой стороны, должны учитываться требования профессиональных стандартов. В них представлены трудовые функции по различным профессиям, трудовые действия, знания и умения, которыми должен владеть сотрудник. Нечто похожее существует и в ФГОС. Это профессиональные задачи в соответствии с видами профессиональной деятельности, которые должен решать студент.

Выделим основные операции, которые необходимо воспроизвести для работы с информацией из документов:

1. Необходимо работать с файлами ПС и ФГОС.
2. Необходимо структурировать необходимую для построения ОПОП и РПД информацию, полученную из файлов ПС и ФГОС, продумать XML-конструкции для входных и выходных документов.
3. Необходимо структурировать информацию о кафедрах, специальностях и профессиях и представлять в удобном для человека виде (справочники).
4. Необходимо формировать хранилище данных.
5. Необходимо формировать и вести словарь основных понятий стандартов ФГОС для уточнения и подтверждения полноты содержания данного документа.
6. Необходимо составление классификатора, который позволит сопоставлять понятия из документов ФГОС и ПС.
7. Необходим удобный механизм для автоматического получения информации из документов.

Упрощенная UseCase-диаграмма функций, которые выполняет работник кафедры, представлена на рисунке 1.

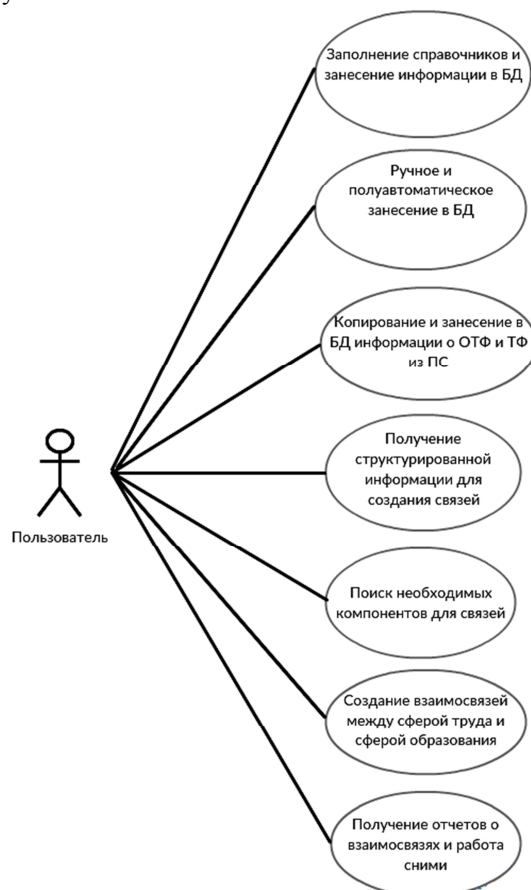


Рис. 1. Упрощенная UseCase-диаграмма

Особенности автоматизированной системы:

- реализация компетентностного подхода к формированию рабочих программ учебных дисциплин и практик основной профессиональной образовательной программы высшего образования путем выделения из текстов профессиональных стандартов, стандартов предметной области, научно-методических разработок и иных источников из сферы будущей деятельности выпускника вуза элементов компетенций;
 - формирование структурированного массива элементов компетенций и последующего управления их изменениями и распределения их между учебными дисциплинами и практиками;
 - обеспечение прослеживаемости требований к результатам освоения дисциплины до конкретного источника требований.
- Автоматизированная система предлагает:
- структуру и форматы данных массива элементов компетенций;
 - классификацию основных видов источников компетенций;
 - алгоритм сбора, обработки и систематизации информации, необходимой для формирования элементов компетенций;
 - программные средства для обработки и структурирования информации, управления изменениями элементов компетенций с учетом взаимосвязей между ними.

Разрабатываемая система может быть применима в многоуровневой архитектуре интеллектуального агентно-ориентированного учебного комплекса для подготовки специалистов технического профиля. Применение автоматизированной системы позволяет обеспечить рациональное распределение тематики учебного материала между дисциплинами и взаимную их согласованность в образовательном процессе, будет полезно при переработке документов организации учебного процесса по требованиям ФГОС 3+-. В ходе исследования был найден и апробирован метод автоматической верификации создаваемых предметных онтологий на основе семантического анализа структуры концептов совместно с компетентностной моделью обучаемого, изложенной в ФГОС третьего поколения. Был разработан алгоритм автоматической поэтапной генерации шаблонов информации ФГОС и ПС на основе DOM-представлений и XML-описаний, а также механизм полуавтоматического выбора связи между компонентами документов ФГОС и ПС. Была разработана программа для поддержки деятельности заведующего кафедрой и профессорско-преподавательского состава при планировании и согласовании ОПОП и РПД. Разработаны множество удобных механизмов работы с текстами ФГОС и ПС. Была разработана база данных для хранения информации и различные механизмы для работы, поиска и структурирования информации. На рисунке 2 представлена главная форма программы.

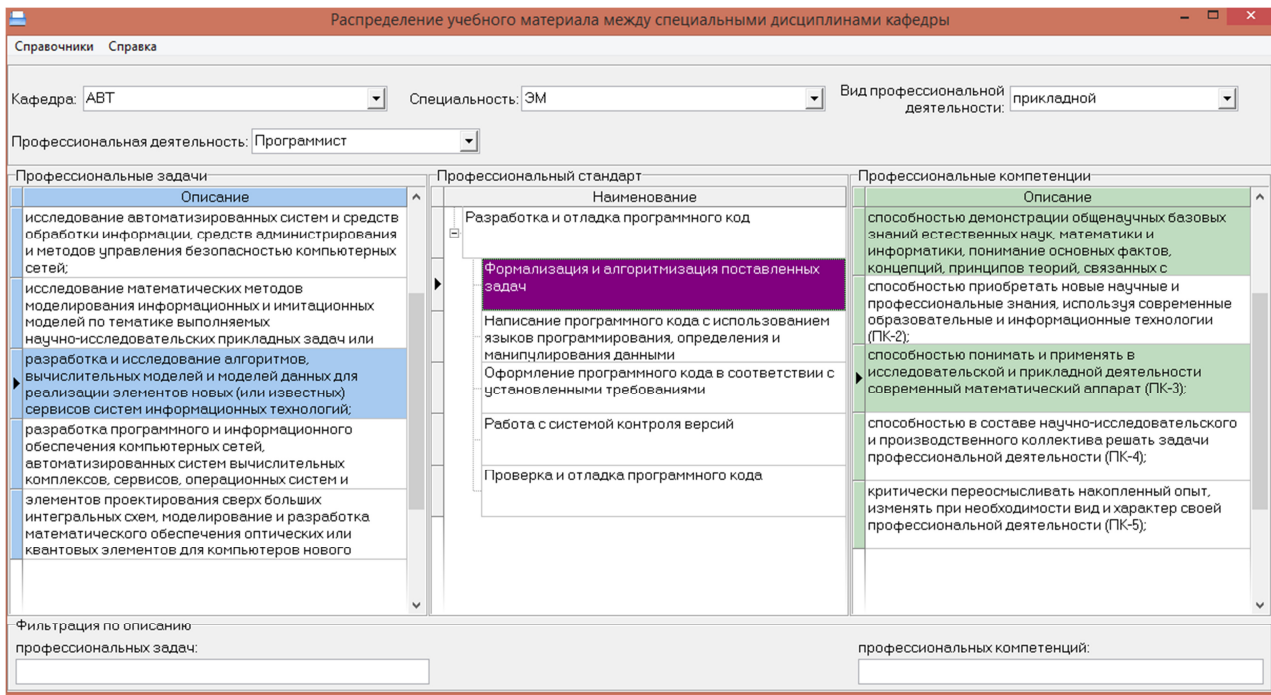


Рис. 2. Главная форма программы

Программа будет и дальше развиваться. Планируется доработка продукта и расширение его функциональности, уточнение отдельных деталей по нормативным документам. По мере исследования программа будет дополняться. Например, используя уже готовый функционал по получению информации из документов и информацию из ФГОС или ПС, мы можем создать паспорт студента, где будут учитываться все его достижения, знания и успеваемость. Данный функционал будет полезен для студента, кафедры и работодателя, так как можно будет отследить количество знаний студента, полученных в процессе образования, и скорректировать их. И это еще не все модули, которые можно будет реализовать. Таким образом, проект многогранен и обширен, представляет интерес для всех вовлеченных в данный процесс лиц. Очень важно, что проект будет построен на web-

технологиях, что повысит заинтересованность работодателей и других вузов и сделает проект более доступным.

Литература

1. Портал федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования : сайт. – URL: <https://fgosvo.ru/>
2. Профессиональные стандарты в ИТ-отделе : сайт. – URL: <https://softonit.ru/articles/it/profstandartit>.
3. Проектирование рабочей программы дисциплины на основе элементов компетенций / А. М. Полюнский, Е. А. Смирнова // Открытое образование. – Москва, 2018, 22(3). – С. 35–51.
4. Software Engineering Body of Knowledge (SWE-BOK): сайт. – URL: <https://www.computer.org/education/bodies-of-knowledge/software-engineering>.

R.M. Galiev

Vologda State University

AUTOMATED SYSTEM OF DOCUMENTS FORMATION FOR EDUCATIONAL PROCESS ORGANIZATION

The article substantiates the relevance of creating an automated system for the formation of documents for the organization of the educational process of the university. Modern international and domestic professional standards and methods for drawing up curricula, various regulatory documents in the sphere of labor and education were used. The requirements for the functionality of the automated system are formulated, the types and sources of the necessary information are established.

Professional competencies, federal state educational standards, automated controls, SWEBOK, competence approach.



ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ НЕПРЕРЫВНОЙ ИНТЕГРАЦИИ В ДИСТАНЦИОННОМ ЛАБОРАТОРНОМ ПРАКТИКУМЕ ПО ИТ-ДИСЦИПЛИНАМ

В статье предлагается способ перевода в дистанционный формат лабораторного практикума по профильным ИТ-дисциплинам. Обоснован выбор базовой технологии непрерывной интеграции (CI) и поддерживающей ее платформы GitHub в качестве основы для организации лабораторного практикума, представлена архитектура рабочей среды для выполнения работ, описаны пошаговые алгоритмы действий преподавателя и студента.

Дистанционный лабораторный практикум, технология непрерывной интеграции, автоматизированное тестирование, платформа GitHub.

В процессе перевода обучения в дистанционный формат для многих дисциплин технических направлений самые серьезные проблемы возникают при организации дистанционного лабораторного практикума. Особую актуальность эта проблема имеет для профильных дисциплин ИТ-направлений, например курсов «Программирование», «Базы данных», «Распределенные системы обработки информации», развивающих базовые профессиональные компетенции ИТ-специалистов. В статье предлагается подход к организации дистанционного лабораторного практикума по программированию и технологиям баз данных, который основан на применении современных практик разработки программного обеспечения, адаптированных к их применению в учебном процессе.

На начальном этапе исследования было проанализировано современное состояние проблемы. Несмотря на большое количество публикаций, посвященных электронным и дистанционным образовательным технологиям, среди которых стоит выделить фундаментальную монографию [4], технологии перевода в дистанционный формат лабораторного практикума по ИТ-дисциплинам развиваются в основном в практической плоскости. Имеется немало количество программных продуктов, поддерживающих дистанционное обучение ИТ-специалистов – можно выделить такие очень популярные ресурсы, как Coursera, Codeforces, Stepik, SQLEx и некоторые другие. Студенты многих российских вузов используют для тренировки навыков дистанционный практикум по программированию и технологиям баз данных, разработанный для использования в учебном процессе и подготовки к олимпиадам по программированию на кафедре автоматики и вычислительной техники ВоГУ [2].

Все перечисленные ресурсы поддерживают возможность автоматической проверки программного кода, разработанного студентами в процессе обучения, поэтому с их помощью можно хорошо отработать практические навыки разработки программного обеспечения, необходимые квалифицированному ИТ-специалисту [3]. Однако ни один из них, включая и дистанционный практикум кафедры АВТ, не поддер-

живает в полной мере процессы подготовки лабораторных работ преподавателем и пошагового выполнения работы студентами. По этим причинам все указанные ресурсы рекомендуются студентам как прекрасное дополнительное средство обучения, но не как полноценную замену лабораторному практикуму.

В поисках технологий и программных средств, позволяющих максимально сохранить все преимущества традиционного лабораторного практикума и дополнить их возможностями современных цифровых технологий, внимание привлекла технология разработки программного обеспечения, известная под названием «непрерывная интеграция» (Continuous Integration, имеет устойчивую аббревиатуру CI). Суть CI состоит в регулярных сборках и автоматическом тестировании разрабатываемого программного продукта (могут выполняться модульные, интеграционные и системные тесты) [5]. Таким образом, использование данной технологии позволяет обеспечить более универсальный и гибкий механизм контроля результатов выполнения лабораторных работ студентами, чем использование перечисленных выше обучающих ресурсов с системой автоматической проверки программного кода, которые фактически поддерживают только модульное тестирование.

Тем не менее, CI – это технология и практика разработки программного обеспечения, но не обучения информационным технологиям и программированию. В связи с этим потребовалась ее адаптация к учебному процессу, которая была выполнена для лабораторных практикумов по двум профильным для ИТ-направлений дисциплинам – «Базы данных» (бакалавриат) и «Распределенные системы обработки информации» (магистратура).

При адаптации технологии непрерывной интеграции к учебному процессу решающее значение имеет выбор подходящего программного обеспечения, которое должно быть доступным дистанционно для преподавателей и студентов, а также бесплатным. В ходе исследования в качестве возможных вариантов были проанализированы платформы GitHub, Bitbucket и GitLab. Каждый из этих известных веб-ресурсов

представляет собой хостинг для разработки, сборки и автоматического тестирования программного обеспечения и контроля версий, т.е. полностью поддерживает технологию CI.

Выбор был сделан в пользу платформы GitHub [1] благодаря ее обширным функциональным возможностям, доступности и наличию бесплатных аккаунтов (с разумными ограничениями, подходящими для учебного лабораторного практикума). GitHub предоставляет пользователям различные инструменты разработки программного обеспечения, среди которых можно выделить распределенную систему управления версиями программного продукта Git, а также систему непрерывной интеграции GitHub Actions, которая позволяет создавать конвейеры непрерывной интеграции и непрерывного развертывания для тестирования, выпуска и развертывания программного обеспечения без использования сторонних платформ. По мнению авторов, указанные программные средства могут служить хорошей основой при подготовке и проведении дистанционных лабораторных работ по профильным ИТ-дисциплинам.

Общая архитектура рабочей среды, в которой происходит дистанционное выполнение лабораторных работ, представлена на рисунке 1.

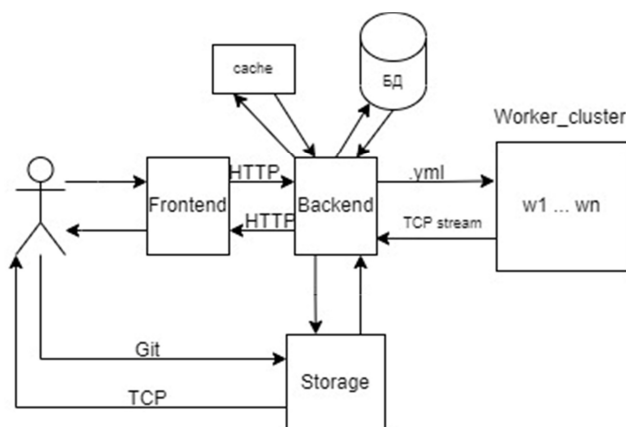


Рис. 1. Общая архитектура среды для дистанционного выполнения лабораторных работ с использованием платформы GitHub

С помощью frontend пользователь (преподаватель или студент) взаимодействует с сайтом GitHub, с помощью backend происходит взаимодействие с разными системами, такими как базы данных, кеш (отвечает за распределение задач), storage (хранит историю изменений программного продукта, который студент загружает при помощи Git в процессе выполнения лабораторной работы) и worker_cluster (рабочий кластер), на котором развернуты основные программные средства и методические материалы, необходимые для выполнения лабораторных работ. Состав и структура рабочего кластера определяется исходя из цели и задач каждой лабораторной работы или темы, объединяющей несколько лабораторных работ. Этот компонент рабочей среды формируется преподавателем в процессе подготовки работ.

