

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.

№ 4 (14) / 2021

СЕРИЯ: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ВОЛОГДА
2021

№ 4 (14) / 2021 / ДЕКАБРЬ. Выходит 4 раза в год.

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

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

Серия: Технические науки

Группы специальностей: 1.2. Компьютерные науки и информатика;

2.1. Строительство и архитектура;

2.5. Машиностроение

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, доктор технических наук, профессор Волгоградского государственного технического университета,

В.А. Горбунов, доктор физико-математических наук, профессор Вологодского государственного университета,

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

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

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

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

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

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

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

А.А. Суконников, кандидат технических наук, доцент Вологодского государственного университета,

Н.Н. Трушин, доктор технических наук, профессор Тульского государственного университета,

Д.С. Шишигин, кандидат технических наук, зам. директора Института машиностроения, энергетики и транспорта Вологодского государственного университета,

С.Л. Шишигин, доктор технических наук, профессор Вологодского государственного университета,

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

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

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

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

Оригинал-макет – *Н.В. Подхомутова*

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

ISSN 2658-3399

© ФГБОУ ВО «Вологодский
государственный университет», 2021

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

BULLETIN OF VOLOGDA STATE UNIVERSITY

SCIENTIFIC JOURNAL

First published in 2018

No. 4 (14) / 2021

SERIES: TECHNICAL SCIENCIES

VOLOGDA
2021

No. 4 (14) / 2021 / DECEMBER. 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: 1.2. Computer Science and Informatics;
2.1. Construction and architecture;
2.5. Mechanical engineering

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. Bochkarev, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Volgograd State Technical University,

V.A. Gorbunov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of Vologda State University,

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

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

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

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

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

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

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

A.A. Sukonshchikov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Vologda State University,

N.N. Trushin, Doctor of Technical Sciences, Professor of Tula State University,

D.S. Shishigin, Candidate of Engineering, Deputy Director of the Institute of Engineering, Energy and Transport, Vologda State University,

S.L. Shishigin, Doctor of Technical Sciences, Professor of Vologda State University,

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

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

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

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

Original layout – N.V. Podhomutova

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

ISSN 2658-3399

© FSBEI of HE Vologda
State University, 2021

Содержание

КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ И ИНФОРМАТИКА

<i>Веселов М.В., Федотовский С.Б.</i> ЦИФРОВИЗАЦИЯ ОБЪЕКТОВ КОММУНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ	7
<i>Давыдова Е.Н., Коппалина А.А.</i> РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЕМ	13
<i>Сапиев А.З.</i> КОМПЬЮТЕРНЫЙ ПОЧЕРК КАК СПОСОБ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ В СЕТИ	17
<i>Сергушичева А.П., Никулин С.В.</i> АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ КОРПОРАТИВНОЙ IP-ТЕЛЕФОНИИ	20
<i>Суконщиков А.А., Круглов В.В.</i> ЭФФЕКТИВНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ МНОЖЕСТВЕННЫХ ПОЛУПРОЗРАЧНЫХ ОБЪЕКТОВ В 3D-ГРАФИКЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ	24

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

<i>Михалевич Н.В., Шахова Е.Н.</i> К ВОПРОСУ О ПРИЧИНАХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ РАДИОМАЧТ	30
<i>Соловьев С.А., Иньков А.Э., Соловьева А.А.</i> МЕТОД РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПО УСЛОВИЮ ПРОЧНОСТИ ПРИ ИНТЕРВАЛЬНОЙ ОЦЕНКЕ СЛУЧАЙНЫХ ПАРАМЕТРОВ	34
<i>Соловьев С.А., Летавин А.Д., Губина Ю.А., Соловьева А.А., Шевцов Л.С.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВОВ ВЫСОКОПРОЧНОГО АРБОЛИТА И КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ НА ИХ ОСНОВЕ	39
<i>Шорин В.А., Вельсовский А.Ю.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НЕФТЯНОГО ДОРОЖНОГО БИТУМА МОСКОВСКОГО НПЗ С МОДИФИЦИРОВАННОЙ БИФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДОБАВКОЙ HONEYWELL	45

МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Кудрин Н.А., Григорьев Н.С.</i> ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ КРЫЛЬЧАТКИ ВЕНТИЛЯТОРА В СООТВЕТСТВИИ С ТРЕБОВАНИЯМИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ	50
<i>Колобов А.В., Игумнов Е.М.</i> УПРАВЛЕНИЕ ПРОДУКТОВЫМИ ИННОВАЦИЯМИ КАК ЭВОЛЮЦИОННЫЙ ЭЛЕМЕНТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ БИЗНЕС-СИСТЕМЫ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ МНОГООТРАСЛЕВОГО ХОЛДИНГА	54
<i>Кошутин Д.В.</i> ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ АСПЕКТ ПРОМЫШЛЕННОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ ВИРТУАЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ	60
<i>Морозов А.В., Прошкин В.Н.</i> МАГНИТОУПРУГИЙ ДАТЧИК УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ	63
<i>Попов И.П.</i> МЕХАНИЧЕСКИЕ РЕАКТАНСЫ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЯХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ	65
<i>Яняк С.В., Комиссарова И.И.</i> ФРАКТОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОВЕРХНОСТЕЙ РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ С ЖЕЛЕЗНОЙ СВЯЗКОЙ	68
<i>Сведения об авторах</i>	73

CONTENTS

COMPUTER SCIENCE AND INFORMATION TECHNOLOGY

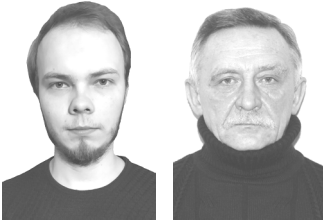
<i>Veselov M.V., Fedotovskiy S.B.</i> DIGITALIZATION OF UTILITY POWER OBJECTS	7
<i>Davydova E.N., Koppalina A.A.</i> DEVELOPMENT OF A SECURITY MODEL FOR AUTOMATED ENTERPRISE MANAGEMENT SYSTEM	13
<i>Sapiey A.Z.</i> COMPUTER WRITING STYLE AS A METHOD FOR IDENTIFICATION OF USERS ON THE NETWORK	17
<i>Sergushicheva A.P., Nikulin S.V.</i> ALGORITHM FOR BUILDING CORPORATE IP-TELEPHONY	20
<i>Sukonshchikov A.A., Kruglov V.V.</i> EFFECTIVE RENDERING OF MULTIPLE TRANSPARENT OBJECTS IN REALTIME 3D GRAPHICS	24

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

<i>Mikhalevich N.V., Shakhova E.N.</i> ON THE ISSUE OF REINFORCED CONCRETE RADIOMASTS DAMAGE CAUSES	30
<i>Solovyev S.A., Inkov A.E., Solovyeva A.A.</i> METHOD FOR ANALYSIS OF FLEXURAL STRUCTURAL ELEMENTS RELIABILITY ON THE STRENGTH CRITERIA WITH INTERVAL ESTIMATIONS OF RANDOM PARAMETERS	34
<i>Solovyev S.A., Letavin A.D., Gubina Yu.A., Solovyeva A.A., Shevtsov L.S.</i> RESEARCH OF HIGH-STRENGTH ARBOLITE MIXTURES AND STRUCTURAL SOLUTIONS ON THEIR BASIS	39
<i>Shorin V.A., Velsovskiy A.Y.</i> RESEARCH OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF PETROLEUM ROAD BITUMEN OF MOSCOW REFINERY WITH MODIFIED BIFUNCTIONAL ADDITIVE HONEYWELL	45

MECHANICAL ENGINEERING

<i>Kudrin N.A., Grigoriev N.S.</i> OPTIMIZING FAN IMPELLER DESIGN TO MEET PERFORMANCE REQUIREMENTS	50
<i>Kolobov A.V., Igumnov E.M.</i> PRODUCT INNOVATIONS MANAGEMENT AS AN EVOLUTIONARY ELEMENT OF IMPROVING THE BUSINESS SYSTEM IN MULTIFUNCTIONAL HOLDING ENTERPRISES	54
<i>Koshutin D.V.</i> TECHNOLOGICAL ASPECT OF INDUSTRIAL CLUSTERIZATION ON THE BASIS OF A VIRTUAL ENTERPRISE	60
<i>Morozov A.V., Proshkin V.N.</i> MAGNETOELASTIC ANGULAR MOVEMENT SENSOR	63
<i>Popov I.P.</i> MECHANICAL REACTANCES AT HARMONIC VIBRATIONS OF MACHINES AND MECHANISMS EXECUTIVE ELEMENTS	65
<i>Yanyak S.V., Komissarova I.I.</i> FRACTOGRAPHIC ANALYSIS OF HARD ALLOYS WITH IRON BINDING FAILURE SURFACES	68
<i>Information about the authors</i>	76



ЦИФРОВИЗАЦИЯ ОБЪЕКТОВ КОММУНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Коммунальная электроэнергетика ближе всех находится к населению, так как именно она в итоге поставляет электрическую энергию конечному потребителю. Отсюда следует, что вопросы модернизации электрических подстанций должны проводиться на основе самых современных цифровых технологий. В статье на основе практического опыта рассматриваются требования и методики построения системы автоматизации сбора технологической информации, мониторинга, хранения и представления ее диспетчерскому персоналу, рассматриваются преимущества и недостатки различных вариантов.

Оперативно-диспетчерское управление, объекты коммунальной электроэнергетики, системы телемеханики, SCADA-системы.

Характерной особенностью объектов коммунальной электроэнергетики является значительная территориальная распределенность этих объектов (электрических подстанций, распределительных пунктов РП, трансформаторных подстанций ТП, РТП, КТП и т.п.), что не свойственно для электростанций или подстанций, относящихся к РАО «ЕЭС» (МРСК). Второй особенностью является, как правило, отсутствие постоянного обслуживающего персонала, поэтому наличие информации о состоянии объекта энергетики в оперативном режиме является актуальной задачей. Это позволит сократить время на локализацию места повреждения, проведение оперативных переключений, ликвидацию аварийных ситуаций, что в конечном итоге приведет к сокращению недоотпуска электроэнергии потребителям.

Целью статьи является анализ возможных способов цифровизации именно объектов коммунальной электроэнергетики и наиболее предпочтительных методов решения указанной выше задачи. Предлагаемые решения были использованы при построении и эксплуатации системы телемеханики и коммерческого учета электроэнергии в течение 12 лет на государственном энергетическом предприятии «Вологдаоблкоммунэнерго».

Далее условимся, что любой объект коммунальной электроэнергетики будем называть подстанцией, хотя это и не совсем корректно. Для диспетчерского контроля и управления характерно наличие всех трех типов сигналов: телесигнализации (ТС), телеизмерений (ТИ) и телеуправления (ТУ). Сигналы типа ТС позволяют иметь информацию о состоянии высоковольтных выключателей вводных и отходящих ячеек (масляных, вакуумных, элегазовых), секционных выключателей, приборов учета электроэнергии, замыканий на землю или других сигналов релейной защиты, контроля наличия напряжения на выходе трансформатора собственных нужд, а также, возможно, сигнала

лов контроля доступа на объект. Тип таких сигналов – дискретный. Сигналы ТИ позволяют контролировать величины токов вводных и отходящих линий, напряжений на секциях шин и другие. Тип этих сигналов – аналоговый. Сигналы ТУ предназначены для включения/отключения того или иного оборудования, например высоковольтных выключателей. Приведенные выше примеры описывают минимально необходимый состав сигналов, который в конкретных случаях может быть расширен. Все зависит от требований оперативно-диспетчерского персонала и финансового состояния предприятия.

Как правило, сигналы телесигнализации в контроллерах низовой автоматики, находящихся непосредственно на самой подстанции, хватает, чего нельзя сказать о сигналах телеизмерений и телеуправления. Даже если телеуправление не используется по удаленному каналу, то количество входов ТИ обычно бывает недостаточно в одном контроллере. Обзор оборудования систем телемеханики различных производителей позволяет это подтвердить [1–4]. Чаще всего это связано с тем, что в составе контроллера имеется лишь один аналого-цифровой преобразователь с мультиплексором на входе, позволяющим создавать/подключать обычно не более восьми аналоговых устройств. Кроме того, этот тип сигналов требует еще и цифровой фильтрации вследствие их высокой зашумленности, что в сочетании с их количеством ведет к достаточно большим временным затратам и снижению быстродействия.

Возможны два способа построения системы низовой автоматики при соответствующей мощности аппаратных ресурсов контроллеров:

- установка однотипных контроллеров на каждую ячейку подстанции (рис. 1);
- установка одного контроллера, но с дополнительной аппаратурой расширения (рис. 2).

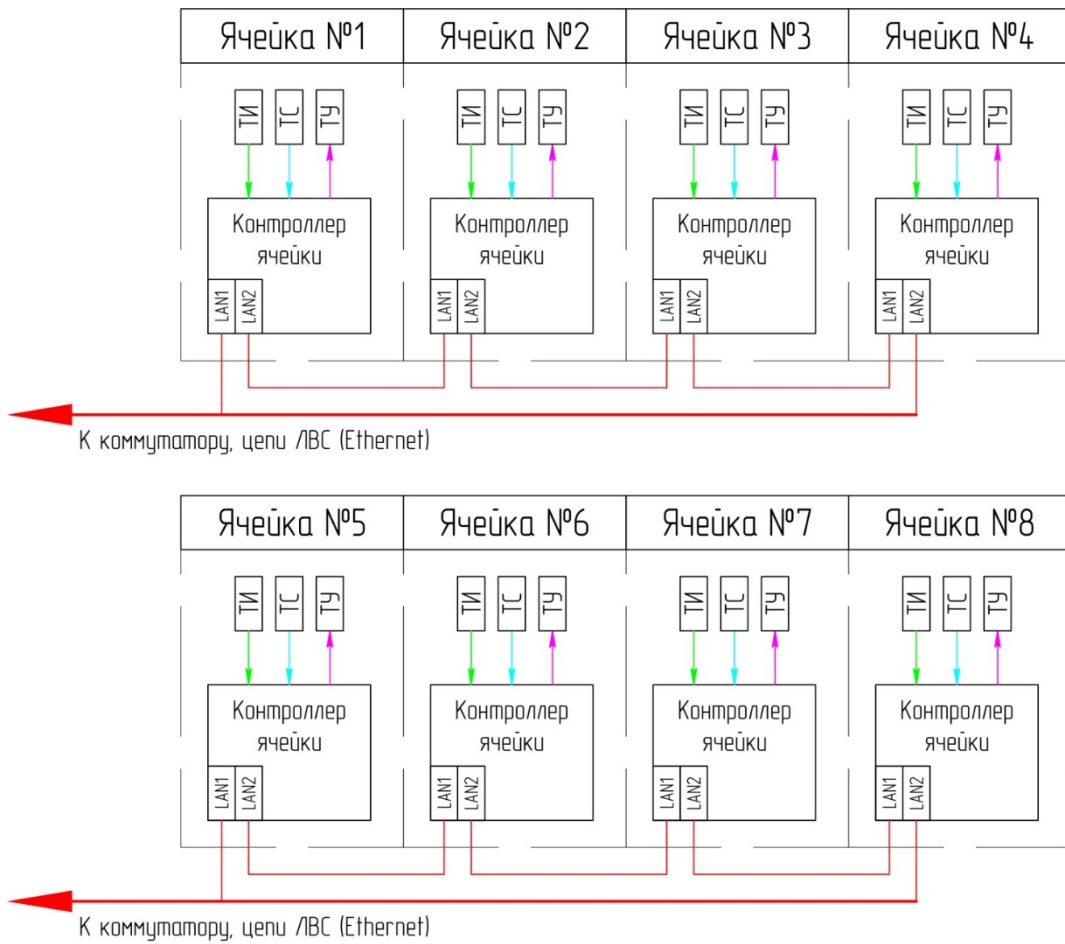


Рис. 1. Схема установки контроллера на каждую ячейку

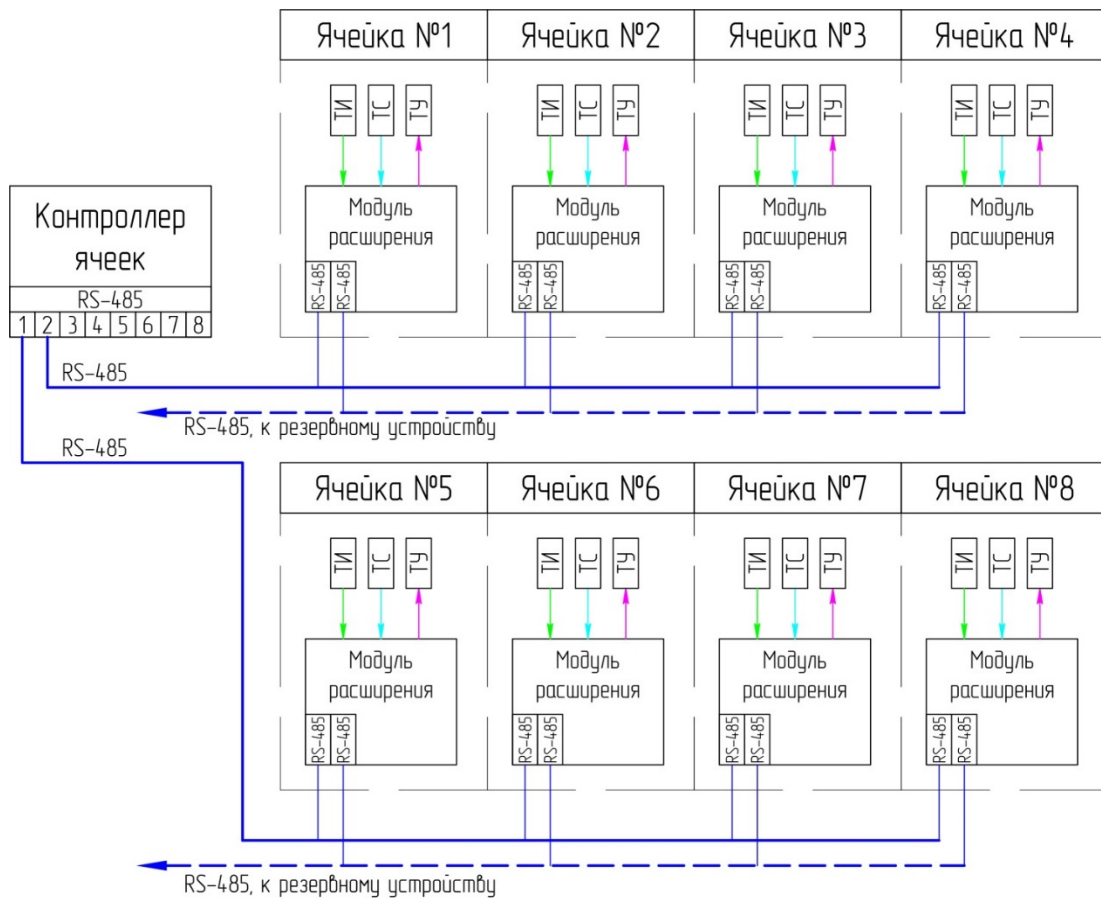


Рис. 2. Схема установки контроллера с аппаратурой расширения

В первом случае увеличивается отказоустойчивость системы сбора информации с объекта, так как при отказе одного терминального контроллера все остальные остаются в работе, и пусть не полная, но какая-то часть информации о подстанции будет доступна. Правда, выход из строя коммутатора приведет к полному отсутствию информации об объекте, даже при всех работающих контроллерах, однако надежность современных коммутаторов значительно выше надежности терминальных контроллеров. То же произойдет и при отказе шлюза связи с сервером телемеханики, находящемся на следующем, более высоком уровне SCADA-системы. Но это присуще для любых систем телемеханики и не является характерной особенностью именно этой схемы построения. В целом рассматриваемый вариант представляет собой промышленную локальную вычислительную сеть. С другой стороны, следует признать, что экономически это довольно затратный вариант.

Во-первых, требуется наличие количества контроллеров, равное количеству ячеек подстанции, а это, разумеется, дороже, чем установка одного контроллера на весь объект. Модернизация подстанции увеличением количества ячеек также приводит к закупке целого комплекта оборудования.

Во-вторых, требуется наличие коммутатора, что также удорожает проект, хотя и не очень значительно.

В-третьих, требуется как-то разделять общий канал связи между контроллерами. Можно, конечно, установить индивидуальный канал связи с каждой ячейкой подстанции, но это уж совсем финансово нецелесообразный вариант.

В-четвертых, при такой структуре требуется более сложное программное обеспечение для контроллера для работы в промышленной сети.

Правда, количество соединительных проводов в целом в такой системе будет меньше, чем при одном контроллере на всю подстанцию. Более того, не возникает проблем с недостатком входов для аналоговых сигналов и сигналов телеуправления для сбора информации с одной ячейки.

Во втором случае вышеуказанные проблемы будут отсутствовать, но стоимость монтажных работ по прокладке кабельной системы будет выше. Также могут возникнуть сложности и по размещению проводников в ячейках подстанции, особенно ближних к контроллеру (может не хватить емкости/объема кабельного канала ячейки, так как именно в этих ячейках будет проложено максимальное количество проводников от всех ячеек).

На подстанциях, где количество ячеек на всех секциях больше восьми (а это практически всегда), количество входов ТИ при такой организации телемеханики будет явно недостаточно, поэтому потребуются установка дополнительных блоков расширения по этим входам, что, конечно же, ведет к удорожанию системы, однако все же стоимость аппаратуры и программного обеспечения для пункта низовой телемеханики будет заметно ниже по сравнению с первым вариантом. Как правило, блоки расширения предлагаются производителями отдельно и не входят в обязательный комплект. Покупка какого-то дополни-

тельного программного обеспечения, как правило, не требуется.