В качестве конкретного примера организации рабочего кластера рассмотрим одну из тем лабораторного

практикума по дисциплине «Распределенные системы обработки информации» (PCOI) – «Разработка распределенных приложений». Тема охватывает несколько лабораторных работ, на которых осваивается процесс разработки web-приложения с использованием современных средств разработки – платформы Node.js, библиотек React и Express и «облачной» СУБД MongoDB. В процессе выполнения лабораторных работ студент должен научиться создавать серверную часть web-приложения (backend) с использованием платформы Node.js и фреймворка Express, изучить удаленную работу с СУБД MongoDB, научиться разрабатывать клиентскую часть приложения (frontend) с использованием библиотеки React. В традиционном очном варианте практикума все компоненты web-приложения, разработанные студентом в ходе лабораторных работ, проверяются (тестируются) преподавателем вручную. Дистанционный практикум кафедры АВТ не поддерживает автоматическое тестирование распределенных приложений.

На рисунке 2 представлена структурная схема рабочего кластера для дистанционного выполнения лабораторных работ с автоматическим выполнением приемочного тестирования.

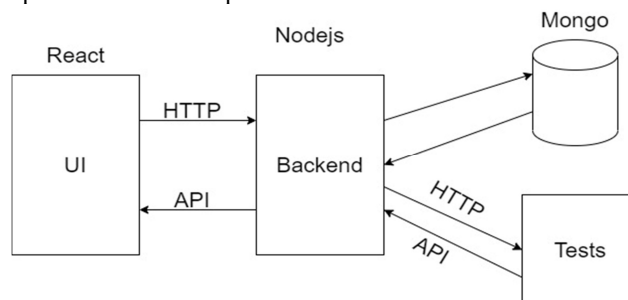


Рис. 2. Структурная схема рабочего кластера для выполнения лабораторных работ по теме «Разработка распределенных приложений»

Кластер содержит серверную часть приложения с использованием платформы Node.js (язык программирования JavaScript) и фреймворка Express, СУБД MongoDB, клиентскую часть приложения с использованием библиотеки React и тесты, написанные преподавателем.

Разберем последовательно процессы подготовки лабораторной работы преподавателем и выполнения работы студентом. Пошаговый алгоритм действий преподавателя при подготовке работы представлен на рисунке 3.

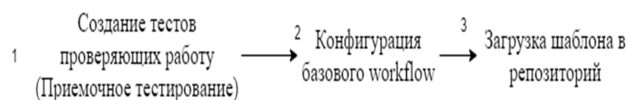


Рис. 3. Пошаговый алгоритм действий преподавателя при подготовке работ по теме «Разработка распределенных приложений»

Первый шаг преподавателя – создание приемочных тестов, которые будут покрывать основной функционал приложения. В нашем случае автотесты были написаны на языке Python. Безусловно, подготовка тестов – очень трудоемкий процесс, но при выполнении лабораторных работ студентами он избавит

преподавателя от ручной проверки результатов выполнения работы.

Второй шаг при подготовке лабораторной работы – конфигурация базового workflow (автоматизированный запуск этапов приема работы) с обязательными проверками. На GitHub создается репозиторий (хранилище всех файлов лабораторной работы) и выполняется настройка GitHub Actions на выполнение необходимых действий по приемке результатов выполнения лабораторной работы.

Наконец, заключительный шаг – загрузка шаблона в репозиторий, который имеет подготовленные тесты и настроенные автоматизированные проверки, т.е. результаты первых двух шагов.

Подготовленная таким образом лабораторная работа уже готова к дистанционному выполнению студентами. Пошаговый алгоритм выполнения работы студентами представлен на рисунке 4.

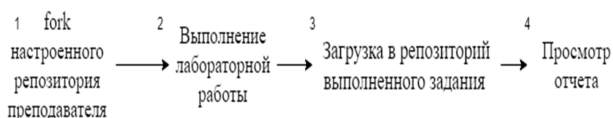


Рис. 4. Пошаговый алгоритм действий студента при дистанционном выполнении лабораторной работы

Студент делает fork (копирование) настроенного репозитория преподавателя, после чего работа выполняется в настроенной среде. Студент выполняет лабораторную работу согласно методическим указаниям, а затем загружает результаты с помощью git'a в GitHub.

В ответ на это событие GitHub Actions запускает автоматическое тестирование, после чего студент просматривает отчет о выполненных тестах. Если все тесты пройдены успешно, то лабораторная работа считается выполненной, если есть ошибки – в отчете будут они указаны, при этом будет выведен http-код. После исправления ошибок студент имеет возможность снова загрузить свои файлы в репозиторий и получить новый отчет о результатах проверки. Количество попыток сдачи результатов выполнения лабораторной работы не ограничено, основной критерий

приема работы – прохождение всех приемочных тестов без ошибок.

В настоящее время репозиторий на GitHub полностью подготовлен и настроен. Проведены эксперименты по дистанционному выполнению лабораторных работ магистрантами, которые показали хорошие результаты. Для того, чтобы не потерять возможности обратной связи, в течение всей лабораторной работы открыта видеоконференция в Google Meet.

Представленная в статье технология позволяет полностью сохранить весь функционал имеющегося лабораторного практикума, проводимого в очной форме, и дополнить его новыми возможностями. Благодаря автоматическому тестированию проверка результатов выполнения работы стала более качественной. Преподаватель избавился от рутинной и трудоемкой работы по проверке программного кода. Студенты в процессе выполнения работы получают опыт удаленной разработки программного обеспечения с использованием современной цифровой платформы.

Литература

1. GitHub: [Электронный ресурс]. – URL: <https://github.com/> Дата обращения 11.07.2022
2. Андрианов, И. А., Ржеуцкая, С.Ю., Харина, М. В. Междисциплинарный дистанционный практикум для студентов ИТ-направлений // Открытое образование. – 2021. – Т. 25. – № 2. – С. 41–50
3. Ржеуцкая, С. Ю., Харина, М. В. Способ автоматического подбора учебно-тренировочных заданий в информационной среде обучения студентов ИТ-направлений // Открытое образование. – 2020. – Т. 24. – № 2. – С. 17–28.
4. Роберт, И. В. Теория и методика информатизации образования (психолого-педагогический и технологический аспекты) – Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. – 398 с.
5. Сергушичева, А. П. Технологии разработки программного обеспечения : учебное пособие. – Вологда : ВоГУ, 2019. – 92 с.

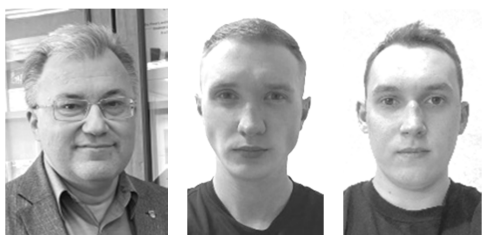
M.V. Denisova, S.Yu. Rzhеutskaya
Vologda State University

USE OF CONTINUOUS INTEGRATION TECHNOLOGY IN DISTANT LABORATORY PRACTICE ON IT DISCIPLINES

The article suggests a way to transfer a laboratory practice in specialized IT disciplines to a remote format. The choice of the basic continuous integration (CI) technology and the GitHub platform supporting it as the basis for organizing a laboratory practice is substantiated, the architecture of the work environment for performing work is presented, step-by-step algorithms of teacher and student actions are considered.

Distant laboratory practice, continuous integration technology, automated testing, GitHub platform.

УДК 620.193



Н.А. Бормосов, М.М. Лукинов, А.В. Соколов
Вологодский государственный университет

ИССЛЕДОВАНИЯ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ СТАЛЕЙ ДЛЯ КОТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В данной работе приведены результаты исследований коррозионной стойкости сталей для котельного оборудования, применяющегося при сжигании твердых бытовых отходов на мусоросжигательном заводе. Представлен обзор путей повышения технологических параметров пара путем повышения коррозионных свойств элементов котельного оборудования.

Твердые бытовые отходы (ТБО), мусоросжигательный завод (МСЗ), котельная установка, паросиловой энергоблок, параметры пара, антикоррозионные покрытия, коррозионная активность продуктов сгорания, коррозионностойкая сталь.

Повышение электрического КПД мусоросжигательного завода (МСЗ) возможно при помощи повышения параметров пара на выходе из котельной установки.

В силу специфических свойств твердых бытовых отходов (ТБО), котельные установки, сжигающие твердые бытовые отходы, имеют ограничения по параметрам пара. На российских МСЗ давление и температура пара, как правило, не превышают 320 °С и 1,3 МПа. Так, на мусоросжигательном заводе № 4, г. Наро-Фоминск, Московская область, пар с соответствующими параметрами направляется на две турбины П-6-1,2 мощностью по 6 МВт. Такие значения обусловлены более высокой коррозионной агрессивностью продуктов сгорания по отношению к поверхностям нагрева. Это, в первую очередь, металлические трубы топки котла и пароперегревателей. При этом на зарубежных МСЗ минимальные значения параметров пара составляют не менее 4,0 МПа, 400 °С [1].

Анализ результатов исследований по высокотемпературной коррозии поверхностей нагрева котельных показывает несколько путей повышения технологических параметров пара:

- увеличение температуры пара за счет дополнительного пароперегревателя, работающего на органическом топливе;
- применение антикоррозионных покрытий на трубах пароперегревателя [2];
- использование топливных присадок, снижающих коррозионную активность продуктов сгорания [3];
- использование более коррозионностойкого материала для поверхностей нагрева.

Использование внешнего дополнительного перегрева пара заключается в комбинированном способе, основу которого составляют парогазовая установка (ПГУ) и паросиловой энергоблок, сжигающий ТБО.

В данном случае котел генерирует насыщенный или слабо перегретый пар, который после перегрева до конечной температуры в котле-утилизаторе ПГУ. Схема МСЗ, которая включает в себя комбинированный парогазовый цикл и паросиловой энергоблок, сжигающий бытовые отходы, представлена на рисунке 1.

К наиболее эффективным топливным присадкам, уменьшающим коррозионную активность продуктов сгорания, относятся присадки на основе серы [3]. Такие присадки уменьшают коррозионную активность на 30÷50 %. Вместе с тем отмечается, что с применением таких присадок ухудшаются экологические показатели, а именно увеличивается содержание оксидов серы. Затраты, необходимые на дополнительную очистку дымовых газов, приблизительно приравниваются к стоимости самих присадок.

Исследования и практический опыт применения защитных антикоррозионных покрытий на трубах пароперегревателей в котельных установках по переработке ТБО, показывает, что наиболее эффективными являются электролитические защитные покрытия на основе никеля. Данный способ является слабо эффективным в силу того, что повторное нанесение покрытия на поверхности сварных соединений пароперегревателей затруднено. Также в момент очистки поверхностей нагрева от отложений стойкость таких покрытий снижается.

Таким образом, наиболее оптимальным вариантом является выбор более коррозионностойкого материала котельного оборудования.

К основным факторам, влияющим на интенсивность появления высокотемпературной коррозии котельного оборудования, относятся:

- состав продуктов горения;

- время, продолжительность горения;
- температура продуктов сгорания и поверхностей металла;
- структура оксидной пленки и слоя продуктов коррозии;
- марка стали.

На процесс образования коррозии больше всего оказывают влияние содержащиеся в продуктах сгорания H_2O и соединения серы. В частности, хлориды щелочных металлов под воздействием SO_2 и SO_3 в конечном результате в продуктах сгорания и в отложениях превращаются в сульфаты. На рисунке 2 показана зависимость уменьшения количества хлора пропорционально повышению в отложениях серы при температуре наружной поверхности трубы $530 \div 650$ °С.

Высокотемпературная газовая коррозия описывается степенным уравнением вида [4]:

$$G^n = k \cdot \tau, \quad (1)$$

- где G – удельная потеря массы;
 k – коэффициент, включающий несколько факторов, в том числе температуру стенки;
 n – показатель степени окисления, описывающий динамику коррозии во времени;
 τ – время.

При температуре поверхности металла ниже 300 °С процесс протекания коррозии незначительный, но если температура начинает превышать 500 °С, скорость разрушения металла котельного оборудования увеличивается в разы и уже менее чем через 1000 ч работы пароперегреватели выходят из строя. Данная зависимость представлена на рисунке 3.

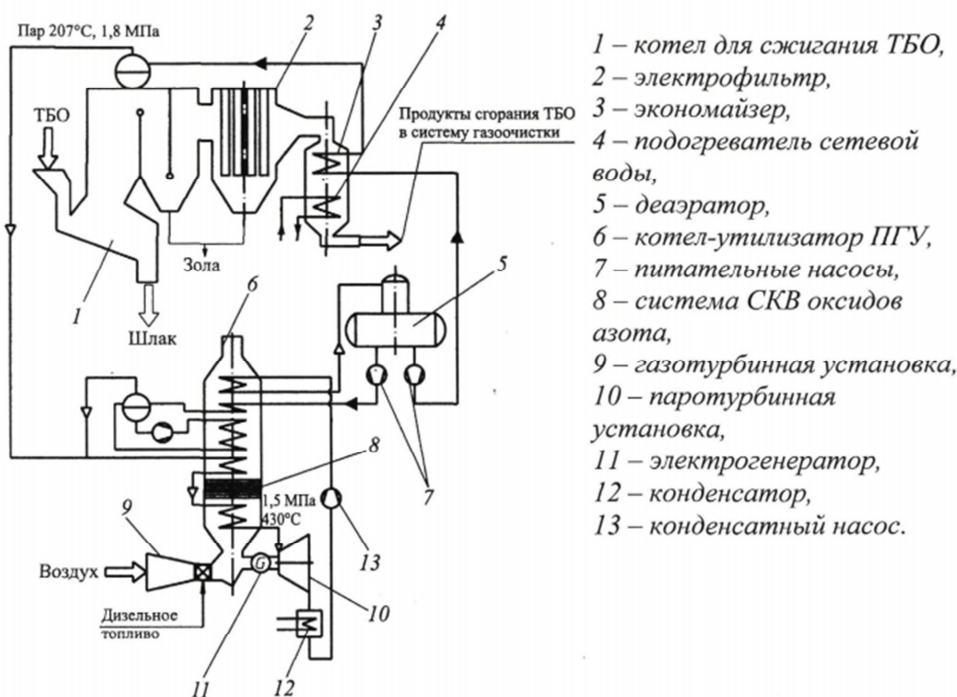


Рис. 1. Схема комбинированного парогазового цикла на МСЗ



Рис. 2. Зависимость изменения хлора и серы в отложениях: 1 – Cl; 2 – SO_3

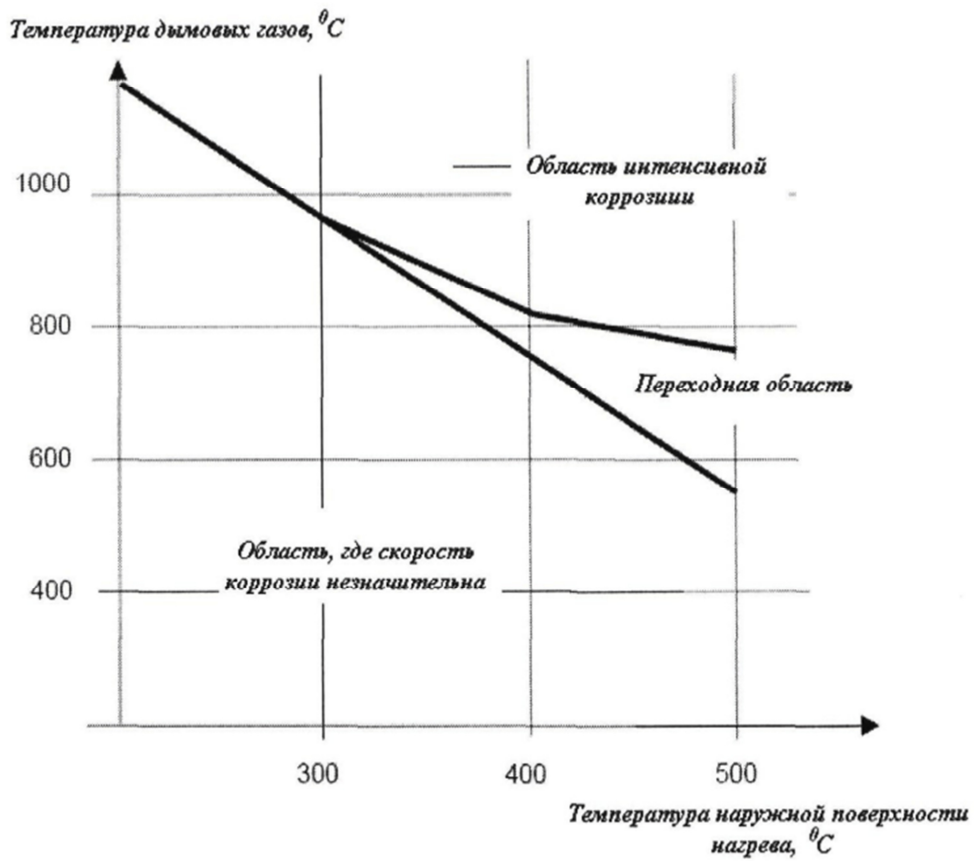


Рис. 3. Влияние температуры дымовых газов и температуры наружной поверхности нагрева на высокотемпературную газовую коррозию