Следующим важным моментом является питание контроллеров подстанции. Если это объекты энергетики высокого напряжения (выше 1 кВ), то единственным способом питания контроллеров и, возможно, некоторых датчиков напряжением 220 Вольт является подключение их к системам РЗА (релейной защиты и автоматики), которые, в свою очередь, запитаны от трансформатора (трансформаторов) собственных нужд подстанции (ТСН). Обесточивание этих линий ведет к пропаданию информации обо всем объекте вследствие нерабочего состояния самих контроллеров. Это может быть следствием аварии как на самом ТСН, так и во время проведения профилактических/монтажных работ на подстанции с отключением ТСН или систем питания РЗА. Естественным решением этой проблемы является использование источников бесперебойного питания, однако это решение можно назвать лишь частичным, так как время работы этих источников все равно ограничено емкостью их аккумуляторных батарей. Наиболее правильным подходом будет являться контроль наличия напряжения на выходных клеммах ТСН, а лучше – на входах питания шин системы РЗА. При этом не обязательно контролировать величину напряжения, когда потребуются довольно дорогой датчик телеизмерений и соответствующих входов контроллера, что и без того является дефицитным моментом. Можно использовать датчики типа «сухой контакт» и вход для сигналов ТС контроллера, то есть контролировать не величину, а наличие напряжения. Таким образом, система телемеханики с точки зрения оперативно-диспетчерской службы должна контролировать не только состояние высоковольтного оборудования, но и систем РЗА.

Следующая система может быть реализована как подсистема существующей телемеханики, так и выделена в отдельную структуру. Речь идет об автоматизированной системе коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ). Так как часть электроэнергии подстанции тратится на собственные нужды (освещение, отопление и др.), то и юридически, и финансово было бы логично вести учет этих ресурсов. Это ведет к необходимости установки приборов учета, сертификации программного обеспечения (или его части) в случае комплексного решения системы телемеханики, «утяжеления» базы данных, однако не требует отдельного канала связи с сервером верхнего уровня и позволяет выявлять причины отсутствия данных по потреблению электроэнергии при авариях на подстанции.

Практический опыт показывает, что имеют место явления проникновения на подстанции сторонних лиц. Это может носить как умышленный, так и непреднамеренный характер. Последнее чаще всего носит более тяжелые последствия, так как субъект правонарушения плохо представляет себе опасность нахождения в зоне высоких напряжений. Поэтому установка охранных систем, систем контроля доступа и систем теленаблюдения не только крайне желательна, но и необходима, так как зачастую эти явления приводят к судебным разбирательствам. С одной стороны, это напрямую не относится к системам телемеханики, однако согласно [4, 5] эти системы разрешено

совмещать/интегрировать в единой структурированной кабельной системе, что удешевляет проект кабельной системы и особенно монтажные работы.

О топологии сети на подстанции уже было сказано выше, но не рассматривался вопрос о применении беспроводных каналов связи, которые сегодня очень широко используются в офисах, гостиницах, вокзалах, в домашних условиях. На взгляд авторов на подстанциях лучше не использовать любой вид беспроводной связи. Наличие высоковольтного коммутационного оборудования, сложной электромагнитной обстановки, особенно во время гроз, северных сияний и др., может привести к ложным срабатываниям или к недостоверной информации. Это может быть компенсировано более сложными алгоритмами, но вряд ли будет оправдано экономически, особенно в пределах территории одной подстанции.

Все вышеперечисленное обычно интересует и понятно специалистам РЗА, отделов АСУП и некоторых других структур, однако сотрудники оперативно-диспетчерских служб работают с системой телемеханики «верхнего» уровня, часто называемой SCADA-системой. Систем низовой автоматики они, как правило, не знают. Что касается SCADA-систем, то они фактически представляют собой графическую оболочку («подложку», мнемоническую схему объекта телемеханики) с нанесенными на нее сигналами датчиков ТИ и ТС. Правда, у части производителей SCADA-систем эта оболочка может либо отсутство-

вать, либо иметь достаточно примитивный вид, как представлено, например, на рисунке 3.

Обычно это связано с универсальностью областей применения какой-либо SCADA-системы. Некоторые производители поставляют и более развитые графические оболочки (рис. 4), тем не менее ориентированность даже этих систем на определенную сферу автоматизации все же прослеживается.

Что же касается коммунальной энергетики, то ввиду большого количества объектов и их территориальной распределенности целесообразнее иметь в виде указанной «подложки» однолинейную схему подстанции с нанесенными на нее сигналами датчиков. Во-первых, она понятнее оперативному персоналу, а во-вторых, реально видна структура и расположение ячеек на объекте. Этот момент следует учитывать при выборе SCADA-систем различных производителей. Заметим, что у объектов коммунальной энергетики нет уникальных названий, как, например, подстанция «Южная» в городе Вологде (РАО ЕЭС) или Братская ГЭС, а есть просто номера, которые чаще всего связаны с очередностью ввода в эксплуатацию. Эта плохая информативность оборачивается, с другой стороны, удобством создания объектов в системах телемеханики (SCADA-системах), так как в конечном итоге уникальным идентификатором объекта в базе данных будет являться именно номер этого пункта электроэнергетики.

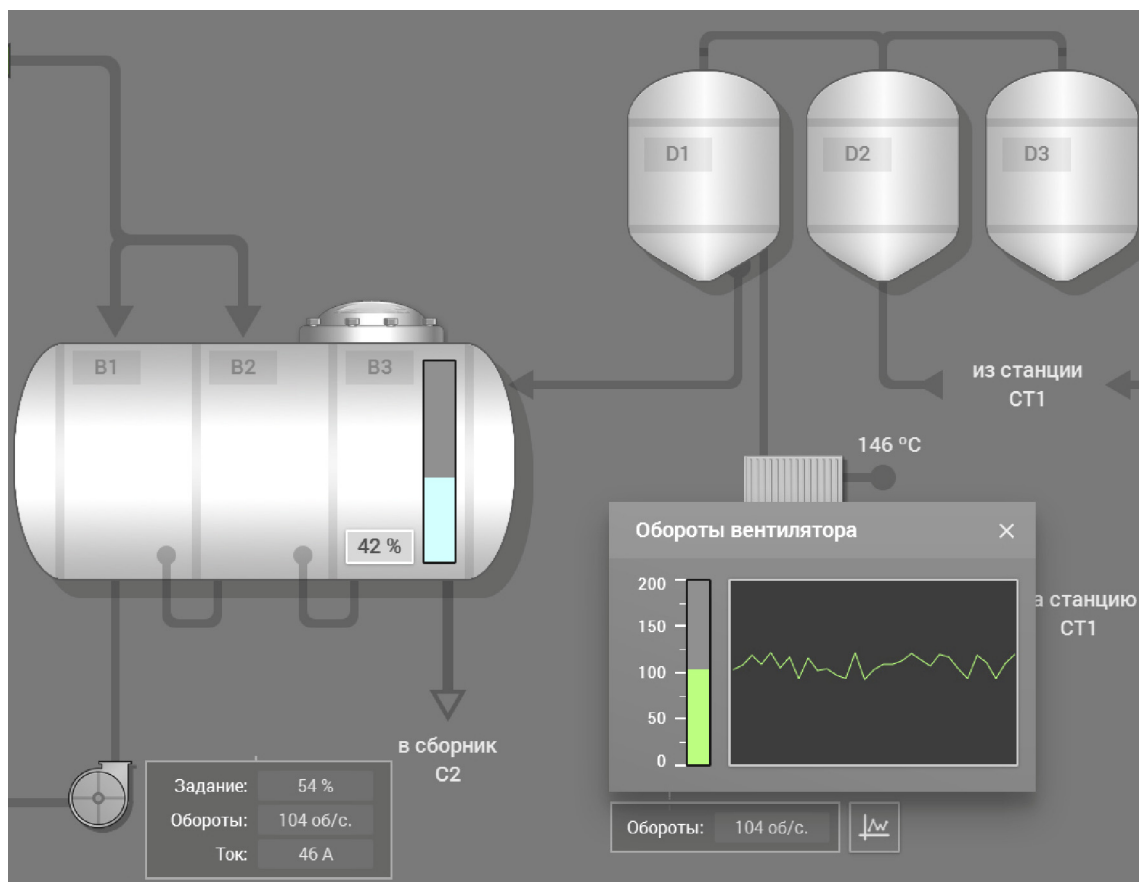


Рис. 3. Пример упрощенного варианта графической оболочки SCADA-системы

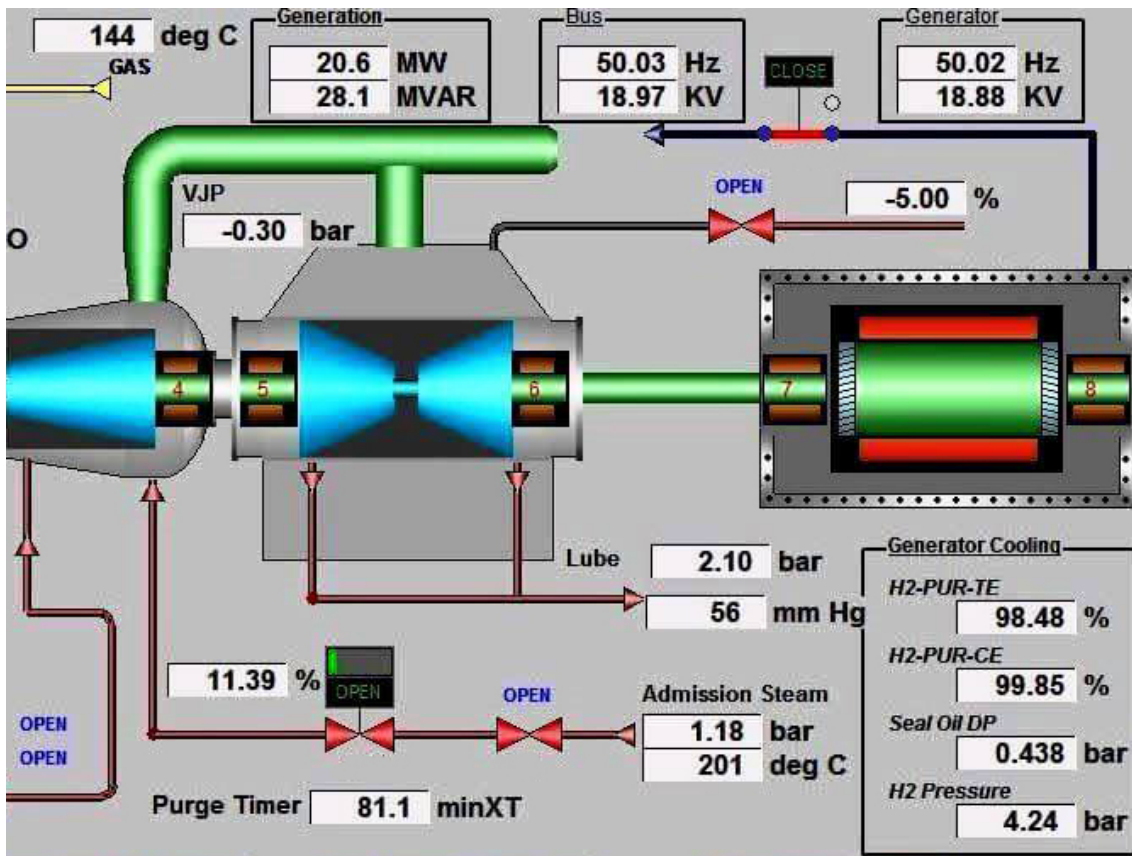


Рис. 4. Пример расширенного варианта графической оболочки SCADA-системы

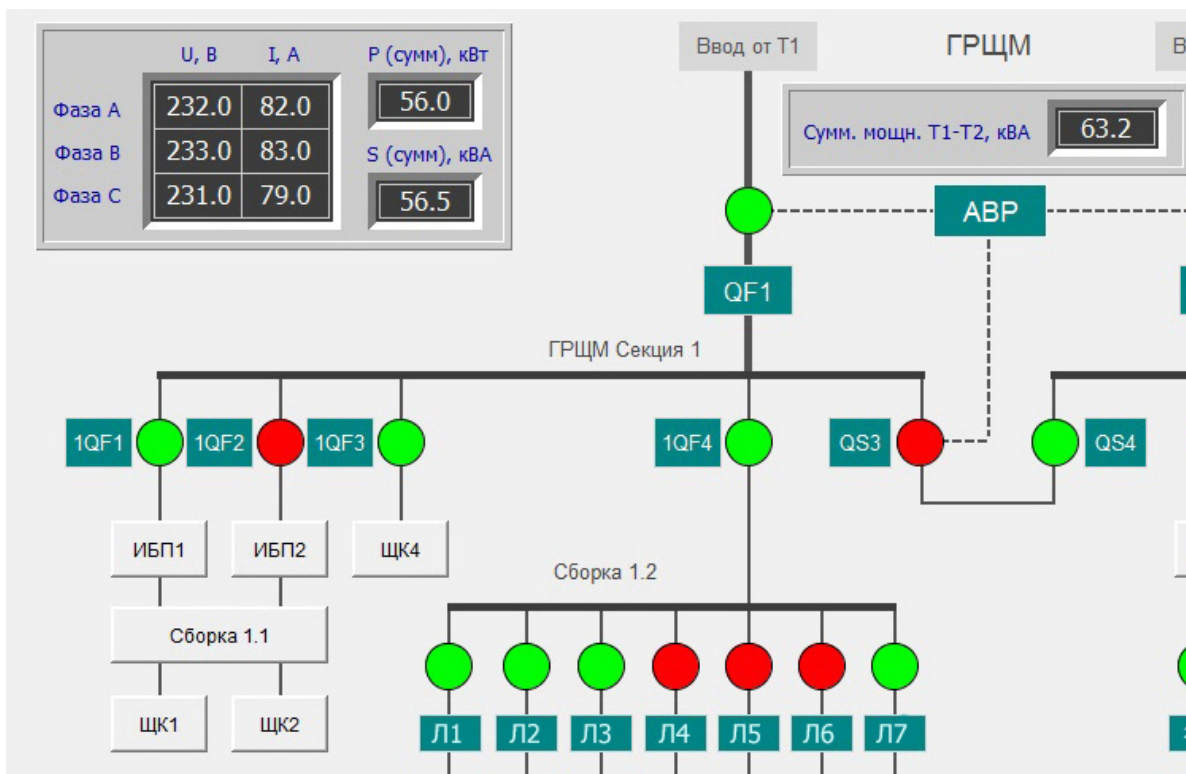


Рис. 5. Пример интерфейса SCADA-системы объектов электроэнергетики (распределительное устройство)

Следующим немаловажным моментом является периодичность снятия информации с датчиков. Что касается сигналов типа ТС, то здесь все проще: при каждой смене телесостояния данный сигнал поступает на пульт диспетчера и записывается в базу данных. С сигналами ТИ несколько сложнее. Достаточно частый опрос этих датчиков приведет к значительному росту базы данных, а достаточно редкий опрос может не дать необходимой статистики. Здесь, по-видимому, каждое предприятие электроэнергетики определяет этот параметр самостоятельно, однако в системе телемеханики должны быть заложены следующие возможности:

- поступление аварийных сигналов ТИ на диспетчерский пульт происходит в момент наступления аварийных ситуаций;

- дежурный диспетчер имеет возможность принудительного опроса любого датчика ТИ в любое время.

В заключение следует еще раз отметить, что в представленной статье рассмотрены основные варианты построения систем телемеханики, характерные для цифровизации подстанций коммунальной энергетики, приведены, на взгляд авторов, наиболее целесообразные схемные и системные решения. Преимуществом предлагаемого подхода является его комплексность,

позволяющая интегрировать в единую систему средства телемеханики, АСКУЭ, учета собственных нужд и видеонаблюдение.

Литература

1. Пи Эл Си Технолоджи : официальный сайт. – Москва. – URL: <https://tpz.ru/company/> (дата обращения: 10.10.2021). – Текст : электронный.

2. Selta (ООО Селта). – URL: <https://energosei.ru/supplier/selta-ooo-selta/>. – (дата обращения: 10.10.2021). – Текст : электронный.

3. ЮГ-СИСТЕМА плюс. – URL: <https://yugsus.ru/company/>. – Текст : электронный.

4. ГОСТ Р 53245-2008 Национальный стандарт Российской Федерации. Информационные технологии. Системы кабельные структурированные. Монтаж основных узлов системы. Методы испытания : дата введения 01.01.2010. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 40 с.

5. ГОСТ Р 53245-2008 Национальный стандарт Российской Федерации. Информационные технологии. Системы кабельные структурированные. Проектирование основных узлов системы. Общие требования : дата введения 01.01.2010.

M.V. Veselov, S.B. Fedotovskiy
Vologda State University

DIGITALIZATION OF UTILITY POWER OBJECTS

The utility power industry is the closest to the population, since it is it that ultimately supplies electric energy to the final consumer. This implies that the modernization of electrical substations should be carried out on the basis of the most modern digital technologies. Based on practical experience, the article discusses the requirements to and methods of building a system for automation of technological information collection, monitoring, storage and presentation to dispatching personnel, and considers the advantages and disadvantages of various options.

Operation and dispatch control, public electric power facilities, telemechanics systems, SCADA systems.



РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЕМ

В статье рассматривается построение модели системы безопасности автоматизированной системы управления предприятием (АСУП). Для этого проведен сравнительный анализ уже существующих моделей, разработана методика построения модели и приведен ее алгоритм. Описывается архитектура мультиагентных систем защиты информации и их применение в разрабатываемой модели.

Модель системы безопасности, многоагентные системы, автоматизированные системы, информационная безопасность, распределенные системы, вычислительные системы.

Информатизация – неотъемлемая часть современного общества. Через компьютеры проходит обслуживание банков, ведется документооборот организации, осуществляется автоматизация предприятия. Компьютеры – основа АСУП, осуществляющих базовые процессы: разработку, внедрение и сопровождение информационных систем.

АСУП – это система управления, построенная на базе средств вычислительной техники, математических и экономических методов и информационных технологий. Аппаратное обеспечение АСУП имеет в большинстве случаев распределенную архитектуру клиент – сервер и состоит из серверов и рабочих пользовательских компьютеров, объединенных общей сетью обработки информации. Такая система подвержена угрозам безопасности и утечке информации. Чтобы этого избежать, необходимо обеспечить систему защиты АСУП и свести к минимуму потенциальные внешние угрозы [1]. Угрозой является действие, которое вызывает нарушение защищенности информации, которая обрабатывается информационной системой [2].

Таким образом, поставим задачу усовершенствовать систему защиты АСУП путем создания модели обработки информации в системах безопасности. Но

перед тем как разработать модель, необходимо обозначить методику исследования модели системы безопасности АСУП. В данном случае разработаем следующую методику, состоящую из нескольких этапов:

1. Определение исходных данных и их анализ. Исходные данные: характеристики сети/подсети, типы данных, аппаратное и программное обеспечение, типы угрозы безопасности, наборы правил фильтрации и т.д.
2. Определение методов построения, вид модели, условия ее выполнения.
3. Анализ моделей систем безопасности. Определение требований.
4. Построение общей модели системы безопасности.
5. Определение вариантов модели системы безопасности [3]. Определение наборов правил фильтрации, направленных на противодействие выявленным угрозам безопасности.
6. Формирование набора правил фильтрации.
7. Построение модели системы безопасности.
8. Определение критериев работы разработанной модели.
9. Переход от модели к имитационному моделированию.
10. Оценка полученных результатов.

Таблица 1

Результаты оценки моделей системы безопасности сетей

Критерии	Обобщенная модель системы безопасности данных	Базовая модель безопасности Кле-менса	Общая статистическая модель анализа	Мандатная модель	Модель Биба	Матричная модель	Модель Белла-Лападула	Модель на сетях Петри
Количественная оценка уровня безопасности	+	+	+	-	-	-	-	-
Количественная оценка экономической эффективности	-	+	+	-	-	-	-	+
Отсутствие дополнительных функциональных зависимостей	-	+	-	+	+	+	+	+
Учет особенностей организационного построения системы	-	-	-	-	-	-	-	+
Анализ требований с учетом различных источников угроз	-	-	-	-	-	-	-	+
Параллелизм информационных процессов	-	-	-	-	-	-	-	+
Абстрактность	-	-	-	+	+	+	+	+
Графическое построение	-	-	-	-	-	-	-	+

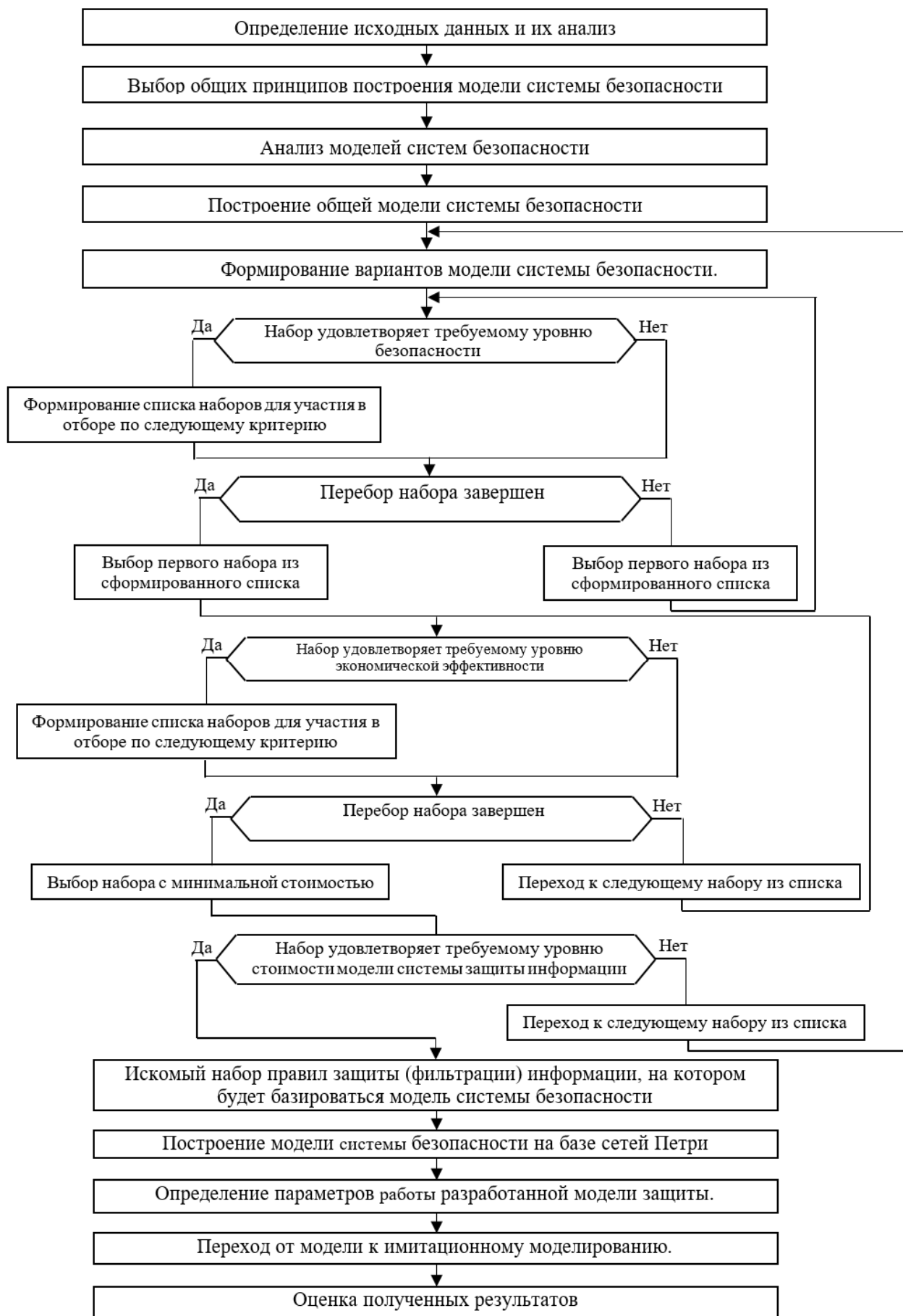


Рис. 1. Алгоритм методики исследования модели системы безопасности

Исходя из вышеперечисленного, можно изобразить методика исследования в виде алгоритма, представленного на рисунке 1.