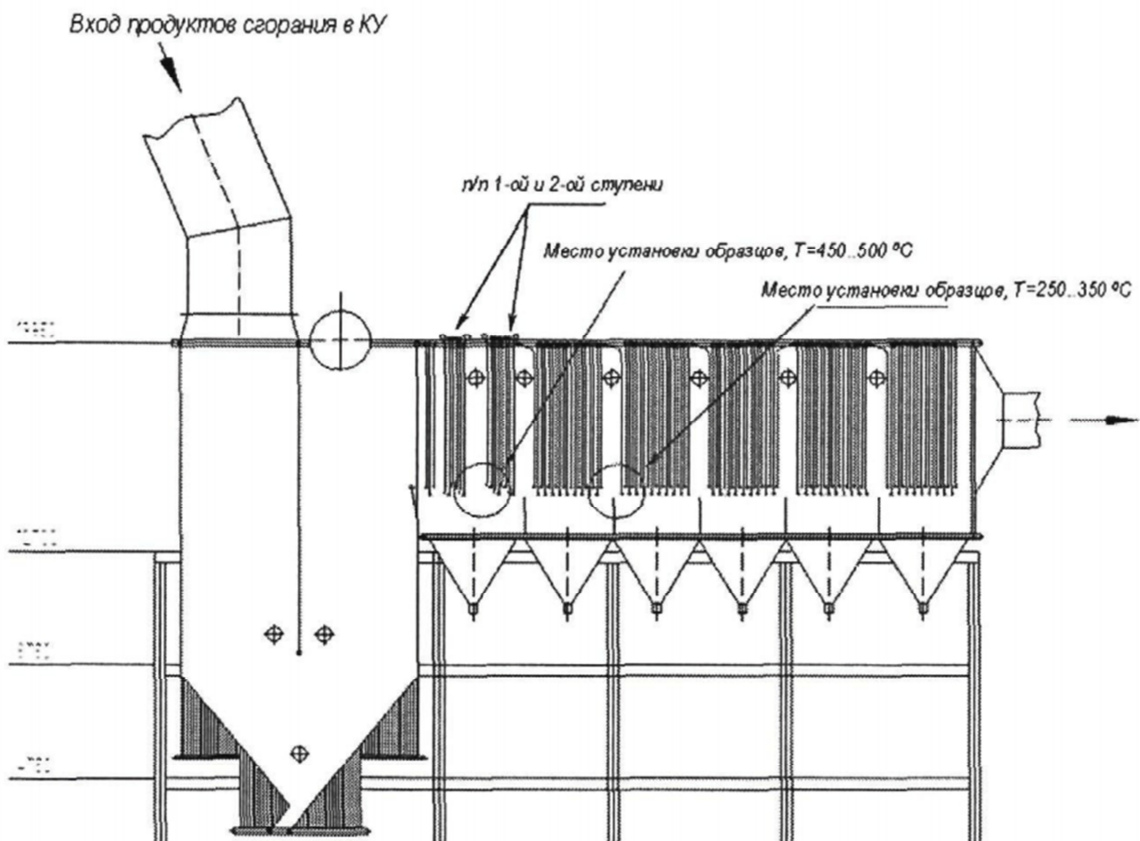


Рис. 4. Схема проведения испытания стальных образцов на МСЗ № 4

Диффузионная проницаемость зависит от структуры оксидной пленки и слоя продуктов коррозии. Если диффузионное сопротивление высокое, интенсивность коррозионных процессов контролируется диффузией коррозионно-агрессивных компонентов. Если диффузионное сопротивление минимально, оксидная пленка отсутствует, а слой продуктов коррозии имеет рыхлую пористую структуру. В последнем случае процесс коррозии контролируется только скоростью физико-химических реакций между сталью и коррозионно-агрессивными компонентами.

На мусоросжигательном заводе № 4 проводились испытания сталей на параметр коррозионной стойкости.

Испытания проводились на протяжении 1700 часов, в течении которых, неохлажденные образцы

из стали поместили в зону пароперегревателя второй выходной ступени, температура составляла приблизительно 450÷500 °С, также в зону перед испарителем второй ступени при температуре 250÷350 °С. Температура контролировалась при помощи термопар расположенных в местах испытаний образцов, размещение которых представлено на рисунке 4. При испытаниях использовались образцы из следующих марок стали: Сталь 20, 15ГС, 09Г2С, 12МХ, 15ХМ, 12Х1МФ, 08Х18Н10Т, 12Х18Н12Т, ДИ 59, ДИ 82, 16Мо3 и P235GH.

При помощи микрорентгеноспектрального исследования для каждого образца был выполнен анализ элементного состава и структуры слоя продуктов коррозии.

Таблица 1

Результаты проведенного испытания на основании микрорентгеноспектрального анализа продуктов коррозии

Сталь	Содержание элементов, %								
	Na	K	Ca	Cl	S	Fe	Si	Al	Cr
08Х18Н10Т	4,88	0,39	0,42	-	-	27,8	0,83	0,23	16,2
12Х18Н12Т	3–4	2,25	-	1,2–1,9	1,7–1,8	24,5	0,6–0,8	-	13,3
ДИ 59	20,9–23,5	2,4–8,4	-	1,3	6,7–16	5–10	0,64	0,31	1,4–1,56
09Г2С	9,5–16,5	1,5–7,1	0,2–1,4	-	1,1–6,5	21,3–21,9	0,1–1,1	0,4–0,6	-
12МХ	2,2–4,5	0,16	-	1–2,5	0,4–0,6	46,5–59	0,24	1,23	0,68
P235GH	31,88	1,62	-	-	16,68	0,66	-	0,19	-
15 ХМ	7,9–12,5	4,4–22	1,06	0,2–0,6	4,7–16	2,2–36,3	0,1–0,7	0,1–4,1	0,73
16Мо3	2,69	0,55	-	2,9–8,1	-	41,1–52	0,2–0,4	0,26	-
15ГС	0,91	0,29	0,34	0,42	-	57,8	0,45	-	-
12Х1МФ	0,9–2,34	0,2–0,4	-	1,1–8,6	0,5–1,3	52,5–62	0,26	0,16	0,5–0,99

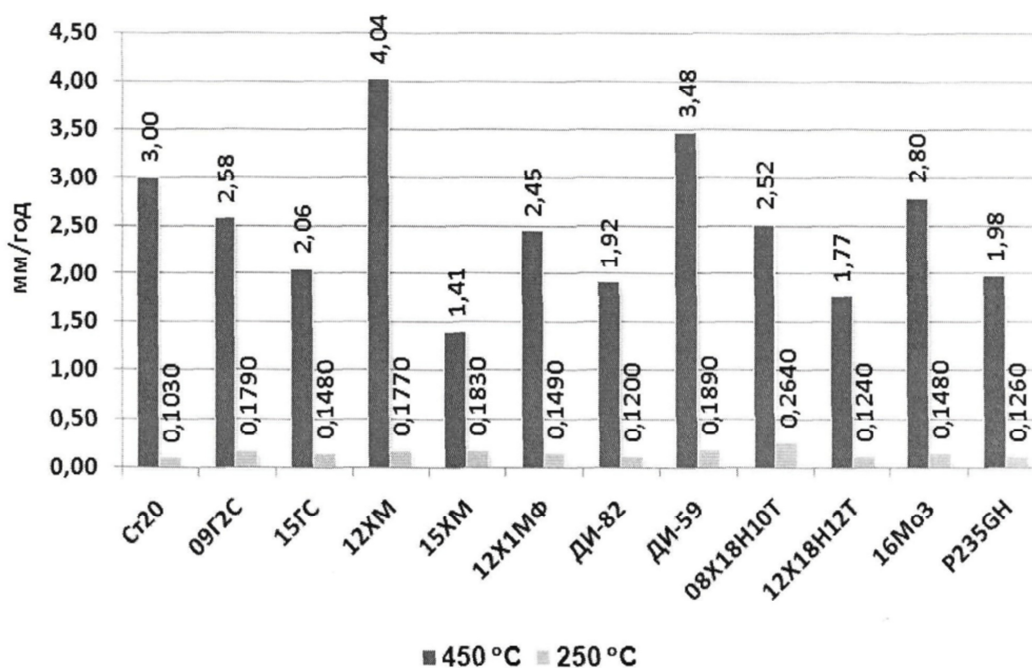


Рис. 5. Результаты испытаний по коррозионной стойкости марок сталей длительностью 1700 ч при температуре 450 и 250 °С

Испытания показали, что коррозия имеет многослойную структуру и толщину около 2 мм, также между металлом и механически прочным слоем окалины имеется зазор, заполненный рыхлой коррозией. Такая структура коррозии получилась на всех образцах и изменялась лишь толщина слоя коррозии и количество слоев. В таблице 1 приведены сводные результаты проведенного испытания на основании микрорентгеноспектрального анализа продуктов коррозии.

Из результатов испытаний, приведенных в таблице 1, следует, что:

Структура коррозии на всех образцах, принимавших участия в испытаниях, одинаковая, характеризуется следующими особенностями: слой продуктов коррозии – многослойный, чаще всего двухслойный; на поверхности металла отсутствует оксидная пленка; коррозионный износ имеет равномерный характер, на образцах не обнаружено очагов локализации.

Скорость коррозии определяется методом измерения толщины стенки при помощи микроскопа с точностью до 0,01 мм и весовым методом. Результаты приведены на рисунке 5.

Из рисунка 5 видно, что при температуре металла 450 °С скорость коррозии высоколегированных сталей (12X18H12T, 08X18H10T, ДИ 59) составляет 1,8÷3,5 мм/год, а для углеродистых, перлитных этот диапазон варьируется 1,4÷4,05 мм/год. Отсюда можно сделать вывод, что влияние уровня легирования на коррозионную стойкость не значительно. Такая же зависимость прослеживается и для металлов при температуре 250 °С.

При выборе марки стали для котельного оборудования основными критериями является зависимость глубины коррозии от времени эксплуатации и температуры. Для расчетов этих показателей был выбран параметрический метод, который является наиболее предпочтительным для обработки экспериментальных данных, полученных по результатам испытаний [4, 6]

В основе данного метода лежит закон Аррениус, описывающий температурную зависимость окисления металлов, который применительно к процессам высокотемпературной коррозии может быть записан в виде уравнения:

$$\Delta S^n = K_0 \cdot e^{-\left(\frac{Q}{RT}\right)} \cdot \tau, \quad (2)$$

где S – глубина коррозии;

n – показатель параболы в кинетическом законе окисления;

K₀ – константа, характеризующая данную сталь и коррозионную среду;

Q – кажущаяся энергия активации процесса, Дж/моль;

T – абсолютная температура, К;

R – универсальная газовая постоянная, Дж/моль·К;

τ – продолжительность, ч.

По результатам обработки полученных экспериментальных данных эта итоговая зависимость $\Delta S = f(T, \tau)$ была преобразована в виде:

$$\ln \Delta S = a \cdot \ln(\tau) - \frac{b}{T}, \quad (3)$$

где a, b – эмпирические константы.

В таблице 2 приведены эмпирические константы для определения глубины коррозии котельных сталей в среде продуктов сгорания ТБО.

Таблица 2

Эмпирические константы для определения глубины коррозии котельных сталей в среде продуктов сгорания ТБО

№	Марка стали	a	b
1	Сталь 20	0,68	6300
2	09Г2С	-1,02	5115
3	15ГС	-1,31	5070
4	12ХМ, 15ХМ, 12Х1МФ	-0,87	5250
5	ДИ 82 (10Х9МФБ-Ш)	-2,14	4745
6	08Х18Н10Т, 12Х18Н12Т	-2,04	4545
7	16Мо3	-0,78	5340
8	P235GH	-1,1	5260

Полученная зависимость позволяет оценивать ресурс и межремонтный период пароперегревателя котлов, сжигающих ТБО. Это позволяет выбрать марку стали для поверхности котельного оборудования.

Достоверность применения методики приведена в [5] путем сопоставления расчетных данных с результатами инструментального контроля вырезов из труб поверхностей котельного оборудования мусоросжигательного завода № 4, изготовленных из сталей Сталь 20 и 12Х1МФ. Глубина коррозии этих сталей при эксплуатации на протяжении 13 тыс. ч и характерных температурах сравнивались с результатами контрольных образцов. Значение глубины коррозии для сталей Сталь 20 и 12Х1МФ, полученные на основе полуэмпирических зависимостей, хорошо согласуется с испытанием контроля вырезов труб.

Таким образом, одним из наиболее эффективных способов борьбы с коррозией сталей котельного оборудования является борьба с отложениями в топках котельных установок (например, ультразвуковая очистка). Также дополнительными способами борьбы с коррозией является уменьшение HCl путем очистки газов и увеличение толщины стенки труб до 7 мм.

Литература

1. Тугов, А. Н. О выборе параметров пара для установок, сжигающих бытовые отходы / А. Н. Тугов, Э. П. Дик, Е. Н. Зеликов // ВэйстТэк-2005: сб. докл. 4-го междунар. конгресса по управлению отходами, 31 мая – 3 июня 2005. – Москва : СИБИКО, 2005. – С. 286–287.
2. Ansey, J.-W. Electrolytic Coated and Components in Waste Incineration and Power Generation Plants as Protection Against Corrosion 11VGB Power Tech. – 2003. – № 6. – pp. 88–93.
3. Кособокова, Э. М. Разработка и исследование высокоэффективных присадок, обеспечивающих эксплуатацию ГТУ на остаточных топливах: Автореферат дис. ... канд. техн. наук. – Москва, 1978. – 21 с.
4. Никитин, В. И. Параметрический метод определения характеристик жаростойкости металлов и сплавов // Защита металлов. – 1969. – № 1. – С. 62–69.

5. Зеликов, Е. Н. Повышение надежности пароперегревателей котлов ТЭС для сжигания твердых бытовых отходов: Дис. ... канд. техн. наук. – Москва, 2008. – 185 с.

6. Никитин, В. И. Жаростойкость конструкционных материалов энергомашиностроения: Руководящие указания / В. И. Никитин, И. П. Комиссарова, М. В. Ревзюк. – Ленинград, 1978. – 233 с.

N.A. Bormosov, M.M. Lukinov, A.V. Sokolov
Vologda State University

STUDY OF BOILER EQUIPMENT STEELS CORROSION RESISTANCE

This paper presents the results of the studies of the corrosion resistance of steels for boiler equipment used in the combustion of municipal solid waste at an incineration plant. An overview of ways to improve the technological parameters of steam by increasing the corrosion properties of boiler equipment elements is presented.

Keywords: municipal solid waste (MSW), waste incineration plant (WIP), boiler plant, steam power unit, steam parameters, anticorrosion coatings, corrosive activity of combustion products, corrosion-resistant steel



ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ НА ДЕЙСТВУЮЩЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ

В данной статье приведены результаты испытаний двух способов термической переработки отходов на мусоросжигательных заводах. Дана сравнительная оценка применения различных технологий переработки твердых бытовых отходов (ТБО), их особенности и недостатки. Представлены схемы процессов сжигания ТБО на колосниковых решетках и в вихревом кипящем слое. Представлены предложения по оптимизации технологического процесса термической переработки отходов.

Твердые бытовые отходы (ТБО), мусоросжигательный завод (МСЗ), котельная установка, паросиловой энергоблок, технология сжигания ТБО на колосниковых решетках, технологии сжигания ТБО в вихревом кипящем слое, тепловые потери, внешняя циркуляция, паропроизводительность, время прогрева и сушки, воспламенения, горения и дожигания отходов.

Эколого-экономическая оценка существующих способов переработки твердых бытовых отходов (ТБО) дает основание утверждать, что оптимальными для переработки всей массы образующихся отходов (без разделения потоков жилого и нежилого сектора) являются комбинационные технические решения (комплексная переработка) [1].