За основу построения возьмем модель системы безопасности АСУП на базе применения межсетевых экранов, ограничивающих доступ извне.

Анализ возможных моделей системы безопасности АСУП представлен в таблице 1. В ней приведена оценка наиболее известных моделей по ряду выбранных нами критериев.

Модель на сетях Петри выигрывает по количеству реализованных требований, предъявляемых к разрабатываемой модели. Исходя из этого, выбираем ее в качестве базы, которую будем модифицировать для создания собственной модели безопасности.

Как говорилось выше, разрабатываемая система безопасности является распределенной, потому что:

- 1) представляет собой совокупность межсетевых экранов, находящихся отдельно друг от друга;
- 2) задачи системы распределены между отдельными ее модулями:
 - база данных защиты (хранение информации о правах доступа);
 - сервер аутентификации и идентификации (LDAP-сервер);
 - модуль управления межсетевыми экранами;
 - модуль диспетчера доступа (проверка права пользователя на совершение действия к данному объекту на основе правил разграничения доступа);
 - модуль фильтрации (анализ поступающих пакетов данных: блокировка или преобразование пакета);

– модуль регистрации событий.

В качестве архитектуры модели была взята архитектура многоагентной системы безопасности. Многоагентная система – система, в которой взаимодействуют два и более интеллектуальных агента. Агент – самостоятельная интеллектуальная система, обладающая некоторой совокупностью знаний о себе и окружающем мире.

В нашей системе будут функционировать следующие агенты:

- 1) агент разграничения доступа, ограничивающий доступ к данным в соответствии с политикой предоставления прав пользователям;
- 2) агент аутентификации и идентификации;
- 3) агент фильтрации;
- 4) агент регистрации событий;
- 5) мета-агенты, ответственные за согласование работы системы безопасности.

В данной структуре взаимодействия агентов зачастую реализуется синхронный режим обмена сообщениями: такие агенты, как агент фильтрации, аутентификации и идентификации, диспетчера доступа, останавливают свою работу до получения ответа от мета-агента, который, в свою очередь, выдает ответ на сообщения в соответствии с модулем базы данных защиты. Из минусов: временные затраты.

Модернизированная структура взаимодействия агентов, в которой выявленный недостаток исправлен путем смены режима на асинхронный, представлена на рисунке 2.

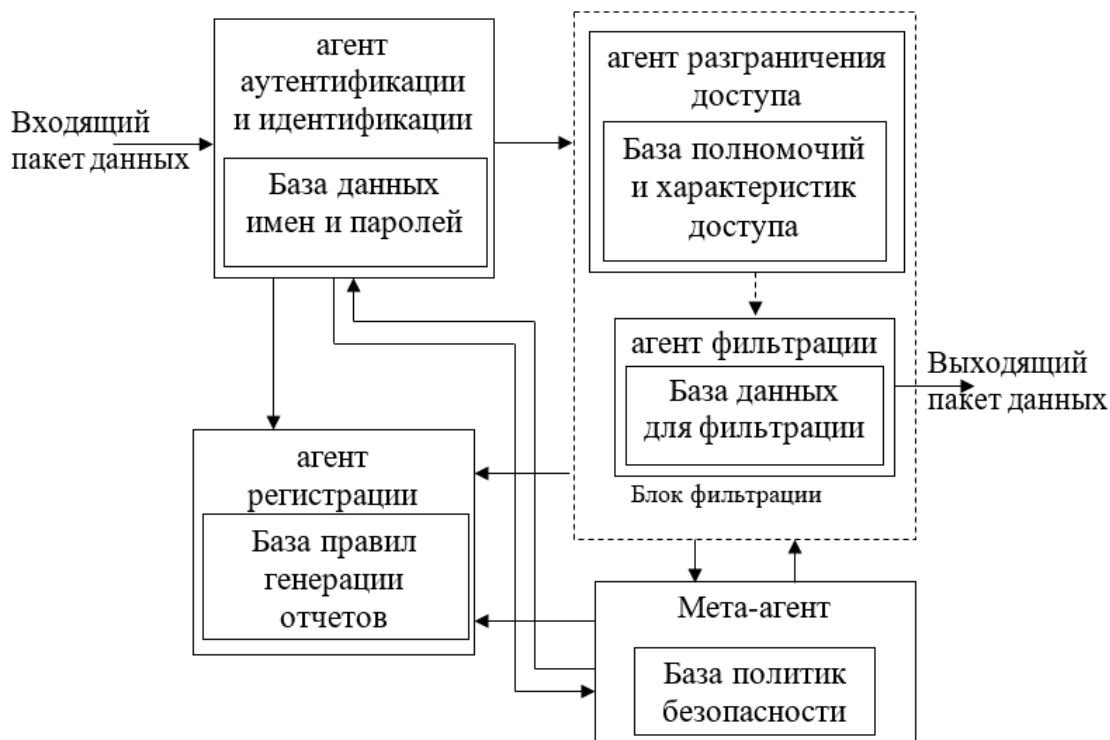


Рис. 2. Структура взаимодействия агентов (частный случай)

Каждый агент имеет свою собственную базу данных защиты. В таком случае значительно сокращается время на обработку входящего пакета. Поступающий на вход системы пакет данных вначале передается агенту аутентификации и идентификации. Он на основе записей базы данных защиты решает: уничтожить или передать пакет дальше. Отправляет соответствующее сообщение агенту регистрации событий и мета-агенту. Если пакет идет на дальнейшую проверку, то он перенаправляется агенту фильтрации. Там его проверяют в соответствии с базой данных фильтрации. Следующий в очереди агент – агент разграничения доступа. Его основа – база полномочий и характеристик доступа. Если пакет не удовлетворяет хотя бы одной записи базы данных фильтрации, то пакет подлежит уничтожению. Если проверка пройдена агентом фильтрации, то пакет передается на выход, а агенту регистрации посылается соответствующее сообщение. Мета-агент выступает в роли менеджера по управлению работой агентов: ему агенты отправляют сообщения о проделанных действиях.

Дальнейшие этапы создания модели находятся в разработке. Необходимо осуществить переход от общей модели системы безопасности к формальной и осуществить переход от созданной модели к имитационному моделированию.

Подводя итоги, можно сказать, что архитектура модели системы защиты будет базироваться на мультиагентах, т.е. компоненты системы будут выражены

через агентов – интеллектуальные автономные аппаратно-программные единицы. Каждый агент знает свои задачи, которые ему необходимо выполнить, знает, кому адресовать сообщение о выполненной работе и кому направить запрос, если действие вне его полномочий. Сообщения агентов представлены в форме, понятной другим агентам.

Литература

1. Давыдова, Е. Н. Методика оценки достаточности системы защиты компьютерной информации / Е. Н. Давыдова, Д. Ю. Крюкова, О. А. Панфилова / Вестник Воронежского института ФСИН России. – 2020. – № 1. – С. 68–76.

2. Коппалина, А. А. Защита информационных систем от комплексных внешних воздействий / А. А. Коппалина // XIV Ежегодная научная сессия аспирантов и молодых ученых : материалы Всероссийской научной конференции Вологда, 2020. – Т. 1. – С. 75–78.

3. Арьков, П. А. Разработка комплекса моделей для выбора оптимальной системы защиты информации в информационной системе организации : специальность 05.13.19 «Методы и системы защиты информации, информационная безопасность» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Павел Алексеевич Арьков. – Волгоград, 2009. – 185 с.

E.N. Davydova, A.A. Koppalina
Vologda State University

DEVELOPMENT OF A SECURITY MODEL FOR AUTOMATED ENTERPRISE MANAGEMENT SYSTEM

The article discusses the construction of the security system model of the automated control system. For this, a comparative analysis of already existing models was carried out, a methodology for constructing a model was developed and its algorithm was presented. the architecture of multi-agent information security systems and their application in the developed model are described.

Security system model, multi-agent systems, automated systems, information security, information protection, distributed systems, computing systems.



КОМПЬЮТЕРНЫЙ ПОЧЕРК КАК СПОСОБ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ В СЕТИ

Статья посвящена идентификации пользователей сети на основе анализа компьютерного почерка. Формируется модель формирования набора признаков идентификации пользователей информационных систем по компьютерному почерку, а также идентификации пользователей по клавиатурному почерку. Модель основана на использовании теории нечетких множеств и теории вероятностей.

Клавиатурный почерк, компьютерный почерк, модель, идентификация, набор признаков.

Клавиатурный почерк – уникальная характеристика, присущая каждому человеку. Чтобы составить персональный профиль, современным системам необходимо проанализировать способ набора текста, оценить скорость набора текста, паузы между ударами и время удержания клавиш [1].

Некоторое число специалистов по безопасности считают, что использование подобных технологий на веб-сайтах несет в себе реальную угрозу: ни один пользователь не сможет оставаться в информационной паутине анонимным, к тому же всегда есть шанс, что персональная информация попадет не в те руки.

Клавиатурный почерк – это не только скорость ввода информации, но и главным образом интервалы между нажатием на клавиши, а также число перекрытий между ними. Сюда еще можно добавить время удержания мыши, степень ритмичности при наборе текста, использование функциональных клавиш.

Биометрическое распознавание любого объекта основано на сравнении физиологических или психологических особенностей данного объекта с его характеристиками, которые хранятся в базе данных системы [2].

Контроль доступа в компьютерные системы, реализуемый на основе анализа клавиатурного почерка (КП), имеет ряд преимуществ. Системе не требуется никакого специального оборудования – для снятия параметров клавиатурного почерка достаточно специальной программы и клавиатуры пользователя, что значительно снижает стоимость системы. Таким образом, система контроля доступа в компьютерную систему на основе распознавания КП дешевле любого другого аппаратно-программного комплекса биометрической идентификации. В число недостатков такой системы можно включить значительную зависимость от психофизического состояния легального пользователя, чувствительность к естественным изменениям КП в течение времени – в процессе работы на клавиатуре КП претерпевает изменения, что также сказывается на работе системы.

Вышеперечисленные недостатки существующих систем распознавания КП усложняют задачу формирования набора уникальных признаков пользователя,

на которые не оказывалось бы никакого влияния. Хотя указанные факторы приводят к ошибкам системы первого рода, ошибки второго рода практически невозможны.