На выбор рациональной технологии переработки ТБО для целей создания на ее базе эффективного энергопроизводящего комплекса влияют следующие факторы [2]:

- морфологический состав ТБО;
- требования по соблюдению экологических и санитарно-гигиенических норм;
- производительность по энергопродуктам;
- требования, предъявляемые к продуктам переработки;
- число компонентов, входящих в состав отходов, которые в данных технико-экономических условиях представляют практическую ценность и должны извлекаться в самостоятельный продукт, наличие потребителей этой продукции;
- число компонентов, которые являются опасными и должны быть удалены из отходов либо по экологическим соображениям, либо исходя из требований процессов дальнейшей обработки.

При выборе рациональной технологии термической переработки ТБО руководствуются следующим критериям [3, 4]:

- количество и токсичность отходов и газовых выбросов, возможность их обезвреживания и утилизация (экологический критерий);
- уровень развития технологии, надежность оборудования, степень автоматизации процесса, эксплуатационные характеристики, требования по безопасности, необходимость подготовки отходов и использования дополнительного топлива, других компонентов (технологический);

- уровень капитальных и эксплуатационных затрат (экономический);

- КПД энергопроизводства (энергетический).

В таблице 1 приведена оценка технологий термической переработки отходов.

Как показывает оценка технологий термической переработки отходов, наиболее эффективными способами являются слоевое сжигание на колосниковых решетках и сжигание в кипящем слое. Они имеют существенное преимущество перед другими методами термической обработки ТБО по группе общих критериев. Это, прежде все, высокий уровень длительный гарантийный срок эксплуатации (не менее 15 лет), относительно низкие затраты и др.

Испытания **технологии сжигания ТБО на колосниковых решетках** проводили на мусоросжигательном заводе № 2, расположенном в г. Наро-Фоминске Московской области.

МСЗ № 2 является теплоэлектростанцией, работающей на альтернативном виде топлива – ТБО. Завод введен в эксплуатацию после реконструкции в 2000 г.

В состав завода входят цех по приему и подготовке отходов, три энерготехнологические установки для термической утилизации ТБО с выработкой пара, оборудование тепловой схемы, включая три турбины П-1,2-13/6, оснащенные воздушно-конденсационными установками (ВКУ), цех по приему, переработке и отгрузке отходов от сжигания ТБО, цех химводоподготовки и другое оборудование.

Проектная производительность каждой энерготехнологической установки при теплоте сгорания ТБО 6285 кДж/кг составляет 8,33 т/ч.

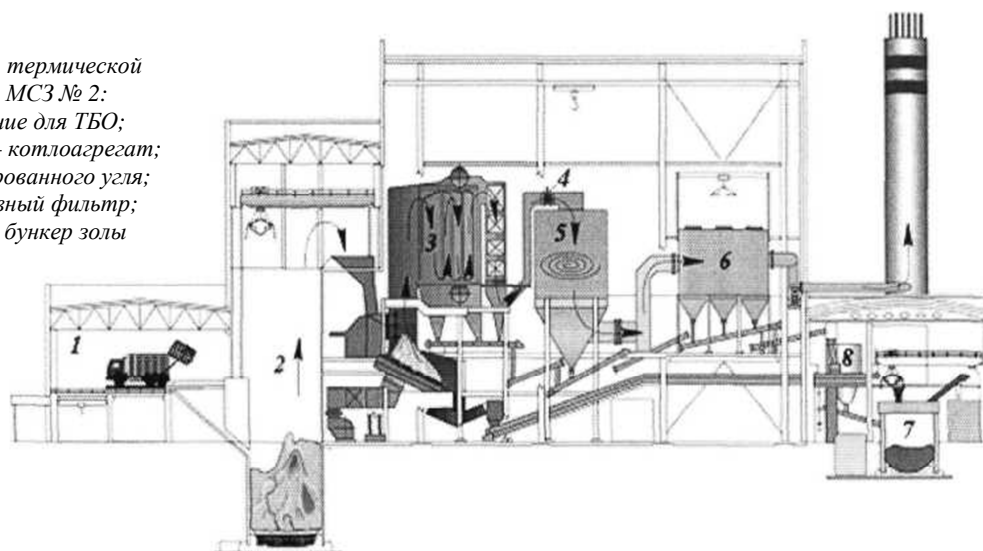
На рисунке 1 представлена схема технологического процесса утилизации ТБО, реализованная на МСЗ № 2.

Сравнительная оценка технологий термической переработки отходов

Критерии оценки	Макс. возм. сумма баллов	Термические технологии					
		Слоевое сжигания	Кипящий слой	Шлаковый расплав	Электрошлаковый расплав	Коксование + сжигание (Сименс)	Газификация (ИХФЧ)
1. Общие критерии	265	235	150	-125	-90	35	100
Уровень развития технологии	50	50	40	-50	-50	0	20
Гарантийный срок эксплуатации	30	30	30	0	0	30	30
Относительная суммарная стоимость оборудования	30	0	0	-30	-30	-30	15
Необходимость подготовки ТБО	30	30	-15	30	30	-30	-30
Необходимость дополнительного топлива	20	20	20	20	20	20	20
Необходимость дополнительных компонентов (флюс, теплоносит)	25	25	-5	-25	-25	-10	-10
Пусковой период	20	20	20	-20	-20	20	20
Ремонтопригодность	25	25	25	-25	-25	0	0
Взрыво-, пожаробезопасность	25	25	25	-25	0	25	25
Диапазон рабочих нагрузок	10	10	10	0	10	10	10
2. Производство энергии	115	75	75	35	20	105	85
Производство тепловой энергии	20	20	20	20	20	20	20
Соответствие ГОСТ «Котлы паровые стац. для сжигания ТБО»	10	10	10	10	10	10	10
Производство электр. энергии	15	15	15	15	0	15	15
Разность между производством и потреблением энергии	30	30	30	-30	-30	30	30
Дополнительное производство энергоносителей в техн. цикле	20	0	0	0	0	10	10
Получение товарной продукции	20	0	0	20	20	20	0
3. Экологические критерии	185	20	45	140	127,5	105	115
Наличие раздельных систем сбора и удаление шлака и золы	15	-15	-15	15	15	15	15
Возможность утилизации шлака	15	15	15	15	15	15	15
Возможность обезврежив. золы	20	-20	-20	20	20	20	20
Удельный объем дымовых газов	25	0	10	25	12,5	15	20
Возможность подавления вредных примесей	90	20	35	45	45	20	25
Утечка запаха	20	20	20	20	20	20	20
4. Прочие критерии	35	10	10	5	5	10	20
Дополнительные требования к персоналу	15	0	0	-15	-15	0	0
Возможность изготовления оборудования в России	20	10	10	20	20	10	20
ИТОГО	600	340	280	55	62,5	255	320

Рис. 1. Схема процесса термической утилизации ТБО на МСЗ № 2:

- 1 – приемное отделение для ТБО;
 2 – приемный бункер; 3 – котлоагрегат;
 4 – узел подачи активированного угля;
 5 – абсорбер; 6 – рукавный фильтр;
 7 – бункер шлака; 8 – бункер золы



Структура мусоросжигательного завода состоит из трех энерготехнологических установок, которые включают в себя топку, котел утилизатор (КУ) и систему газоочистки. Камера сжигания – топка выполнена в форме параллелепипеда, наклоненного под углом 30°, который соединен с вертикальной камерой дожигания с восходящим потоком газов. Камера сжигания и вертикальная камера дожигания ограждены испарительными экранами нагрева КУ, которые закрыты огнеупорной футеровкой. Топка оснащена двухсекционной обратной переталкивающей колосниковой решеткой немецкой фирмы «Martin», разделенной по ширине на две части, с приемным столом, на который подают твердые бытовые отходы. Далее отходы перемещаются от узла загрузки к шлаковой ванне при помощи подвижных колосников.

Процесс сжигания начинается и поддерживается при помощи газовой вихревой однопочечной горелки с подачей газа по центру, максимальная теплопроизводительность 2,8 МВт. Горелка расположена в нижней части топки котла на задней стене. Газовая горелка, установленная на боковой стене у газового окна камеры дожигания, предназначена для розжига и поддержания температуры газов на выходе из камеры дожигания. Горелка вихревая однопочечная с центральной подачей газа, максимальной теплопроизводительностью 4,65 МВт. Кроме разогрева топки до 850 °С перед подачей ТБО в топку и стабилизацией режима эти горелки используют для поддержания данной температуры при останове котла до полного выгорания ТБО.

Температура воздуха под колосниковой решеткой и на верхней газовой горелке достигает 160 °С. Подогрев его осуществляется в паровом воздухоподогревателе. Воздух на нижнюю горелку поддержания горения подается от индивидуального вентилятора, встроенного в горелку. Часть воздуха для обеспечения полноты процесса сжигания вдувается в поток продуктов сгорания на входе в котел-утилизатор, расположенный над топкой.

После камеры дожигания дымовые газы переходят во второй нисходящий газоход, в котором расположены поверхности пароперегревателя. В третьем восходящем газоходе размещен конвективный пучок, который совместно с верхним и нижним барабанами образуют самостоятельный циркуляционный контур. Газовый тракт котла завершается четвертым нисходящим газоходом, в котором размещен водяной экономайзер с подвесной системой.

Тепло, образующееся в котле за счет дымовых газов, используют для получения пара, который со всех трех установок поступает в общий паровой коллектор и далее в турбину. Охлаждение отработанного в турбинах пара осуществляется в ВКУ.

При помощи карбамида и реагентов в мокросухом абсорбере происходит снижение концентрации вредных веществ в дымовых газах. От твердых веществ дымовые газы очищаются в рукавном фильтре. Очищенные дымовые газы направляют дымососом в трубу.

Промышленные испытания данной технологии проводились во время режимно-наладочных работ и в последующем во время эксплуатации МСЗ № 2.

В результате установлено, что КПД котельного агрегата соответствует современным мировым показателям для таких установок и составляет 73÷75 % [5]. Анализ результатов газовых измерений показал, что выбранные в процессе наладочных испытаний режимы термической переработки ТБО позволяют обеспечить после дополнительной газоочистки экологически приемлемые выбросы вредных веществ в атмосферу [6]. Содержание остаточных горючих веществ, по которым, как правило, оценивают качество процесса сжигания, соответствует нормативным требованиям.

В процессе испытаний были измерены концентрации некоторых компонентов в неочищенном газе (после котла), образующиеся при сжигании ТБО, которые затем сравнивались с величинами, полученными на аналогичных установках [6]. В результате испытаний выяснено, что высокая температура и избыток окислителя в котле дают достаточно полное преобразование утилизируемых ТБО в устойчивые продукты окисления, концентрация регламентируемых вредных веществ в неочищенных газах на уровне зарубежных аналогов, а по HCl, HF и SO₂ несколько ниже (табл. 2). Полученные данные использовались в дальнейшем при проектировании системы газоочистки для отечественной ТЭС на ТБО.

Таблица 2

Концентрация некоторых компонентов в неочищенных газообразных продуктах сгорания ТБО, мг/м³ (при нормальных условиях)

Вещество	Нормативные концентрации	МСЗ № 2
Пыль	1000...5000	1200
HCl	50...1000	120
HF	10...50	7
SO ₂	50...400	120
NO	50...400	210
CO	<10...30	30

На основании результатов испытаний и эксплуатации мусоросжигательного завода № 2, оборудованного колосниковыми решетками обратного проталкивающего типа, сделаны следующие выводы.

На решетке обратного проталкивающего типа происходят такие процессы, как: сушка, выход летучих газов, зажигание и горение твердых бытовых отходов, догорание в шлаке несгоревшего коксового остатка.

Прогрев и сушка твердых бытовых отходов на колосниковых решетках протекает под воздействием тепла, подводимого подогретым воздухом. После сушки происходит процесс выделения и воспламенения летучих веществ, которые сгорают. Далее идет процесс воспламенения и горения в твердом слое на решетке обратного проталкивающего типа и в самом объеме пространства топки. В момент сгорания ТБО происходит выделение тепла, за счет которого продолжают выделяться и сгорать летучие вещества. Заключительной стадией является стадия дожигания, в которой происходит выгорание коксового остатка. На рисунке 2 показано распределение температуры в слое отходов и динамика изменения относительного содержания связанного углерода по длине колосниковой решетки [7].

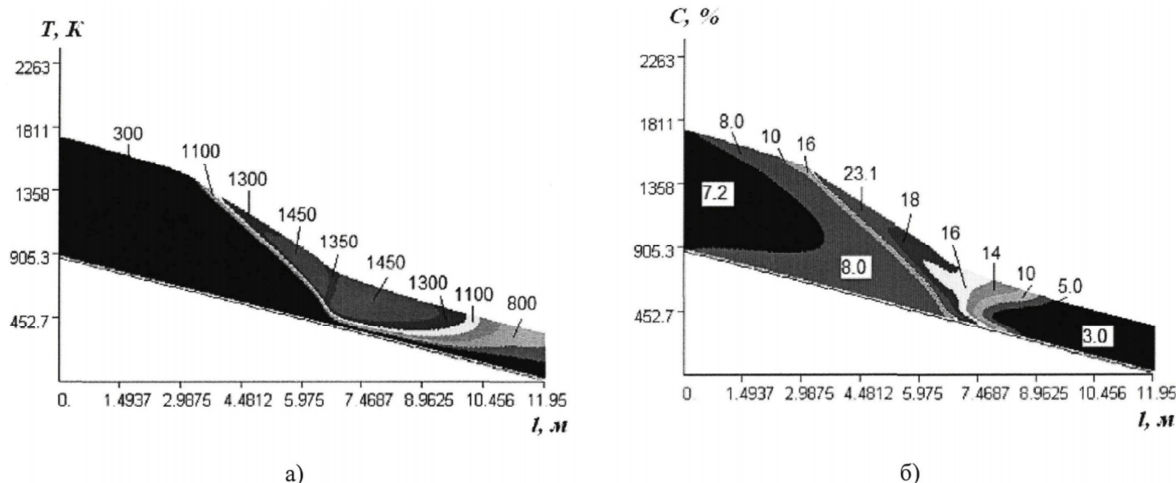


Рис. 2. Распределение температуры в слое отходов (а) и динамика изменения относительного содержания связанного углерода (б) по длине переталкивающей колосниковой решетки производительностью 23,5 т/ч при сжигании ТБО (ширина решетки – 6,25 м)

Как правило, колосниковую решетку разделяют на зоны, для создания оптимальных условий для протекания разных процессов. Это достигается путем регулирования подаваемого воздуха в каждой зоне, температурой воздуха, расположением газогорючих устройств, скоростью перемещения колосников. Так, в зоне дожига, для протекания процесса, необходимо сравнительно небольшое количество воздуха, а время и температура – достаточные для сгорания коксового остатка и охлаждения образующегося шлака.

В момент сжигания твердых бытовых отходов высота слоя уменьшается, в особенности в зоне дожига, и возможно увеличение температуры на самой решетке от излучения из топки при их оголении. В связи с этим, чтобы увеличить долговечность решетки обратно проталкивающего типа, в зоне дожига уменьшаются скорость работы подвижных колосников. Благодаря этому шлак накапливается и температура самого оборудования уменьшается.

Время прогрева и сушки, воспламенения, горения и дожига отходов на колосниковой решетке напрямую зависят от свойств отходов и производительности установки. Эти стадии, происходящие на решетке, определяют удельную нагрузку зеркала горения колосниковой решетки q_F^B , которую с достаточной степенью точности можно определить

$$q_F^B = K_L \cdot \log 5, \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}), \quad (1)$$

где B – количество сжигаемых отходов, кг/ч;

K_L – коэффициент пропорциональности, определяемый свойствами отходов, в первую очередь, их теплотой сгорания Q_i^r (табл. 3).

Таблица 3

Коэффициент пропорциональности удельной нагрузки зеркала горения колосниковой решетки, определяемый свойствами отходов

Теплота сгорания, Q_i^r кДж/кг	K_L
3350÷4190	69÷79
4190÷5030	79÷85
5030÷5870	85÷95
5870÷8380	95
8380÷9220	93÷95
9220÷10900	84÷93
10900÷12570	68÷84
12570÷14250	52÷68

Максимальное значение коэффициента пропорциональности достигается при теплоте сгорания в 5800÷8500 кДж/кг. Наибольшее количество легко разлагаемых летучих продуктов и составляющих с высоким содержанием кислорода находится в отходах с таким значением теплоты сгорания. При сжигании отходов, у которых теплота сгорания превышает 8500 кДж/кг, увеличивается содержание углеводородов, которые требуют больше энергии для разрушения межмолекулярных связей, следовательно, необходимо больше времени. При сжигании отходов, когда теплота сгорания становится ниже 5800 кДж/кг, процесс замедляется из-за большого содержания влаги, испарение которой приводит к дополнительным тратам энергии и времени.

Расчеты по геометрии решетки, эксплуатационные параметры, рациональная высота слоя сжигаемых отходов определяются на основании расчета топочных процессов.

Важным аспектом сжигания твердых бытовых отходов на колосниковой решетке является выгорание коксового остатка: этот процесс приходится на середину решетки, но допускается смещение этой зоны влево или вправо, при условии подогрева воздуха до нужной температуры или увеличении времени для сжигания влажных отходов. Процесс выгорания коксового остатка должен завершаться при $l / l_p = 0,8 \div 0,85$, где l_p – общая длина решетки.

Расположение зон в зависимости от длины выглядит следующим образом:

- сушка – $0,2 \div 0,25 l_p$;
- выход и горение основной доли летучих газов – $0,25 \div 0,3 l_p$;
- сгорание коксового остатка – $0,5 \div 0,6 l_p$.

В момент интенсивного горения коксового остатка после выхода летучих газов температура в топке котла достигает 1227 °С, что вполне достаточно для соблюдения установленных требований.

При увеличении производительности установки и уменьшении площади колосниковой решетки теплонапряжение q_v топочной камеры возрастает. Согласно [8], q_v значение должно находиться в пределах 290÷470 кВт/м³.

Испытания технологии сжигания ТБО в вихревом кипящем слое проводили на Московском мусоросжигательном заводе № 4 производительностью 250 тыс. тонн ТБО в год. Структура завода состоит из трех энерготехнологических установок, с топкой для сжигания отходов в вихревом кипящем слое, котлоутилизатором и современным газоочистным оборудованием. Производительность каждой из трех установок – 13,5 т/ч при теплоте сгорания рабочей массы 6500 кДж/кг. Генерируемый в КУ пар проходит в котлотурбинный цех, где кроме двух турбин малой мощности типа П-6-1,6/05 и вспомогательного оборудования к ним установлены два энергетических котла ДЕ-25-15-185ГМ, которые используются запуске завода из «холодного» состояния, а также для покрытия дефицита пара. Электроэнергии выработанной турбиной хватает покрыть собственные нужды завода, а ее избыток идет во внешние сети.

Также в состав каждой энерготехнологической установки входят расположенные за ним последовательно по ходу газов котел-утилизатор, циклон, распылительный абсорбер, узел подачи реагентов для улавливания диоксинов, ртути и фуранов, рукавный фильтр и дымосос. Благодаря автоматическому газоанализатору, расположенному на входе в дымовой трубе, регистрируется концентрация основных загрязнителей HCL и SO₂ в дымовых газах. На основании измерений регулируется подача известкового молока в абсорбер.

На рисунке 3 представлена схема энергетической утилизации твердых бытовых отходов на мусоросжигательном заводе МСЗ № 4.

Для процесса горения при помощи вентиляторов подается воздух, который берется из бункера для хранения отходов. После вентилятора первичного воздуха расположен паровой воздухоподогреватель, при помощи которого можно подогреть подаваемый воздух, в случае если отходы имеют низкую плотность. В над слоевое пространство подается вторичный воздух также при помощи вентилятора, после которого также стоит паровой воздухоподогреватель.

При помощи контура внешней циркуляции производится удаление шлака, состоящего из водоохлаждаемых шнеков выгрузки, вибросита, из которого шлак отводится из установки, а мелка зола удаляется при помощи горизонтального шнека и элеватора в перепускной бункер.

Во время пуска котла с помощью газовых горелок температура песка в слое достигает 650 °С, а температура в свободном пространстве – более 850 °С. Охлаждение топки котла не предусмотрено.

Способ сжигания твердых бытовых отходов вихревым кипящим слоем является новой технологией для Российской Федерации. Любые нарушения при сжигании отходов в вихревом кипящем слое могут вызвать шлакование, что приведет к остановке работы котельной установки. К таким нарушениям относятся:

- накопление крупных фракций в слое;
- расход и распределение первичного воздуха;
- выход температуры за пределы расчетного значения;

нарушения в работе контура внешней циркуляции материала слоя.

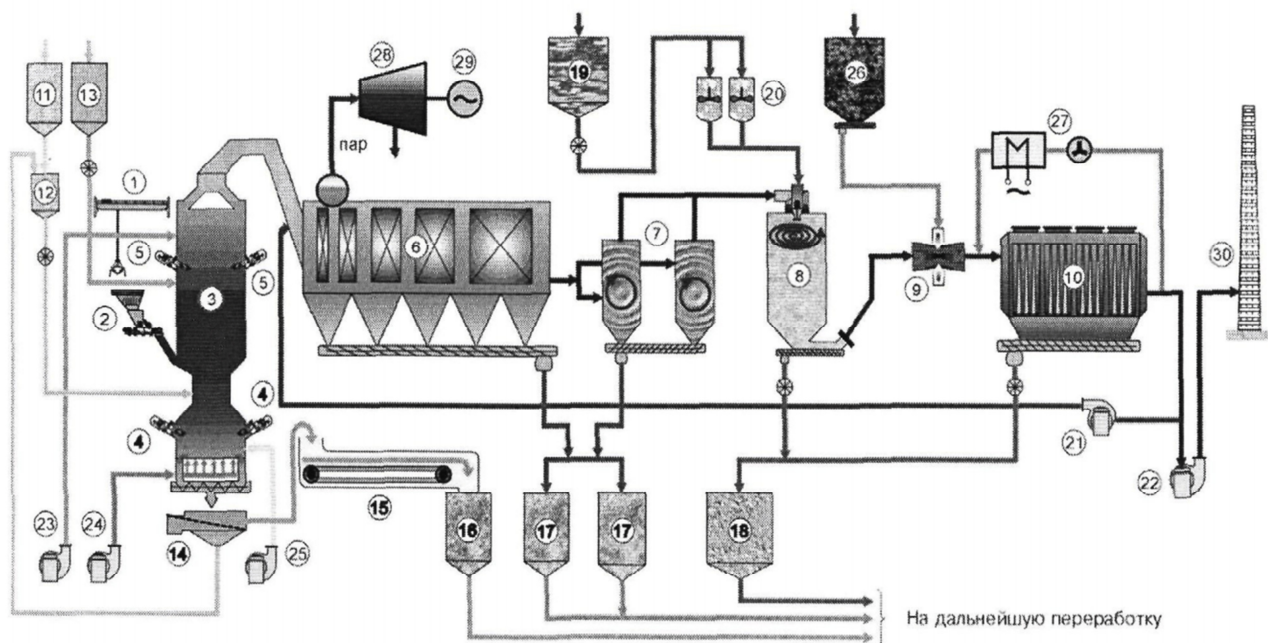


Рис. 3. Схема процесса термической утилизации ТБО на МСЗ № 4:

1 – мостовой грейферный кран; 2 – загрузочная воронка с питателем; 3 – топка с кипящим слоем; 4, 5 – газовые горелки; 6 – котел-утилизатор; 7 – циклон; 8 – распылительный абсорбер; 9 – узел подачи реагентов; 10 – рукавный фильтр; 11 – бункер песка; 12 – перепускной бункер; 13 – бункер известняка; 14 – вибросито; 15 – шлаковый транспортер; 16 – бункер шлака; 17 – бункер золы уноса; 18 – бункер продуктов газоочистки; 19 – бункер гидрата кальция; 20 – резервуар для приготовления известкового молока; 21 – дымосос рециркуляции дымовых газов; 22 – дымосос; 23 – вентилятор для удаления золы; 24 – вентилятор подачи первичного воздуха; 25 – вентилятор для удаления золы; 26 – бункер смеси активированного угля и извести; 27 – система подогрева рукавного фильтра; 28 – паровая турбина; 29 – генератор; 30 – дымовая труба

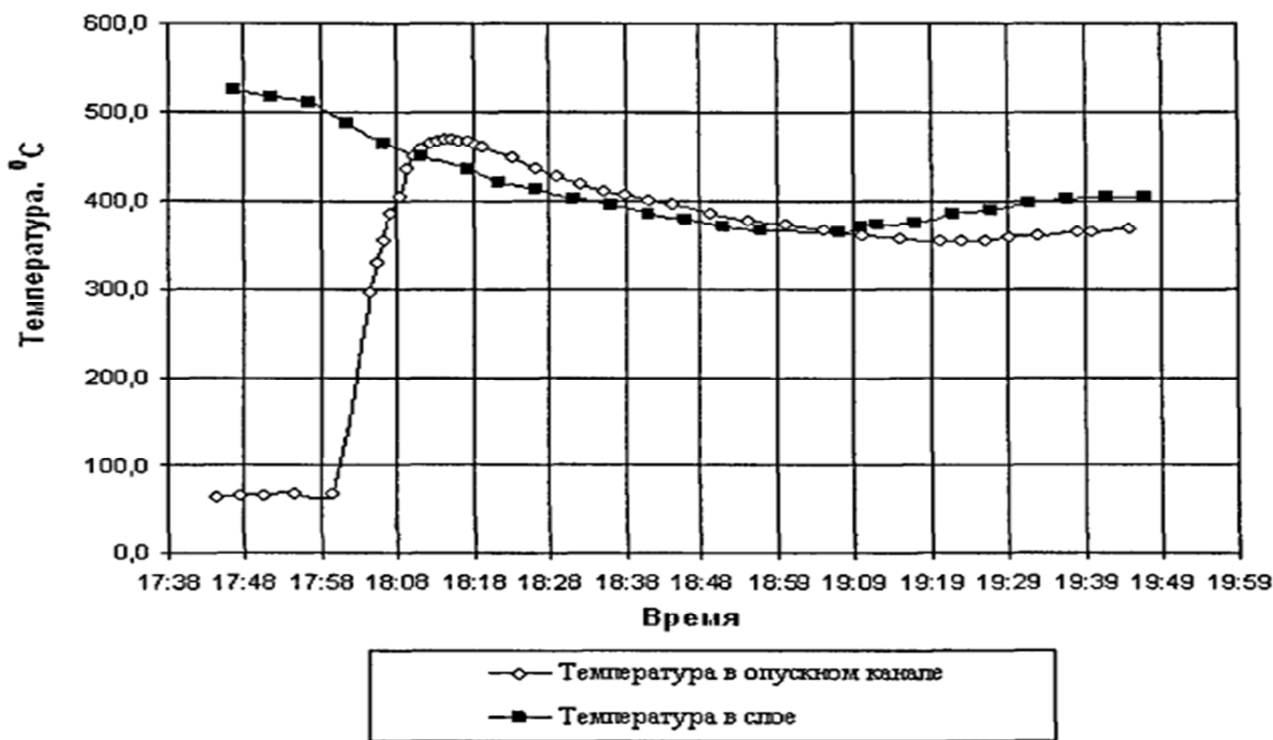


Рис. 4. Измерение температуры в слое и опускном канале топки с ВКС МСЗ № 4

Большое количество испытаний было проведено по обеспечению требуемого температурного режима в зоне кипящего слоя. Они показали, что при температуре 550 °С не происходит полного сжигания отходов и из-за этого может образоваться завал печи. При температуре свыше 700 °С происходит образование отложений на стенках топки котла, что приводит к остановке его работы.

Большую роль в сжигании отходов играет исследование температурного режима. Как правило, из-за большого шлакового остатка от сгорания отходов термопары, расположенные в самой топке, засыпает, что уже через сутки приводит к не корректным значениям. Из-за этого приходится располагать дополнительные термопары в опускном канале. Экспериментально доказано, что температура в опускном канале немного ниже температуры слоя и соответствует ей с задержкой 15÷20 минут (рис. 4).

Также опытным путем установлено, что снижение температуры возможно достичь за счет уменьшения коэффициента избытка воздуха менее единицы. Однако значение расхода воздуха нельзя уменьшать ниже парового значения, которое обеспечивает вихревой процесс. Для дальнейшего снижения температуры в слое следует использовать впрыск воды.

Повышение температуры происходит за счет двух газогорелочных устройств при сжигании дополнительного топлива.

Большое внимание уделяется изучению влияния работоспособности топки на процессы удаления из нее инертного материала слоя. При помощи работы вибратора происходит отделение крупных частиц шлака и возврата мелких частиц материала обратно в

печь. Регулирование частоты вращения шнеков позволяет управлять объемом отводимого из топки материала слоя. Если работа печи будет происходить на пониженной частоте, то это приводит к накоплению шлака и аварийной остановке всей установки в целом. При высокой частоте работы шнеков происходит увеличение тепловых потерь, уменьшение температуры слоя и резкое увеличение потерь песка по причине перегрузки вибратора материалом слоя. Экспериментально установлено соотношение между производительностью установки, частотой работы шнеков выгрузки и зольностью отходов. Так, при частоте работы шнеков в 13÷14 об/мин оптимальный объем сжигаемого мусора составляет 16 т/ч с зольностью около 30 %. При данных значениях из топки выгружается около 20 т/ч материала: примерно 3÷4 т/ч в виде шлака выводятся наружу, а остальной материал возвращается обратно в слой.

Тепловые потери в контуре внешней циркуляции материала слоя имеют большое значение при определении тепловой эффективности энерготехнологической установки с технологией сжигания ТБО в топке котла с вихревым кипящим слоем. Тепловые потери приведены в таблице 4.

На основании таблицы 4 можно сделать вывод, что наибольшие тепловые потери приходятся на элеватор и составляют около 40 % (0,13 ÷ 0,26 МВт), горизонтальный шнек – 30 % (0,1 ÷ 0,14 МВт) и вибратор – 25 % (0,08 ÷ 0,1 МВт). Суммарно тепловые потери составляют приблизительно 0,44 МВт, тепловая эффективность снижается приблизительно на 2 %, и снижают температуру материала в топке котла примерно на 150 °С.

Определение тепловых потерь в контуре внешней циркуляции материала слоя

№ замера	Тепловые потери Q_s , МВт					
	Вибросито	Горизонтальный шнек	Элеватор	Течка от вибросита к перепускному бункеру	Перепускной бункер	Общие
1	0,08	0,12	0,12	0,02	0,03	0,37
2	0,08	0,13	0,16	0,02	0,03	0,43
3	0,11	0,14	0,18	0,03	0,03	0,49
4	0,09	0,14	0,26	0,02	0,03	0,56
5	0,09	0,14	0,13	0,02	0,03	0,42
6	0,09	0,11	0,15	0,02	0,02	0,39

В процессе испытаний было показано, что все три котельные установки на мусоросжигательном заводе № 4 обеспечивают требуемые параметры пара. Значение КПД находится в пределах значений 75÷78 %. Снижение КПД происходит при увеличении температуры уходящих газов с 185 до 200 °С.

В результате исследований и наладочных работ были проведены мероприятия по улучшению режима работы трех энергетических установок МСЗ № 4, которые в дальнейшем обеспечили надежность эксплуатации и необходимую паропроизводительность.

Актуальность использования этого метода обуславливается тем, что опыт зарубежных заводов, работающих по принципу вихревого кипящего слоя, показал, что в этих котлах можно успешно сжигать не только твердые бытовые отходы, но и другие городские отходы, осадок сточных вод, с большим показателем содержания воды (до 80 %) и низкой теплотой сгорания (до 1380 кДж/кг), автомобильные шины, отработанное масло и так далее.

По результатам выполненных испытаний был разработан ряд мероприятий, направленных на увеличение диапазона разновидности сжигаемых твердых бытовых отходов. Увеличением паропроизводительности до 33 т/ч и снижением температуры дымовых газов перед пароперегревателем на 12÷14 °С котельной установки при помощи технологических изменений оборудования можно добиться увеличения надежности установки и уменьшения шлакования поверхностей нагрева.

Таким образом, в ходе испытаний на мусоросжигательных заводах № 2 и № 4 можно сделать вывод, что оба способа сжигания отходов достаточно эффективны и обеспечивают все современные требования и нормативы. Остаточные горючие вещества, выделяемые при сжигании, соответствуют экологическим нормативам.

Основным различием является то, что для несортированного мусора больше подходит способ сжигания в вихревом кипящем слое, а для сортированного – на колосниковой решетке.