Ошибка первого рода – пропуск события – отказ в доступе легальному пользователю. Ошибка второго рода – ложное срабатывание – допуск в систему заведомо нелегального пользователя. Применительно к системам управления контролем доступа вероятности возникновения ошибок первого и второго рода находятся в обратной зависимости [3]. В целом принцип формирования КП основывается на снятии таких параметров клавиатурного ввода, как длительность нажатия клавиш (ДУК), интервалы между нажатиями клавиш (ИН), наложения нажатий клавиш (НН). Перечисленные параметры собираются в первичную матрицу, из которой в последующем выделяются две: для одиночных нажатий и для нажатий клавиш с наложениями. В каждую матрицу добавляется математическое ожидание ДУК. Таким образом, формируется бимодальное распределение указанных параметров.

Эталоном клавиатурного почерка в таком случае будут две таблицы математических ожиданий ДУК, заполняемых на этапе «Обучения системы» (рис.). В ходе дальнейшей работы система снимает показания с клавиатуры и сравнивает их с эталоном. В случае незначительных расхождений между эталоном и полученными с клавиатуры параметрами, пользователь считается легальным. Эти значения вносятся в общую выборку показателей, производится перерасчет математических ожиданий и вносятся поправки в эталон. Так нивелируется влияние естественных изменений КП на распознавание легальных пользователей. В случае критических расхождений с эталоном, пользователь признается нелегальным, и система блокируется. При подмене авторизованного пользователя система распознавания КП работает практически безотказно, однако изменение психофизического состояния легального пользователя изменяет его КП. Расхождения с эталоном достигают или превосходят критические значения, и система блокируется. В итоге возникает большое количество ошибок первого рода.

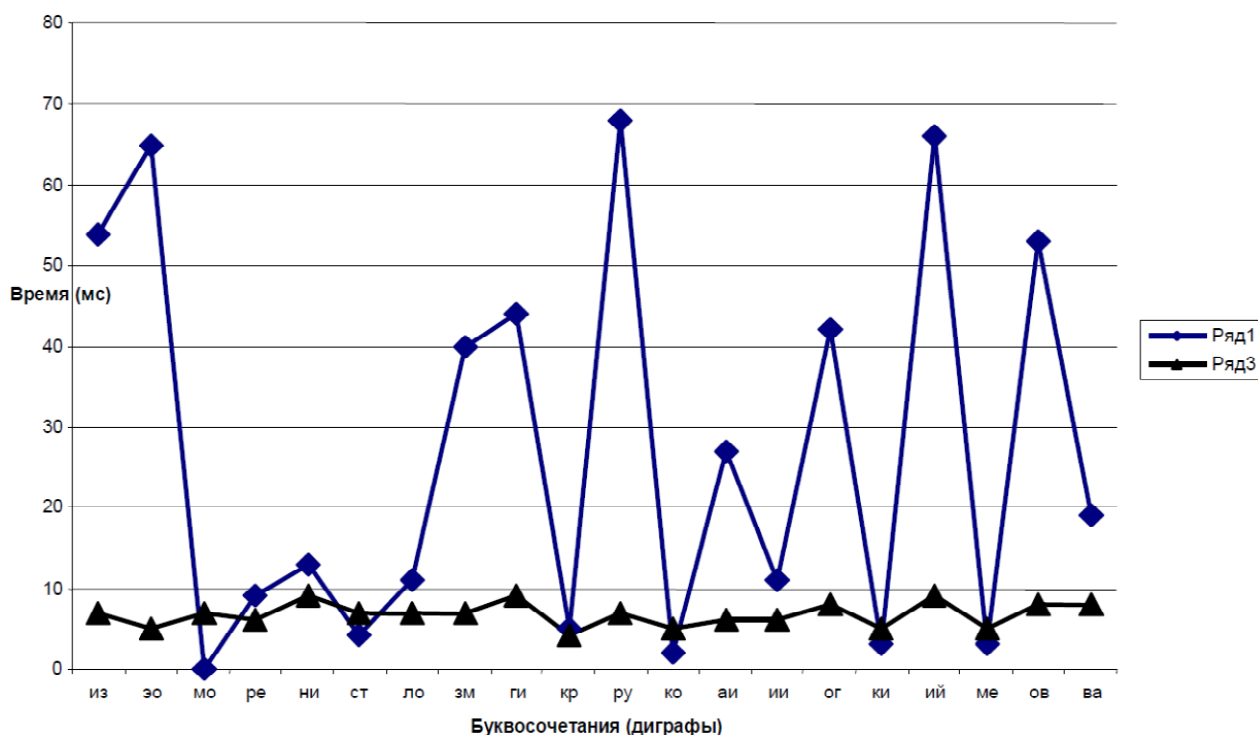


Рис. Биометрический профиль одного пользователя:
 ряд 1 – время между нажатиями клавиши диграфа,
 ряд 3 – время удержания первой клавиши диграфа

Однако при использовании гистограммного метода распознавания КП, на основе показателей ДУК, ИН и НН составляются отдельные матрицы распределений. Учитывая взаимное расположение клавиш на клавиатуре и частоту их нажатий, для матрицы ДУК и ИН составляются трехмерные Гауссовы распределения, а для матрицы НН – двухмерное Гауссово распределение. Взаимное наложение этих распределений позволяет сформировать эталон КП, уникальный для каждого пользователя конкретной компьютерной системы. В процессе обучения системы на основе полученных значений указанных выше параметров система формирует «отпечаток» положения кистей рук относительно клавиатуры (ПКР).

В режиме идентификации пользователя, система создает временный пример КП идентифицируемого пользователя по тому же принципу, что и эталон. Затем сравнивает получившийся «отпечаток» с эталонным. При точном совпадении или совпадении с минимальными различиями пользователь признается легальным и получает доступ к системе. При значительном расхождении полученного примера и эталона, пользователь признается нелегальным и получает отказ в доступе к системе.

Положение кистей рук относительно клавиатуры является устойчивым биометрическим параметром. ПКР – это уникальная характеристика КП для любого пользователя компьютерной системы. ПКР как неотъ-

емляемая характеристика КП является признаком, наименее подверженным влиянию психофизических факторов. Основное влияние на ПКР оказывает конфигурация рабочего места и клавиатуры. Однако у каждой компьютерной системы клавиатура своя, и заменяется, как правило, достаточно редко. Поэтому этот фактор практически не влияет на распознавание легального пользователя.

Литература

1. Сапиев, А. З. Методы анализа компьютерного почерка / А. З. Сапиев // Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения : материалы II Всероссийской научной конференции с международным участием. В 2 частях. Часть 2. – Тольятти, 2019. – С. 262–268.
2. Савинов, А. Н. Анализ решения проблем возникновения ошибок первого и второго рода в системах распознавания клавиатурного почерка / А. Н. Савинов, В. И. Иванов // Вестник Волжского университета имени В.Н. Татищева. Серия: Информатика. – 2011. – Вып. 18. – С. 115–119.
3. Сидоркина, И. Г. Три алгоритма управления доступом к КСИИ на основе распознавания клавиатурного почерка / И. Г. Сидоркина, А. Н. Савинов // Вестник Чувашского университета. – 2011. – № 3. – С. 293–301.

A.Z. Sapiev
Maikop State Technological University

**COMPUTER WRITING STYLE AS A METHOD
FOR IDENTIFICATION OF USERS ON THE NETWORK**

The article is devoted to the identification of network users based on the analysis of computer writing style. A model is formed for the formation of a set of features for identifying users of information systems by computer writing style, as well as identifying users by keyboard writing style. The model is based on the use of fuzzy set theory and probability theory.

Keyboard writing style, computer handwriting, model, identification, feature set.



АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ КОРПОРАТИВНОЙ IP-ТЕЛЕФОНИИ

В статье рассматриваются вопросы построения корпоративных систем связи на базе IP-телефонии, сформированы рекомендации по выполнению этапов их разработки. Использование предложенного алгоритма позволяет ускорить процесс построения работоспособных телекоммуникационных систем, обеспечивающих высокое качество связи и информационную безопасность.

IP-телефония, телекоммуникационные системы, обеспечение безопасности.

Наличие качественной телекоммуникационной связи в современном обществе является необходимостью: успешность предприятия во многом зависит от скорости решения текущих проблем. Компании стараются поддерживать постоянную связь не только со своими сотрудниками, но и с клиентами. И если совсем недавно для обеспечения устанавливались стандартные аналоговые АТС, то сегодня предпочтение отдается проектам на основе IP-телефонии и виртуальным АТС. По прогнозам специалистов рынок IP-телефонии в России в 2021 г. достигнет 14,2 млрд рублей (рис. 1) [1].

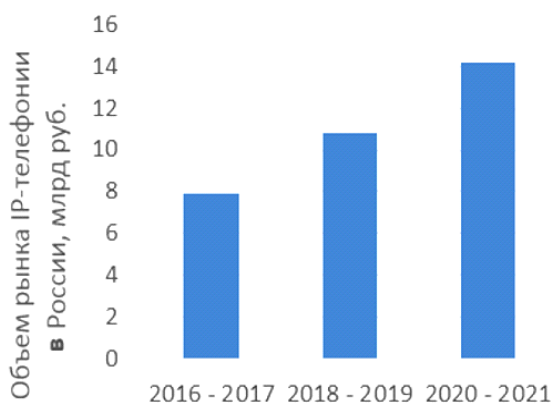


Рис. 1. Изменение рынка IP-телефонии в России с 2016 по 2021 год

Смысл IP-телефонии заключается в транспортировке голосового сигнала по цифровым каналам связи. В связи с этим конечный пользователь получает возможность передавать не только голос, но и данные. Обеспечивается его мобильность даже для аппаратных телефонов. Главным преимуществом IP-телефонии является сравнительно низкая стоимость построения и эксплуатации: меньше капитальные затраты на оборудование и его установку (отпадает необходимость в использовании специализированного оборудования и прокладке телефонных кабелей), сокращаются затраты на администрирование, реальная экономия получается на междугородных и международных телефонных разговорах. В числе других дос-

тоинств IP-систем хорошая масштабируемость телефонной сети, простота инсталляции и обслуживания, организация внутренней телефонной сети компании без выхода в интернет, широкий спектр (без дополнительной оплаты) сервисных функций, таких как идентификация звонящего, запись разговоров, переадресация, режим конференций и т.д.

Недостатками систем IP-телефонии являются зависимость от наличия компьютерной сети, выхода в интернет, стабильности электроснабжения. Например, в случае аварийной ситуации в здании, при отключении электричества невозможно связаться со службой спасения, нельзя определить местоположение звонящего (так как внутри сети назначают «серые» адреса). IP-телефонии свойственны и все проблемы безопасности компьютерных сетей, бывают претензии к качеству связи. Недостатки цифровой связи постепенно устраняются. Производители оборудования создают технологии для повышения надежности передачи пакетов. Разработано множество сервисов, улучшающих качество связи.

Об актуальности темы свидетельствует и множество публикаций, посвященных решению различного рода проблем построения IP-систем. Например, в работах [2–3] рассматриваются вопросы безопасности, в статье [4] описаны особенности работы и настройки оборудования и принципы формирования сигналов IP-телефонии на примере SIP-протокола, методам минимизации задержек передаваемой по IP-сети речи посвящено исследование [5].