Литература

1. Утилизация твердых отходов / Под ред. Д. Вилсона. – Москва : Стройиздат, 1985. – Т. 1. – 336 с.
2. Систер, В. Г. Современные технологии обезвреживания и утилизации твердых бытовых отходов / В. Г. Систер, А. Н. Мирный. – Москва : Акад. коммунального хозяйства им. К.Д. Памфилова, 2003. – 304 с.
3. Медведев, В. Т. Инженерная экология : учебник / В. Т. Медведев, В. В. Скибенко, А. К. Макаров и др., под ред. В. Т. Медведева. – Москва : Гардарики, 2002.
4. Справочник. Санитарная очистка и уборка населенных мест / Под редакцией А. Н. Мирного. – Москва : Академия коммунального хозяйства имени К.Д. Памфилова, 1997.
5. Тугов, А. Н. Опыт освоения сжигания твердых бытовых отходов на отечественных ТЭС / А. Н. Тугов, В. Ф. Москвичев, А. Н. Рябов и др. // Теплоэнергетика. – 2006. – № 7. – С. 55–60.
6. Угначев, В. И. Контроль работы газоочистного оборудования на установках для сжигания твердых бытовых отходов / В. И. Угначев, А. Н. Епихин, А. Н. Тугов, // ЛГТеплоэнергетика. – 2001. – № 12. – С. 52–56.
7. Тугов, А. Н. Отечественные ТЭС на ТБО. Опыт освоения и пути развития / А. Н. Тугов, В. Ф. Москвичев, А. Н. Смирнов // Экология и промышленность России. – 2009. – № 3. – С. 4–7.
8. Сигал, И. Я., Расчет топочных процессов при сжигании твердых бытовых отходов / И. Я. Сигал, В. Б. Жуховицкий, В. Я. Меллер и др. // Экотехнология и ресурсосбережение. – 1997. – № 6. – С. 40–47.

N.A. Bormosov, M.M. Lukinov, A.V. Sokolov
Vologda State University

INDUSTRIAL TESTS OF THERMAL WASTE PROCESSING ON OPERATING TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

This article presents the results of testing of two methods of thermal processing of waste at incineration plants. A comparative assessment of the use of various technologies for the processing of municipal solid waste (MSW), their features and disadvantages is given. The schemes of MSW combustion processes on grates and in a vortex fluidized bed are presented. Proposals for optimizing the technological process of thermal waste processing are presented.

Municipal solid waste (MSW), waste incineration plant (MSW), boiler plant, steam power unit, MSW combustion technology on grates, MSW combustion technologies in a vortex fluidized bed heat losses, external circulation, steam capacity, warm-up and drying time, ignition, combustion and afterburning of waste.



В.Е. Никифоров^{1,2}, Л.А. Никитин²
¹Вологодский государственный университет,
²Вологодский научный центр Российской академии наук

АНАЛИЗ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ И РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ ВАКУУМНО-ИМПУЛЬСНОЙ СУШКИ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В статье представлены результаты экспериментальных исследований по технологии сушки прессованных растительных материалов с использованием вакуума. Растительные материалы имеют низкую теплопроводность, поэтому процесс удаления влаги требует значительных затрат энергии. Температура теплоносителя и нагрев материала определяет скорость и продолжительность процесса сушки. В материалах статьи приводятся характеристика основного технологического оборудования экспериментальной установки в реализации способа вакуумно-импульсного удаления влаги. Проведен сравнительный анализ общих затрат энергии по времени работы электрооборудования на экспериментальной установке для конвективного и вакуумно-импульсного способа удаления влаги в процессе сушки прессованного сена. Интенсивность сушки растительного материала при вакуумном воздействии в 1,5 раза выше, чем конвективной.

Сушка, теплоноситель, вакуум, растительный материал, электрооборудование, затраты энергии.

Исследования по совершенствованию технологий сушки имеют большое практическое значение для интенсификации теплоэнергетических, энерготехнологических и химико-технологических процессов в разных отраслях промышленности и сельского хозяйства. Эта работа приобретает особый смысл для разработки новой техники и направлена на получение качественных материалов, когда процесс сушки должен осуществляться оптимально при минимальных затратах тепла с получением требуемых показателей продукта от исходного сырья.

Сушка – это довольно сложный технологический процесс, основным элементом которого является влияние интенсивного теплообмена. При разработке оборудования в технологии сушки различных материалов предусматривается выбор определенных факторов:

- способ воздействия сушильного агента (естественная и искусственная сушка);
- давление воздуха в сушильной камере (атмосферная, вакуумная);
- способ подвода тепла к материалу (конвективная, кондуктивная, инфракрасная, высокочастотная и т.п.);
- вид сушильного агента (нагретый воздух, топочные газы и т.п.);
- вид циркуляции агента сушки (естественная и принудительная);
- режим работы (периодического или непрерывного действия);
- объект сушки, свойства (состояние) материала.

Обработка различных материалов сушкой используется практически во всех отраслях производства и имеет высокие затраты энергии. Существующий традиционный конвективный способ сушки отличается простой системой подачи тепла и регулировки температуры для нагрева материала, где в качестве теплоносителя используется горячий воздух. Сушка

сопровождается большими потерями тепловой энергии, при этом снижается качество конечного продукта.

В сельскохозяйственном производстве при заготовке на корм прессованного сена с повышенной влажностью его необходимо досушить до 17 %, чтобы исключить потери при хранении. Используемые для этого тепловентиляционные установки имеют высокие удельные затраты энергии на удаление влаги (от 1,6 до 3,32 кВт ч/кг) [1].

При конвективной сушке наиболее важными параметрами являются: температура агента сушки, толщина слоя и плотность материала. Существенным недостатком конвективного способа сушки считается относительно небольшая величина коэффициента теплоотдачи сушильного агента к поверхности материала. В капиллярно-пористых телах в процессе сушки конвективная составляющая переноса теплоты для теплопереноса мала по сравнению с кондуктивной составляющей [2]. Кроме того, волокнистые материалы растительного происхождения имеют низкую теплопроводность и относятся к хорошим теплоизоляционным материалам $\lambda=0,053\div 0,11$ Вт/(м·°С) [5].

Ускорение технологии сушки обычно обеспечивается снижением относительной влажности или повышением температуры, скорости агента сушки, увеличением поверхности материала, комбинированным подводом тепла, вакуумированием и т.п. [3]. Поэтому в процессе теплообмена имеет место сочетание различных механизмов нагрева при воздействии на материал.

Практические данные и тенденция развития техники в использовании вакуума подтверждают, что существует достаточно широкая возможность применения сушки растительного материала в технологии заготовки объемистого корма из прессованного сена.

Вакуумная сушка – это особый технологический процесс, представляющий собой удаление влаги из ма-

териала под действием вакуума. Именно технологии сушки с применением вакуума считаются достаточно новыми и нашли приложение в промышленности, когда сокращается период теплового воздействия и улучшаются физические свойства материалов. Преимущество сушки в вакууме состоит в интенсивном удалении влаги при нагреве, что предотвращает нежелательное снижение качества материала (например, растрескивание пиломатериалов), а сам процесс сушки происходит при незначительных затратах энергии относительно удаления влаги (600 кВт на 1 тонну воды).

С целью повышения эффективности предложен способ досушки прессованного сена методом вакуумного воздействия с периодической принудительной вентиляцией в сушильной камере. Данный способ сушки волокнистых прессованных материалов определяет основную особенность технологии сушки сена в вакууме [4].

Разработано экспериментальное оборудование для осуществления данного технологического процесса сушки, работа которого обеспечивает заданный режим для вакуумно-импульсного способа удаления влаги [5, 6]. При работе производится предварительный нагрев материала в камере, затем включается вакуумный насос РВН-40/350. Контроль создаваемого вакуума осуществляется вакуумметром МПЗ-У1. Для подачи теплоносителя необходимо обеспечить подвод нагретого воздуха от нагревателя ЭКОЦ-10 в вакуумную камеру непосредственно к материалу. Интенсивное удаление влаги и эффективность поступления воздуха под давлением 1000 Па обеспечивается центробежным вентилятором ВЦ-14-4 производительностью от 1000–2000 м³/час.

В начальный период сушки удаляется поверхностная влага. При нагреве материала происходит незначительное увеличение скорости сушки. Чтобы процесс удаления внутренней влаги был эффективным, необходимо затратить дополнительно тепловую энергию или создать пониженное давление.

Также для повышения скорости сушки произво-

дится воздействие в виде формирования вакуумных импульсов, что позволяет ускорить удаление влаги из материала при меньших затратах энергии. Для дальнейшего снижения влажности материала необходимо последовательно повторить действия вакуума с процессом удаления влаги и подачи теплоносителя.

На экспериментальной вакуумной сушильной установке производилась сушка образцов прессованного сена с начальной влажностью до 30 % и полученные экспериментальные данные.

В качестве сравнения использовался широко применяемый в настоящее время конвективный способ досушивания сена. В результате проверки вариантов определено время работы оборудования в различных режимах вакуумно-импульсного и конвективного способа сушки.

Таблица

Параметры процесса сушки

Способ сушки, характеристика материала	Влажность конечная, %	Температура, °С	Вакуум, кПа	Время сушки, ч
Вакуумный, прессованное сено, 110 кг/м ³	7,4	70	30	11
Вакуумный, прессованное сено, 110 кг/м ³	8,9	60	20	12
Конвективный, прессованное сено, 110 кг/м ³	7,8	50	-	18

Основными потребителями электроэнергии на экспериментальной установке являются электрооборудование нагрева теплоносителя 6 кВт, вентилятор 1,5 кВт и вакуумный насос 3 кВт соответственно.

На графике (рис. 1) приведены расчетные значения общих затрат электроэнергии на сушку прессованного сена для заданных режимов работы технологического оборудования.

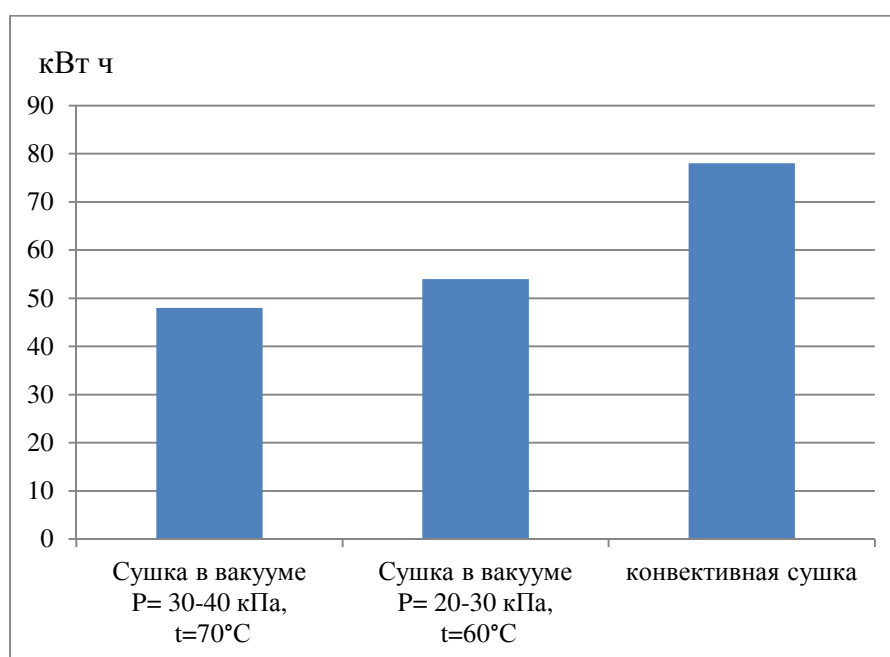


Рис. 1. Затраты электрической энергии

Оценка затрат энергии по времени работы экспериментальной установки определена с учетом установленной мощности оборудования и коэффициента ($K=0,5$) периодичности включения в работу нагревателя ТЭН от регулятора температуры нагрева. Общее потребление электроэнергии полного производственного цикла для технологии вакуумно-импульсного способа сушки в разных режимах составила 46,5 и 54 кВт ч. При конвективном способе сушки затрачено 78 кВт ч.

Для повышения интенсивности досушки прессованного сена в рулонах и крупногабаритных кипах в производстве эффективно могут быть использованы вакуумные сушильные камеры, предназначенные для сушки пиломатериалов. Вакуумно-импульсные сушильные камеры разрабатывались для качественной сушки древесины с высокой эффективностью [7, 8]. Они относятся к камерам периодического действия, где заложен принцип конвективной сушки за счет нагрева и воздушного теплообмена, при существенных отличиях от классической вакуумной технологии. Главной задачей в осуществлении вакуумно-импульсного способа является экономия электрической энергии и повышение эффективности работы оборудования.

При внедрении в производство реализацию предложенной технологии необходимо производить на промышленном оборудовании. На рисунке 2 представлено промышленное оборудование для технологии сушки вакуумно-импульсным способом удаления влаги.

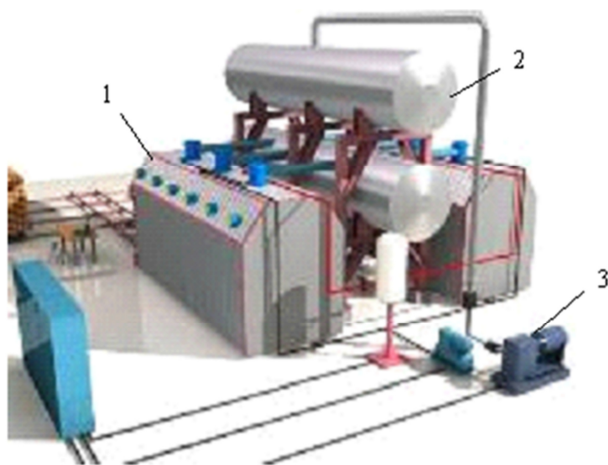


Рис. 2. Оборудование вакуумно-импульсной сушильной установки

В состав донного оборудования входят: сушильная камера 1, ресивер 2, вакуумный насос 3, а также калориферная установка, осуществляющая нагрев теплоносителя.

Нагрев прессованного материала, находящегося в вакуумной камере 1, осуществляется за счет конвекции теплоносителя от внешнего нагревателя через входной вентиляционный клапан. Выход отработанного теплоносителя из камеры производится при открытом выпускном клапане. Материал прогревается принудительно от циркуляции теплоносителя, после чего при необходимой температуре происходит процесс вакуумирования. Именно этим обеспечивается высокая

скорость и интенсивность качественной сушки различных материалов.

Подобные камеры полностью питаются от электрической сети и потребляют от 38 до 152 кВт электрической мощности, общее энергопотребление которых при эксплуатации составляет от 15 кВт/час.

Особенностью управления процессом вакуумно-импульсной сушки в камере является периодически создаваемый вакуум через вентиляционные устройства, встроенные специальную систему трубопроводов ресивера. Вначале происходит нагрев, затем вакуумирование, от чего влага в виде нагретого пара выделяется из материала. Чтобы активно удалять влагу, проводится нагрев материала в вакууме с последующей вентиляцией камеры. Данная последовательность периодических циклов включения вакуума в процессе сушки может повторяться.

Технологические характеристики и особенность работы вакуумно-импульсных камер определяет условия, где процесс тепловой обработки следует разделить на несколько этапов:

- нагрев, активное вентилирование, удаление свободной влаги 28–30 %;
- предварительная сушка до 22–24 % влажности;
- основная сушка, удаление связанной влаги до 17 %.

В технологии сушки значительная доля затрат электроэнергии приходится на работу основного оборудования для получения тепла.

Потребление электрической энергии вакуумно-импульсным способом для сушки материала повышенной влажности в 1,4–1,7 раза ниже, чем при обычной искусственной сушке.

Литература

1. Ахламов, Ю. Заготовка кормов в рулонах [Текст] / Ю. Ахламов // Животноводство России. – 2003. – № 6. – С. 40–41.
2. Лыков, А. В. Тепломассообмен: Справочник. 2-е изд. перераб. и доп. – Москва : Энергия, 1978. – 480 с.
3. Гареев, Ф. Х. Нетрадиционная сушка древесины: вакуумная и СВЧ [Электронный ресурс] / Ф. Х. Гареев // Лесная промышленность ЛПИ. – 2004. – № 5 (18) – С. 62–65.
4. Пат. 2476085 Российская Федерация. МПК А23К 3/02, А23В 7/00. Способ сушки волокнистых прессованных материалов. / Углин В. К., Никифоров В. Е. и др. – №2010154629/13; заявл. 30.12.2010; опубл. 27.02.2013, Бюл. № 6. – 3 с. : ил.
5. Никифоров, В. Е. Разработка экспериментальной установки вакуумной сушки прессованных растительных материалов. / В. Е. Никифоров, Л. А. Никитин. Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2020. – № 1 (7). – С. 23–26.
6. Никифоров, В. Е. Управление и режим вакуумно-импульсной сушки прессованных растительных материалов / Никифоров, В. Е., Никитин, Л. А. Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2021. – № 2 (12). – С. 19–22.

7. Сафин, Р. Р. Технологические режимы вакуумной сушки пиломатериалов при конвективных методах подвода тепла [Электронный ресурс] // Деревообрабатывающая промышленность. – 2016. – Режим доступа: http://dop1952.ru/statues-statue_id-3.html.

8. Технология вакуумной сушки: современное состояние и новые тенденции развития [Электронный ресурс] / Новости деревообработки. – Режим доступа: <http://wood.nestormedia.com/index.pl?act=PRODUCT&iid=1>.

V.E. Nikiforov^{1,2}, L.A. Nikitin²

¹Vologda State University,

²Vologda Scientific Center of the Russian Academy of Sciences

ANALYSIS OF ENERGY CONSUMPTION AND EQUIPMENT OPERATION OF VACUUM-PULSED PLANT MATERIALS DRYER

The article presents the results of experimental studies on the technology of drying pressed plant materials using vacuum. Plant materials have low thermal conductivity, so the process of removing moisture requires a significant amount of energy. The temperature of the heat carrier and the heating of the material determine the speed and duration of the drying process. In the materials of the article, the characteristics of the main technological equipment of the experimental setup in the implementation of the method of vacuum-pulse moisture removal are given. A comparative analysis of the total energy costs by the time of operation of electrical equipment at the experimental installation for the convective and vacuum-pulsed methods of removing moisture during the drying of pressed hay has been carried out. The intensity of drying of plant material under vacuum exposure is 1.5 times higher than that of convective.

Drying, heat carrier, vacuum, plant material, electrical equipment, energy costs.



СИНТЕЗ МЕХАНИЗМА С ФИКСИРОВАННОЙ ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ

В статье обоснована и определена схема механизма с фиксированной частотой вращения. Установлено, что неизменность частоты циклотронного движения обусловлена равенством кинетической и потенциальной (в терминах «макромеханики») энергий электрона. Предложено указанное обстоятельство использовать для стабилизации частоты вращения механического устройства. Показано, что в состав такого механизма должен входить груз с возможностью запаса кинетической энергии и пружина для аккумуляции потенциальной энергии.

Ротатор, маятник, частота, стабилизация, выбег, энергия, момент импульса, циклотронное движение.

Для нормальной работы многих технических систем требуется стабилизированная частота вращения. К таким системам относятся генераторные установки переменного тока, насосные станции, конвейерные линии, обрабатывающие станки, ветрогенераторы и многие другие.

Существующие ротаторы могут свободно вращаться с любой скоростью, поэтому для их стабилизации используют специальные устройства, как правило, следящего типа, что приводит к усложнению и удорожанию конструкций.

В этой связи представляет интерес возможность создания ротатора с фиксированной частотой свободного вращения подобно вращению электрона при циклотронном движении.

Из ключевого обстоятельства, определяющего возможность обобщения циклотронного движения на механику, заключающегося в том, что лагранжиан электрона вдвое больше его кинетической энергии, что применительно к механическому устройству следует трактовать как равенство кинетической и потенциальной энергий, следует, что в состав механизма должны входить элементы, которые в состоянии запаса оба этих вида энергии, а именно груз и пружина. Собственная частота вращения механизма строго фиксирована и замечательным образом совпадает с собственной частотой колебаний маятника с идентичными параметрами.

Механические и электромагнитные явления и процессы во многих случаях математически изоморфны [1–5]. Это дает возможность обобщать достижения одной научной специальности на другую. В этом смысле представляет интерес циклотронное движение электрического заряда [6, 7], которое характеризуется *фиксированной частотой вращения*. Это следует из баланса сил

$$F = qvB = \frac{mv^2}{r} \Rightarrow$$

$$v = \frac{qB}{m} r = \omega r \Rightarrow \omega = \frac{qB}{m}.$$

Здесь q – величина электрического заряда, v – тангенциальная скорость заряда, B – магнитная индукция, m – масса заряженной частицы, r – радиус циклотронного движения, ω – частота вращения.

Частота действительно не зависит ни от скорости, ни от радиуса.

Ключевым обстоятельством для возможности обобщения циклотронного движения на механику является то, что лагранжиан электрона, движущегося поперек постоянного магнитного поля, вдвое больше его кинетической энергии

$$L = \frac{mv^2}{2} + e(\mathbf{v}, \mathbf{A}).$$

Векторный потенциал магнитного поля равен

$$\mathbf{A} = \frac{1}{2}[\mathbf{B}, \mathbf{r}].$$

При этом $\mathbf{v} = [\boldsymbol{\omega}, \mathbf{r}]$. Таким образом,

$$L = \frac{mv^2}{2} + \frac{q^2 B^2 r^2}{2m}.$$

Второе слагаемое равно

$$\frac{q^2 B^2 r^2}{2m} = \frac{q^2 B^2}{2m} \frac{m^2 v^2}{q^2 B^2} = \frac{mv^2}{2}.$$

$$L = 2 \frac{mv^2}{2}.$$

Целью работы является нахождение механического аналога циклотронного движения и определение схемы соответствующего устройства, которое уместно назвать стабилизированным ротатором.

Тема стабилизации вращений достаточно актуальна [8–10].

Синтез стабилизированного ротатора

Как отмечалось выше, из ключевого обстоятельства, определяющего возможность обобщения циклотронного движения на механику, заключающегося в том, что лагранжиан электрона вдвое больше его кинетической энергии, что применительно к стабилизи-

рованному ротору следует трактовать как равенство кинетической и потенциальной энергий, следует, что в состав стабилизированного ротора должны входить элементы, которые в состоянии запасать оба этих вида энергии, а именно груз (массой m) и пружина (с коэффициентом упругости k).

В соответствии с характером циклотронного движения и, соответственно, ротора имеет место радиус вращения (r) и циклическая частота (ω).

Из равенства энергий следует

$$\frac{k(\Delta x)^2}{2} = \frac{mv^2}{2} = \frac{mr^2\omega^2}{2} \Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{k}{m} \frac{\Delta x}{r}}.$$

Здесь Δx – величина абсолютной деформации пружины.

Неизменность циклической частоты обеспечивается очевидным ключевым условием

$$\Delta x = r.$$

Установленные необходимые обстоятельства определяют принципиальную схему стабилизированного ротора, которая представлена на рисунке.

Схема состоит из ротора, установленного на оси. В роторе с помощью упругих элементов, со смещением относительно оси вращения закреплен груз. При вращении ротора под действием центробежной силы груз перемещается от центра. Поэтому с увеличением момента импульса возрастает момент инерции механизма таким образом, что угловая скорость остается неизменной.

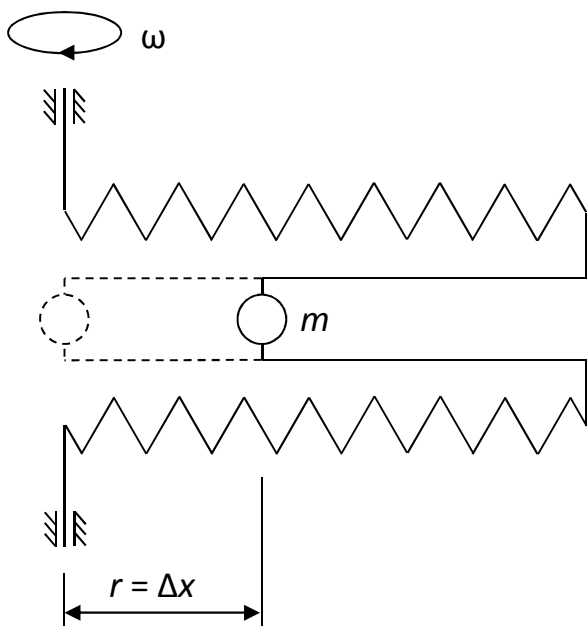


Рис. Стабилизированный ротор

Собственная частота вращения стабилизированного ротора

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

строго фиксирована (не зависит ни от момента инерции, ни от момента импульса) и замечательным образом совпадает с собственной частотой колебаний маятника с идентичными параметрами.

Таким образом, обеспечение равенства кинетической и потенциальной энергий приводит к тому, что частота свободного вращения механизма не может быть произвольной.

Достоинством предложенной схемы является ее простота. Недостатком – то, что при наличии вращающего момента угловая скорость может отличаться от собственной подобно тому, как частота вынужденных колебаний маятника может не совпадать с собственной частотой.

Стабилизированный ротор можно использовать везде, где требуется стабилизация частоты вращения.

Литература

1. Попов, И. П. Применение искусственной массы для балансировки механизмов / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2021. – № 1 (11). – С. 19–21.
2. Попов, И. П. Механические реактансы при гармонических колебаниях исполнительных органов машин и механизмов / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2021. – № 4 (14). – С. 65–67.
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. Использование реактивного момента электромагнитного маховика для изменения положения объектов в пространстве / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2019. – № 3 (5). – С. 75–77.
5. Попов, И. П. Механическая реактивная инерционная мощность в механических системах / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2021. – № 3 (13). – С. 63–65.
6. Павлов, В. Д. Теоремы об излучении заряда / В. Д. Павлов // Инженерная физика. – 2021. – № 6. – С. 37–40. DOI: 10.25791/infizik.6.2021.1213
7. Павлов, В. Д. Энергетика излучения электрического заряда и ее следствия / В. Д. Павлов // Известия Уфимского научного центра РАН. – 2021. – № 4. – С. 5–8. DOI: 10.31040/2222-8349-2021-0-4-5-8
8. Гречишников, В. А. Динамическая стабилизация вращения круга внутришлифовального станка / В. А. Гречишников, Е. С. Антипина, С. Н. Жилин, Г. В. Кукинова, В. Б. Романов // Вестник МГТУ «Станкин». – 2016. – № 2 (37). – С. 8–12.
9. Распопов, В. Я. Индикаторные гиросtabilизаторы / В. Я. Распопов // Справочник. Инженерный журнал. – 2016. – № 11. – С. 1–20. DOI: 10.14489/hb.suppl.2016.11.pp.001-020
10. Попов, И. П. Наложение вращений в механизмах / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2020. – № 4 (10). – С. 19–23.

I.P. Popov
Kurgan State University

SYNTHESIS OF MECHANISM WITH FIXED ROTATION SPEED

The article substantiates and defines the scheme of a mechanism with a fixed speed. It has been established that the invariance of the frequency of cyclotron motion is due to the equality of the kinetic and potential (in terms of "macro-mechanics") energies of the electron. It is proposed to use this circumstance to stabilize the rotational speed of a mechanical device. It is shown that such a mechanism should include a load with the possibility of storing kinetic energy and a spring for accumulating potential energy.

Rotator, pendulum, frequency, stabilization, run-out, energy, angular momentum, cyclotron motion.



ОСОБЕННОСТИ ТРАКТОВАНИЯ ПОНЯТИЙ РАСЧЕТНАЯ И АБСОЛЮТНАЯ НАГРУЗКА ДВИГАТЕЛЯ

В статье рассматриваются параметры *абсолютная нагрузка* и *расчетная нагрузка двигателя*. Приводятся пояснения в использовании этих понятий при диагностировании двигателя, а также порядок их вычисления. Приведены экспериментальные зависимости изменения нагрузки двигателя в разных режимах работы.

Эксплуатация автомобилей, диагностирование, расчетная нагрузка, абсолютная нагрузка, оценка технического состояния.

При оценке технического состояния двигателя автомобиля приходится сталкиваться с анализом параметров диагностирования, которые могут быть рабочими и сопутствующими. Рабочие параметры характеризуют эксплуатационные свойства двигателя, а сопутствующие показывают свойства процессов, происходящих в двигателе. К сопутствующим параметрам относятся входные параметров, например: температура охлаждающей жидкости двигателя, расход воздуха, угол открытия дроссельные заслонки. Эти параметры используются программой, заложенной в ЭБУ двигателя, для расчета времени впрыска топлива и угла опережения зажигания [1].

Помимо абсолютных параметров сопутствующих процессов ДВС существуют также и относительные, наиболее интересным из которых является нагрузка двигателя (Engine Load), которая подразделяется на 2 понятия: расчетная нагрузка (Calculated Load Value) и абсолютная нагрузка (Absolute Load Value). Известно, что эти понятия появились среди параметров ЭБУ еще в конце 90-х – начале 2000-х годов в бензиновых и дизельных двигателях и всегда отображаются в процентах [2].

Многие специалисты знают, как меняются эти параметры при разных режимах работы, знают их примерные эталонные значения. Производители автомобилей также иногда указывают эталонные значения параметров Engine Load для облегчения поиска неисправностей в технической документации по ремонту автомобилей. Однако мало кто знает подробности об этих параметрах. Как они рассчитываются, чем отличаются, от чего зависят и т.д.?

Рассмотрим порядок вычисления этих параметров. Начнем с *расчетной нагрузки двигателя*. Диапазон принимаемых значений этого параметра 0–100 %. Формулируется расчетная нагрузка как фактическая величина крутящего момента, развиваемого двигателем, выраженная в процентах.

В технической документации компаний европейских автопроизводителей эта величина рассчитывается следующим образом:

$$LOAD\ CALC = \frac{M_i}{M_{MAXi}} \sqrt{298/(T + 273)},$$

где M_i и M_{MAXi} – фактический индикаторный крутящий момент двигателя и максимальный индикаторный крутящий момент двигателя при данной скорости вращения коленчатого вала и стандартной температуре 25°C и атмосферном давлении 760 мм.рт.ст., T – фактическая температура окружающего воздуха.

Как известно, крутящий момент двигателя зависит от степени наполнения цилиндров рабочей смесью, что регулируется дроссельной заслонкой. Т.е. при полностью открытой дроссельной заслонке расчетный крутящий момент должен быть равен 100 %. Возникает вопрос: как программа ЭБУ двигателя узнает значения максимального и фактического крутящих моментов? Нет никаких датчиков, характеризующих эти значения. Таким образом, можно предполагать, что эти значения уже заданы в программе, например по углу положения дроссельной заслонки. В двигателях с воспламенением от сжатия дроссельная заслонка не участвует в регулировке крутящего момента. Крутящий момент в таких случаях может быть привязан к цикловой подаче топлива или углу педали акселератора. Для гибридных автомобилей расчетная нагрузка отражает крутящий момент, создаваемый только двигателем внутреннего сгорания, а не всей энергоустановкой [3, 4].

При работе двигателя на холостом ходу он не нагружен силами сопротивления движения, однако расчетная нагрузка не будет равна 0. При работе на холостом ходу создаваемый крутящий момент расходуется на преодоление внутренних механических потерь и на привод вспомогательных механизмов.

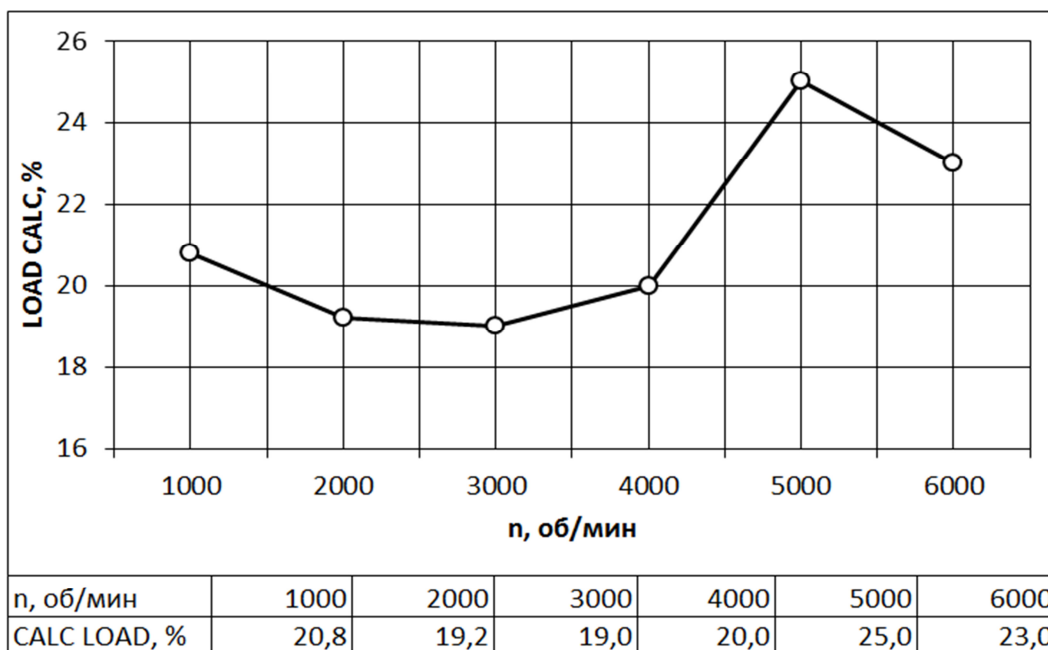


Рис. 1. График изменения расчетной нагрузки от оборотов коленчатого вала на неподвижном автомобиле

На рисунке 1 показан график изменения расчетной нагрузки двигателя ВАЗ-21129 при неподвижном автомобиле на нейтральной передаче с выключенным кондиционером. Как следует из диаграммы, крутящий момент на минимальных оборотах коленчатого вала составляет около 21 %, а затем по мере увеличения оборотов постепенно снижается и снова растет по мере приближения оборотов коленчатого вала к максимальным значениям. Диаграмма показывает, что доля внутренних потерь в двигателе минимальная при средних оборотах коленчатого вала, что совершенно логично подтверждает и внешняя скоростная характеристика двигателя. Данная закономерность характерна для всех двигателей внутреннего сгорания.