Обобщив опыт, изложенный в публикациях, авторы предлагают использовать следующий алгоритм построения корпоративных систем связи на базе IP-телефонии (рис. 2).

Работа над любым проектом начинается с технического задания (ТЗ). Его владелец компании может подготовить самостоятельно, изложив свои потребности и пожелания. Однако если необходимы сравнительно мощные сети, от качества работы которых зависит производственный процесс, составление ТЗ лучше поручить специалистам.

Следует обратить внимание также на тот факт, что часто речь идет не о построении новой телекоммуникационной системы, а о модернизации уже су-

ществующей. Преследуя цель снизить затраты, заказчик заинтересован в том, чтобы существующее качество связи не только не ухудшилось, но и было улучшено. Но качество аналоговой и цифровой связи выражается в разных показателях: если для первой – это количество абонентов, удельная нагрузка с одного абонента, вероятности потерь по вызовам, по нагрузке, по времени, то для второй – это пропускная способность, задержка, вероятность потерь пакетов и т.п. Чтобы поставить четкие требования к проектируемой сети, необходимо воспользоваться методикой пересчета показателей качества традиционной телефонной сети к показателям качества IP-телефонии.

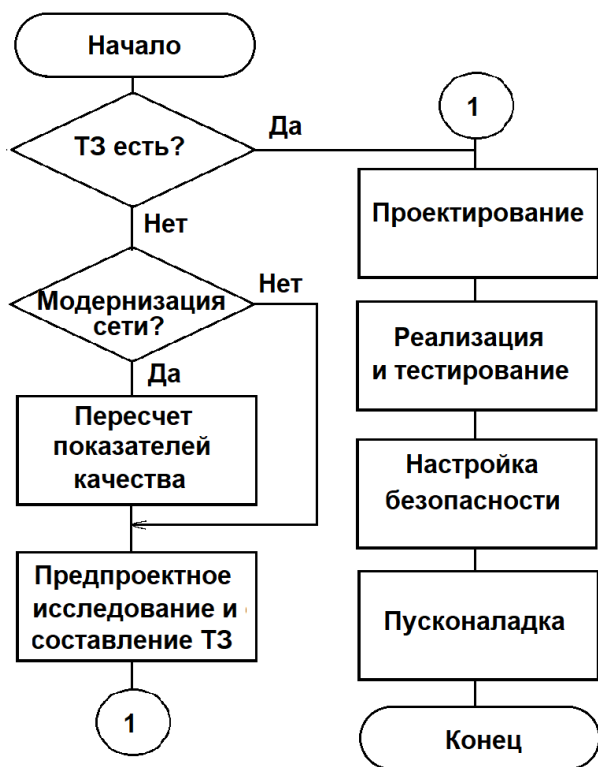


Рис. 2. Алгоритм построения систем связи на базе IP-телефонии

Целью предпроектного обследования является определение требований заказчика к создаваемой системе связи, наличия условий и возможностей для их реализации, стоимости выполнения работ и размера необходимых вложений на приобретение дополнительного оборудования и программного обеспечения. Исследуются функциональные особенности, инфраструктурная составляющая, ключевые характеристики существующей системы телефонии, уточняются вопросы взаимодействия с операторами связи, проверяется возможность подключения существующих внешних линий по протоколу SIP, согласовываются расположение сервера телефонии (в офисе компании или в облачном пространстве) и вариант реализации внутреннего телефонного аппарата. В качестве телефонных аппаратов для сотрудников могут быть выбраны проводной или IP-телефон с радиотрубкой, Софт-фон (программа, устанавливаемая на оснащенный гарнитурой и работающей звуковой картой компьютере), FMC-sim-карта (специфическая sim-карта, способная

принимать звонки от корпоративной АТС внутри страны). Для сбора информации могут применяться специальные бланки, интервьюирование, беседа, натурный эксперимент и другие методы [6]. Предпроектный аудит может проводиться как с выездом на площадку клиента, так и удаленно по телефону или с помощью сервисов видеоконференций. Полученные в ходе предпроектного обследования данные, а также высказанные собственником предложения, требования и пожелания используются при создании ТЗ на разработку телефонии. В ТЗ прописываются требования по надежности системы, сроки реализации проекта, операторы телефонной связи, сетевые настройки для IP-АТС, общие работы, подключения и другие аспекты. Наличие ТЗ является основой для оформления договорных отношений и исключает спорные ситуации при сдаче объекта.

Проектирование может выполняться в два этапа: разработка эскизного и рабочего проекта.

Задача эскизного проекта телефонии – определить объем проектных и монтажных работ для построения IP-системы и примерную стоимость построения сети. В связи с этим он может быть создан параллельно с ТЗ и оформлен в виде приложения к этому документу. В эскизном проекте рассчитывают оптимальную структуру сети, выбирают маршрут прокладки кабельных линий, места монтажа телекоммуникационной инфраструктуры. При выборе оборудования обычно рассматривают три ценовых категории: дешевое оборудование, оптимальное по соотношению цена-качество и оборудование лучших мировых производителей. Возможна также разная техническая реализация: полностью отказаться от имеющегося оборудования, отказаться частично или полностью сохранить (имеющуюся аналоговую АТС использовать в качестве шлюза). Понятно, что все эти факторы влияют на общую стоимость объекта.

В рамках рабочего проекта осуществляется подготовка необходимой документации на построение IP-телефонии на территории заказчика, определяется точная ресурсоемкость (и выбор оборудования) и объем необходимых монтажных работ для устройства коммуникации, а также итоговый бюджет проектирования и установки телефонии. Проверить характеристики спроектированной системы (пропускная способность, ресурсопотребление и др.) позволяют программы моделирования, например [7].

Реализацию проекта начинают с обеспечения базового функционала – возможности через IP-АТС принять и совершить вызов внутри и за пределами офиса. На этом этапе подготавливается сервер, на него устанавливается набор приложений, необходимых для корректной работы системы телефонии, настраивается подключение к оператору связи, внутренний номерной план, логика обработки исходящих вызовов и т.п. После запуска связи команда проекта переходит к реализации остальных пунктов технического задания: интеграции с CRM-системой и сторонними АТС, настройки дополнительных функций.

Обычно настройка безопасности выполняется в ходе реализации и выделена в самостоятельный процесс, чтобы подчеркнуть ее важность. Компьютерные сети всегда являются предметом интереса злоумыш-

ленников. Не исключение и IP-АТС. Обеспечение информационной безопасности осуществляется на уровнях конфигурации, доступа к АТС, настройки брандмауэра, блокирования попыток подключения и подбора пароля, ограничения прав на исходящие вызовы.

В случае удовлетворительных результатов тестирования ключевых настроек, всех функций и безопасности приступают к пусконаладке. В ходе этого этапа осуществляется подключение абонентов, а в случае модернизации – переключение услуг телефонной связи с аналоговой на IP-АТС и подключение новых линий. Обязательно проверяется успешность звонков по всем внутренним линиям, внешних входящих и исходящих звонков с использованием городских, сотовых и междугородних телефонов. Обнаруженные проблемы устраняют. Документация, содержащая параметры созданной системы, инструкции по работе с ней (в том числе документация на управление IP-АТС и использование IP-телефонов), схемы подключений передается заказчику. В соответствии с условиями договора в ходе пусконаладки может осуществляться обучение ИТ-специалиста. Цель – показать системному администратору, как управлять системой, не прибегая к сторонней помощи в вопросах поддержки телефонии. Обучение позволяет экономить время и средства на обслуживании.

После перехода на новую IP-АТС, когда станция функционирует и к ней подключены все планируемые внешние и внутренние линии, составляются и подписываются акты передачи-приемки.

Работы по построению IP-телефонии завершены. Дальнейшие отношения между заказчиком и разработчиком строятся на условиях технической поддержки решения. В рамках обратной связи разработчики получают информацию о работе системы, выполняют необходимые изменения и доработки, дают инструкции по разрешению возникших проблем.

Апробация предложенного алгоритма проводилась путем построения системы компьютерной телефонии на базе свободно распространяемого программного продукта Asterisk [8]. Asterisk поддерживает различные протоколы, может работать практически на любой платформе Linux (и некоторых других операционных системах) и с аналоговыми, и с цифровыми линиями. Открытый исходный код позволяет прописать любые логики маршрутизации, реализовать гибкие настройки связи. С помощью специальных плат Asterisk можно подключить к высокопропускным линиям.

Так как система IP-телефонии создается заново, предусмотренный алгоритмом перерасчет показателей качества не выполнялся. В результате предпроектного обследования было определено минимальное количество внутренних и внешних линий, ограничение по количеству одновременных соединений, логика исходящего и входящего звонка, функциональные особенности, требования к программному обеспечению и операционной системе.

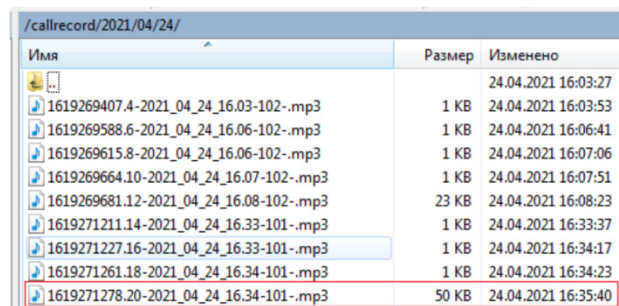
В ходе проектирования выбрана клиент-серверная архитектура телефонной системы, определены основные аппаратные и программные составляющие, разработан алгоритм работы системы. Серверную часть

(Asterisk) решено разместить в облачном пространстве vscale. Для мобильного телефона клиентская часть будет представлена посредством программы «Zoiper», для персонального компьютера – аналогичной по функциональности программой «Jitsi». Для обеспечения удаленного подключения к серверу применим PuTTY – программу-клиент для сетевых протоколов SSH, для просмотра файлов сервера – программу WinSCP.

В процессе реализации после создания сервера в облачном пространстве vscale мы получили требуемые для его подключения параметры. На сервер телефонии было установлено необходимое программное обеспечение, выполнена конфигурация телефонной схемы, созданы и заведены на сервер внутренние номера сотрудников, сделаны необходимые настройки.

Обеспечение безопасности созданной IP-телефонии осуществляется на различных уровнях. На уровне конфигурации Asterisk это делается посредством ведения журналов, в которых фиксируются действия пользователей, и фильтров, позволяющих обнаруживать потенциально опасные события и вычленять их источник (IP-адрес). На уровне обнаружения вторжения применена программа Fail2ban, которая в связке с брандмауэром Iptables и правильно настроенным Asterisk позволяет эффективно заблокировать попытки подключения и подбора пароля.

В ходе тестирования проверялись основные функции: регистрация пользователей, выполнение звонков, ведение журналов и другие. На рисунке 3 представлен фрагмент папки с записями разговоров. При попытке прослушать записи файлы успешно открываются в программе-проигрывателе, качество звука хорошее. Тестирование показало работоспособность системы IP-телефонии.