В легковых автомобилях с управлением крутящим моментом с помощью дроссельной заслонки значение расчетной нагрузки составляет примерно 20–30 %. При увеличении нагрузки на генератор и кондиционер расчетная нагрузка вырастет до 30–40 %. Но в двигателях с системой регулировки фаз газораспределения или высоты подъема клапана расчетная нагрузка при работе на холостом ходу может быть 70–90 %. В гибридных автомобилях в режиме «Двигатель готов к работе» расчетная нагрузка может быть любой от 0–100 %, т.к. ДВС может быть как выключен (CALC LOAD=0 %), так и нагружен зарядом тяговой аккумуляторной батареи (CALC LOAD≈95 %) [5].

При различных неисправностях, например пропуски воспламенения, ресинхронизация ГРМ и коленчатого вала, потери в двигателе растут, а значит расчетная нагрузка на холостом ходу будет также увеличиваться. Однако проверка автомобилей с пробегом более 400 тыс. км с сильно изношенными двигателями показывает, что расчетная нагрузка на холостом ходу почти не изменяется. Это можно объяснить тем, что одновременно со снижением эффективности работы двигателя снижаются и потери на трение в изношенных парах.

Будет ли расчетная нагрузка 100 % при полностью нажатой педали акселератора? В простых бензиновых двигателях с тросовым приводом дроссельной заслонки она достигнет 100 %. Но в двигателях с электроприводом дроссельной заслонки расчетная нагрузка на перегазовках без нагрузки будет ограничена для защиты от повышенных оборотов коленчатого вала.

В 6- и 8-цилиндровых двигателях расчетная нагрузка на холостом ходу меньше, чем в 4-цилиндровых из-за более низких относительных механических потерь.

Теперь рассмотрим абсолютную нагрузку двигателя. Параметр абсолютной нагрузки двигателя характеризуется как нормализованное значение массы воздуха на такт впуска, отображаемое в процентах. Абсолютная нагрузка имеет некоторые отличия в вычислении:

$$LOAD\ ABS = \frac{M_{Bi}}{1,184 V_p},$$

где M_{Bi} – масса воздуха поступившего в цилиндры (г/цикл); V_p – рабочий объем цилиндров.

M_{Bi} – рассчитывается по формуле

$$M_{Bi} = \frac{M_{\Sigma} \times 60}{n \times 0,5},$$

где M_{Σ} – масса воздуха, попадающего в цилиндры (г/с); n – скорость вращения коленчатого вала.

$$LOAD\ ABS = \frac{M_{\Sigma} \times 60}{n \times 0,5 \times 1,184 V_p}$$

или

$$LOAD\ ABS = \frac{M_{Bi}}{M_{MAX}} \times 100 (\%).$$

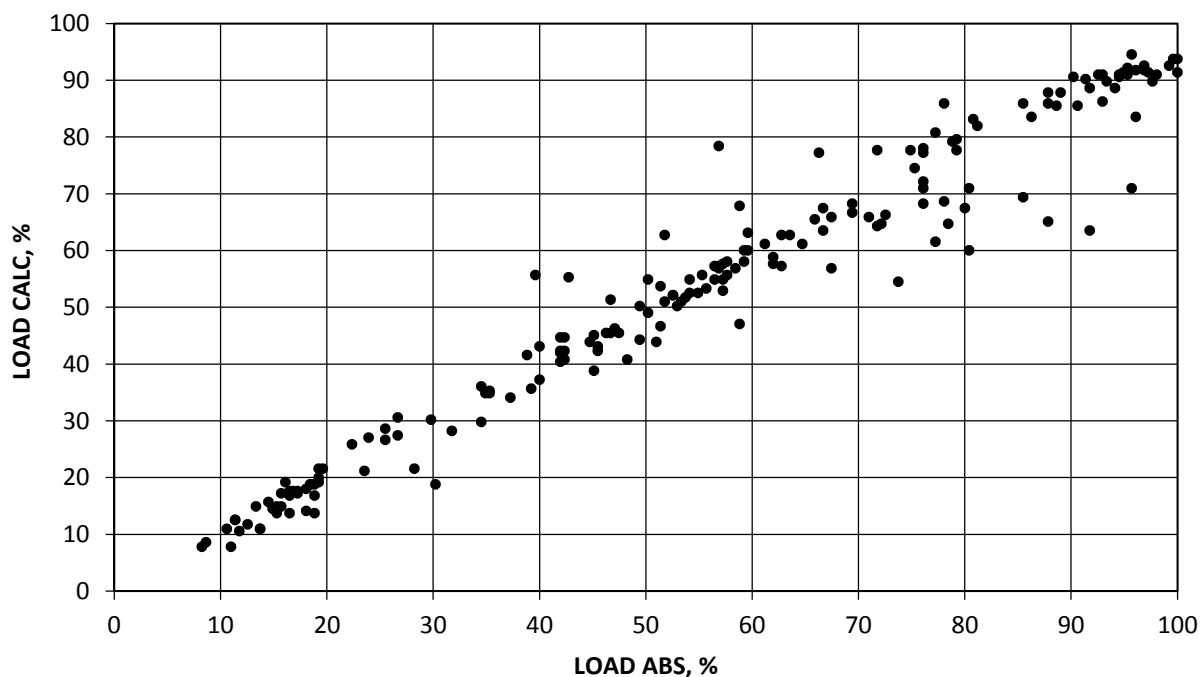


Рис. 2. График корреляции расчетной нагрузки и абсолютной нагрузки атмосферного двигателя G4FC

Таким образом, абсолютная нагрузка – это отношение массы воздуха, попавшего в цилиндр, по отношению к максимальной массе воздуха в цилиндре при атмосферном давлении. Т.е. в программе управления двигателем задано значение максимальной массы воздуха в цилиндре, а фактическое его значение постоянно рассчитывается исходя из оборотов коленчатого вала

Известно, что воздух инерционен и даже при максимальном открытии дроссельной заслонки весь он не успеет попасть в цилиндр. Это объясняет диапазон возможных значений абсолютной нагрузки для атмосферных двигателей (0–95 %). В двигателях с турбонаддувом в цилиндр может быть закачено воздуха больше, чем его объем при нормальном атмосферном давлении. Диапазон значений абсолютной нагрузки в таких двигателях составляет 0–400 % [6].

Абсолютная нагрузка линейно коррелируется с крутящим моментом на выходном валу, поэтому зачастую используется для корректировки угла опережения зажигания и рециркуляции отработавших газов.

Произведем сравнение значений расчетной нагрузки и абсолютной нагрузки двигателя по экспериментальным данным. Для этого поместим обе группы значения на координатные оси [7].

График корреляции LOAD (рис. 2) получен экспериментальным путем на автомобиле с атмосферным двигателем при движении с различными ускорениями и максимальном нагружении двигателя. Как и было отмечено выше: значения рассматриваемые понятия в целом схожи, но все же имеют небольшие отличия. При этом можно наблюдать и снижение LOAD до 8 % при торможении двигателем, и максимальные значения LOAD ABS 105,5 %.

Экспериментальные данные наглядно показывают отличия между расчетной и абсолютной нагрузкой

двигателя. Обобщая изложенное, можно сделать вывод, что расчетная нагрузка, показывающая относительную величину крутящего момента двигателя, дает возможность оценить рабочие параметры двигателя, т.е. его эксплуатационные свойства. Абсолютная нагрузка показывает степень наполнения цилиндра воздухом, т.е. отображает сопутствующий параметр, который может характеризовать конструктивные особенности, эффективность работы и техническое состояние двигателя.

Глубокое понимание рассматриваемых понятий позволяет создавать новые более эффективные методы диагностирования двигателей внутреннего сгорания и оценки их эксплуатационных свойств.

Литература

1. Мороз, С. М. Методы обеспечения работоспособного технического состояния автотранспортных средств : учебник / С. М. Мороз. – Москва : МАДИ, 2015. – 204 с.
2. OBD-2 и электронные системы управления двигателем. – Москва : Альфапет, 2018. – 248 с.
3. Дьяченко, В. Г. Теория двигателей внутреннего сгорания : Учебник / В. Г. Дьяченко. – Харьков : ХНАДУ, 2009. – 500 с. (Перевод с украинского языка).
4. Управление бензиновым двигателем. Теория и компоненты. Перевод с английского. Учебное пособие. – М.ЗАО «Легион-Автодата», 2012. – 88 с.
5. Раков, В. А. Оценка эксплуатационных свойств автомобилей с комбинированными энергетическими установками / В. А. Раков. – Вологда : Вологодский государственный университет, 2020. – 240 с.
6. Учебное пособие BOSCH электронное управление дизельными двигателями. Легион-Автодата. Перевод с английского. Учебное пособие. – М.ЗАО «Легион-Автодата», 2012. – 88с.

7. Бондарчук, С. С., Бондарчук, И. С. Статобработка экспериментальных данных в MS Excel : учебное пособие. – Томск : Издательство Томского государственного педагогического университета, 2018. – 433 с.

V.A. Rakov
Vologda State University

**SPECIAL ASPECTS OF INTERPRETATION OF CALCULATE
AND ABSOLUTE ENGINE LOAD CONCEPTS**

The article considers the parameters of absolute load and calculated load of the engine. Explanations are given for the use of these concepts in diagnosing an engine, as well as the procedure for their calculation. Experimental dependences of engine load change in different operating modes are given.

Vehicle operation, diagnostics, design load, absolute load, technical condition assessment.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Бормосов Николай Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры автомобилей и автомобильного хозяйства Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
bormosovna@vogu35.ru

Галиев Руслан Маратович

аспирант кафедры автоматики и вычислительной техники Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
ruslangaliev94@gmail.com

Денисова Марина Вячеславовна

магистрант кафедры автоматики и вычислительной техники Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
avt@vogu35.ru

Иньков Александр Эдуардович

ассистент кафедры промышленного и гражданского строительства Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
inkovaie@vogu35.ru

Инькова Юлия Александровна

аспирант кафедры промышленного и гражданского строительства Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
gubinaia@vogu35.ru

Лаврентьев Павел Сергеевич

ассистент кафедры промышленного и гражданского строительства Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
lavrentevps@yandex.ru

Лукинов Максим Михайлович

магистрант кафедры теплогазоснабжения Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
bormosovna@vogu35.ru

Нагимзянова Диана Айваровна

магистрант кафедры промышленного и гражданского строительства Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
nagimzyanovada@vogu35.ru

Назарова Марина Александровна

кандидат биологических наук, доцент кафедры биологии и химии Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
nazarovama@vogu35.ru

Никитин Леонид Алексеевич

кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Вологодского научного центра Российской академии наук (Вологда, Россия)
sznii@list.ru

Никифоров Владислав Евгеньевич

старший преподаватель кафедры электрооборудования Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
eo@vogu35.ru

Попов Игорь Павлович

старший преподаватель кафедры технологии машиностроения, металлорежущих станков и инструментов Курганского государственного университета (Курган, Россия)
ip.popow@yandex.ru

Раков Вячеслав Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры автомобилей и автомобильного хозяйства Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
vyacheslav.rakov@mail.ru

Рахманов Роман Витальевич

магистрант кафедры промышленного и гражданского строительства Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
rakhmanovrv@vogu35.ru

Ржеуцкая Светлана Юрьевна

кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации и вычислительной техники Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
rzeyzki@yandex.ru

Соколов Александр Владимирович

магистрант кафедры теплогазоснабжения Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
bormosovna@vogu35.ru

Соловьев Сергей Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
solovevsa@vogu35.ru

Соловьева Анастасия Андреевна

аспирант кафедры промышленного и гражданского строительства Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
solovevaaa@vogu35.ru

Сушев Леонид Андреевич

соискатель, Вологодский государственный университет (Вологда, Россия)
sushevla@vogu35.ru

Фоменко Александра Ивановна

доктор технических наук, профессор кафедры биологии и химии Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
fomenko1212@inbox.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Bormosov Nikolai Alexandrovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Automobiles and Automobile Economy, Vologda State University (Vologda, Russia)
bormosovna@vogu35.ru

Galiev Ruslan Maratovich

Postgraduate student, Department of Automation and Computer Engineering, Vologda State University (Vologda, Russia)
ruslangaliev94@gmail.com

Denisova Marina Vyacheslavovna

Master student, Department of Automation and Computer Engineering, Vologda State University (Vologda, Russia)
avt@vogu35.ru

Inkov Alexander Eduardovich

Assistant, Department of Industrial and Civil Engineering, Vologda State University (Vologda, Russia)
inkovaie@vogu35.ru

Inkova Yulia Alexandrovna

Postgraduate Student, Department of Industrial and Civil Engineering, Vologda State University (Vologda, Russia)
gubinaia@vogu35.ru

Lavrentiev Pavel Sergeevich

Assistant, Department of Industrial and Civil Engineering, Vologda State University (Vologda, Russia)
lavrentevps@yandex.ru

Lukinov Maxim Mikhailovich

Master student, Department of Heat, Gas and Water Supply, Vologda State University (Vologda, Russia)
bormosovna@vogu35.ru

Nagimzyanova Diana Aivarovna

Master student, Department of Industrial and Civil Engineering, Vologda State University (Vologda, Russia)
nagimzyanovada@vogu35.ru

Nazarova Marina Alexandrovna

Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Biology and Chemistry, Vologda State University (Vologda, Russia)
nazarovama@vogu35.ru

Nikitin Leonid Alekseevich

Candidate of Engineering, Associate Professor, Leading researcher of Vologda Research Centre of the Russian Academy of Science (Vologda, Russia)
sznii@list.ru

Nikiforov Vladislav Evgenyevich

Senior lecturer, Department of Electrical Equipment, Vologda State University (Vologda, Russia)
eo@vogu35.ru

Popov Igor Pavlovich

Senior Lecturer, Department of Mechanical Engineering Technology, Metal-cutting Machines and Tools, Kurgan State University (Kurgan, Russia)
ip.popov@yandex.ru

Rakov Vyacheslav Alexandrovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Automobiles and Automobile Economy, Vologda State University (Vologda, Russia)
vyacheslav.rakov@mail.ru

Rakhmanov Roman Vitalievich

Master student, Department of Industrial and Civil Engineering, Vologda State University (Vologda, Russia)
rakhmanovrv@vogu35.ru

Rzheutskaya Svetlana Yurievna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Automation and Computer Engineering, Vologda State University (Vologda, Russia)
rzeyzki@yandex.ru

Sokolov Alexander Vladimirovich

Master student, Department of Heat, Gas and Water Supply, Vologda State University (Vologda, Russia)
bormosovna@vogu35.ru

Solovyov Sergey Alexandrovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial and Civil Engineering, Vologda State University (Vologda, Russia)
solovevsa@vogu35.ru

Solovyova Anastasia Andreevna

Postgraduate student, Department of Industrial and Civil Engineering, Vologda State University (Vologda, Russia)
solovevaaa@vogu35.ru

Sushev Leonid Andreevich

External PhD student, Vologda State University (Vologda, Russia)
sushevla@vogu35.ru

Fomenko Alexandra Ivanovna

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Biology and Chemistry, Vologda State University (Vologda, Russia)
fomenko1212@inbox.ru

Научное издание

ВЕСТНИК ВОЛОГОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

Серия: Технические науки
№ 3 (17) / 2022

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 02.11.2022. Выпуск в свет 18.11.2022. Формат 60 × 84/8
Уч.-изд. л. 9,25. Усл. печ. л. 10,0. Тираж 30 экз. Заказ № 747. Цена свободная

ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет»
160000, г. Вологда, ул. Ленина, 15

Отпечатано: ООО РА «Эпатаж»
160004, г. Вологда, ул. Ленинградская, 38
Тел.: (8172) 724-800, 70-25-77, e-mail: ra-epatazh@mail.ru