Имя	Размер	Изменено
1619269407.4-2021_04_24_16.03-102-.mp3	1 KB	24.04.2021 16:03:27
1619269588.6-2021_04_24_16.06-102-.mp3	1 KB	24.04.2021 16:03:53
1619269615.8-2021_04_24_16.06-102-.mp3	1 KB	24.04.2021 16:06:41
1619269664.10-2021_04_24_16.07-102-.mp3	1 KB	24.04.2021 16:07:06
1619269664.10-2021_04_24_16.07-102-.mp3	1 KB	24.04.2021 16:07:51
1619269681.12-2021_04_24_16.08-102-.mp3	23 KB	24.04.2021 16:08:23
1619271211.14-2021_04_24_16.33-101-.mp3	1 KB	24.04.2021 16:33:37
1619271227.16-2021_04_24_16.33-101-.mp3	1 KB	24.04.2021 16:34:17
1619271261.18-2021_04_24_16.34-101-.mp3	1 KB	24.04.2021 16:34:23
1619271278.20-2021_04_24_16.34-101-.mp3	50 KB	24.04.2021 16:35:40

Рис. 3. Запись совершенных звонков

Таким образом, в исследовании сформированы рекомендации по выполнению этапов разработки корпоративных систем связи на базе IP-телефонии. Использование предложенного алгоритма вполне обосновано и позволяет ускорить процесс построения работоспособных телекоммуникационных систем, обеспечивающих высокое качество связи и информационную безопасность.

Литература

1. Анализ рынка IP-телефонии в России. – URL: https://club.cnews.ru/blogs/entry/analiz_rynka_iptelefonii_v_rossii (дата обращения: 11.10.2021). – Текст : электронный.

2. Ковцур, М. М. Методы повышения информационной безопасности IP-телефонии с учетом вероятностно-временных характеристик протоколов распределения ключей : специальность 05.13.19 «Методы и системы защиты информации, информационная безопасность» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / М. М. Ковцур. – Санкт-Петербург : СПИИРАН, 2016. – 20 с.
3. Проблемы защиты речевых сервисов в мультисервисной сети специального назначения / Д. И. Елисеев, Е. А. Савельев, Д. А. Иванов, Н. Б. Ачкасов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 2. – С. 290–300.
4. Савочкин, А. А. Методика исследования голового шлюза CISCO SPA112 системы IP-телефонии / А. А. Савочкин // Modern Science. – 2020. – № 7–2. – С. 385–392.
5. Дерезуцкий, А. С. Особенности резервирования и внедрения приоритизации интернет-трафика в системе администрирования VOIP / А. С. Дерезуцкий // Научный электронный журнал Меридиан. – 2020. – № 3 (37). – С. 456–458.
6. Сергушичева, А. П. Технологии разработки программного обеспечения : учебное пособие / А. П. Сергушичева. – Вологда : ВоГУ, 2019. – 91 с.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020619523 Российская Федерация. Модель функционирования цифровой автоматической телефонной станции с поддержкой IP-телефонии, видео конференцсвязи и передачи сообщений : № 2020618731 : заявл. 06.08.2020 : опублик. 18.08.2020 / О. А. Губская, А. С. Захарченко, С. А. Корягин.
8. Настройка сервера Asterisk. – URL: <https://serveradmin.ru/nastroyka-servera-telefonii-asterisk-s-nulya/> (дата обращения: 20.04.2021). – Текст : электронный.

A.P. Sergushicheva, S.V. Nikulin
Vologda State University

ALGORITHM FOR BUILDING CORPORATE IP-TELEPHONY

The article discusses the issues of building corporate communication systems based on IP-telephony, formulates recommendations for the implementation of their development stages. The use of the proposed algorithm makes it possible to speed up the process of building workable telecommunication systems that provide high quality communication and information security.

IP telephony, telecommunication systems, security.



ЭФФЕКТИВНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ МНОЖЕСТВЕННЫХ ПОЛУПРОЗРАЧНЫХ ОБЪЕКТОВ В 3D-ГРАФИКЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

В данной статье рассмотрены наиболее проблемные случаи визуализации полупрозрачных объектов, а также описаны алгоритмы и их комбинации, позволяющие эффективно выполнить визуализацию в таких случаях.

3D-графика реального времени, прозрачность без упорядочивания, система частиц, blending state, видеокарта, Direct3D.

Полупрозрачные объекты и эффекты повсеместно встречаются в окружающей действительности, а это значит, что и в трехмерной графике сложно без них обойтись. Более того, эффект прозрачности зачастую помогает добиться большей наглядности при представлении различных моделей. Вместе с этим из-за аппаратно-программной специфики визуализация прозрачных объектов, а в особенности большого их количества с наложением друг на друга, является проблематичной как в плане достижения высокой эффективности, так и в плане получения корректного результата.

На сегодняшний день в трехмерной компьютерной графике в реальном времени для визуализации применяется единый алгоритм графического конвейера (Rendering Pipeline), который устанавливает перечень стадий визуализации, их порядок, типы входных и выходных данных и доступных ресурсов для каждой стадии и т.д.

На программном уровне, в частности на уровне прикладного программирования, имеются специальные графические API (например, Direct3D или OpenGL), позволяющие программировать работу графического конвейера на видеокarte с последующим его вызовом – draw call'ом. На аппаратном же уровне конвейер поддерживается архитектурой видеокарт, спроектированной специально для эффективной визуализации графики.

Поэтому для достижения максимальной эффективности при визуализации нужно стараться, чтобы вычисления производились на видеокarte, а не на центральном процессоре.

Общий принцип работы конвейера следующий: на основе геометрического описания объектов сцены (координаты их вершин в трехмерном пространстве) по результатам обработки готовое двухмерное изображение выводится на экран. Отдельную сложность для такой визуализации в силу ее специфики могут представлять явления или объекты, не обладающие строго определенной формой, поведением и имеющие некоторую степень прозрачности (например, облака, дым, стекла, огонь, взрывы, струи жидкости), которые тем не менее можно встретить практически повсеместно, а значит, для воссоздания огромного количества сцен

реального мира просто необходимо иметь возможность эффективной визуализации подобных эффектов.

Таким образом, главной целью будет нахождение метода визуализации эффектов такого типа средствами одной лишь видеокарты, с минимальным количеством вызовов конвейера.

В ходе достижения цели необходимо будет решить задачи, связанные с изучением необходимых в данном случае возможностей современных графических API, с рассмотрением и выбором имеющихся алгоритмов и техник, полезных для решения данной проблемы, а также с объединением и адаптацией суммы определенных техник к практическому применению с использованием одного графического API – Direct3D 11.0.

Система частиц (Particle System)

В трехмерной графике объекты или явления, не имеющие строго predetermined формы, принято представлять в качестве так называемой системы частиц (Particle System) – коллекции из ограниченного числа атомарных элементов (частиц), имеющих между собой схожее поведение, но с добавлением в него некоторой доли случайности.

Для имитации эффектов типа огня или дождя эти частицы на каждом кадре визуализации нужно перемещать согласно поведению реализуемого эффекта. Перемещение частиц можно рассчитывать различными способами. В простейшем случае, если имитируется движение с постоянным ускорением, можно воспользоваться выражением из физики:

$$a(t) = v'(t) = p''(t);$$

$$p(t) = \int v(t)dt = \int (ta + v_0)dt = \frac{1}{2}t^2a + tv_0 + p_0.$$

Таким образом, зная начальную позицию, скорость и ускорение, можно определить позицию частицы в любой момент времени. Элемент же случайности в движении частиц вносится добавлением к этим начальным величинам случайных значений.

После смещения частиц нужно обработать их соответствующим образом при помощи конвейера визуализации. При визуализации системы частиц отдельные частицы представляют и передают на конвейер в виде отдельных точек (в Direct3D 11 – это топология примитивов).

тивов «D3D11_PRIMITIVE_TOPOLOGY_POINTLIST»). Так можно легко рассчитывать перемещение частиц, но точки сами по себе не годятся для визуализации. Поэтому на стадии геометрического шейдера будет производиться развертывание точек в прямоугольники, всегда повернутые в сторону камеры (позиции наблюдения сцены). Чтобы правильно выполнить такое развертывание, нужно знать положение системы координат каждого такого прямоугольника относительно мировой системы координат сцены на каждом кадре. Такую систему координат (x, y, z) можно построить с помощью векторных вычислений, зная позицию камеры (E), позицию точки-частицы (C), а также значение вектора, смотрящего вверх (j):

$$z = \frac{E-C}{\|E-C\|}$$

$$x = \frac{j \times z}{\|j \times z\|}$$

$$y = z \times x.$$

После этого полученные прямоугольники попадают на пиксельный шейдер, где на них накладываются текстуры, соответствующие визуализируемому эффекту (например, изображения клубов дыма или языков пламени).

Система частиц, реализуемая средствами видеокарты (GPU-based Particle System)

Самым простым с точки зрения реализации способом обработки системы частиц является подход [1], где на каждом кадре коллекция частиц (в виде точек) считывается в оперативную память (ОП) из динамического буфера вершин, далее на центральном процессоре (ЦП) производится создание, перемещение или удаление частиц исходя из прошедшего времени или других условий. После обновления частицы снова загружаются в буфер вершин и подаются на конвейер визуализации, где производится их развертывание в прямоугольник, наложение текстур и другие необходимые для визуализации действия.

Главным недостатком такого подхода являются потери производительности [1]. Во-первых, при использовании динамического буфера вершин происходит передача данных с видеокарты (ГП) на центральный процессор и обратно, а такой обмен данными является наиболее медленным по сравнению с передачей ЦП-ОП и ГП-VRAM. Во-вторых, для обновления системы частиц используются вычислительные мощности ЦП, хотя эту работу разумнее переложить на видеокарту, архитектура которой гораздо лучше подходит для параллельных вычислений.

Более эффективным будет подход с реализацией обработки системы частиц полностью на видеокарте (GPU-based Particle System) [1], но в таком случае непременно потребуется несколько вызовов конвейера визуализации, выполняющих разные действия. Здесь нужно остановиться, чтобы понять, как по-разному вызывать конвейер. Разные шейдеры (вершинные, пиксельные и т.д.) вместе со вспомогательными временными записываются в исходном файле эффектов (.fx). Там же содержится так называемые pass'ы, служащие для объединения наборов шейдеров в рамках одного draw call'a. Таким образом, имея разные pass'ы, можно, обращаясь к ним по именам, вызывать конвейер по-разному.

Тогда основная логика для обработки частиц будет такой:

- установить буфер вершин с частицами с топологией point-list на вход конвейера и выполнить вызов конвейера визуализации (draw call) с pass'ом, реализующим только лишь вычисления, связанные с обновлением частиц в буфере вершин без, непосредственно, визуализации;
- установить обновленный буфер вершин с частицами на вход конвейера и выполнить draw call с другим pass'ом, производящим саму визуализацию обновленных частиц.

С подобным способом реализации связано несколько трудностей, но современные графические API имеют средства [1], позволяющие воплотить такой алгоритм.

Во-первых, при первом вызове конвейера нам необходимо обновить содержимое буфера вершин и вывести его без визуализации, так как и логика обновления системы частиц и логика развертывания точек в прямоугольник может быть реализована только в геометрическом шейдере (а несколько шейдеров одной стадии не может быть в рамках одного вызова конвейера). Для этого, начиная с Direct3D 10, была добавлена возможность stream-out, то есть вывода вершин после стадии геометрического шейдера в новый буфер, назначенный для этой роли. При создании такого буфера у него должен быть установлен bind-flag «D3D11_BIND_STREAM_OUTPUT».

Во-вторых, по умолчанию после stream-out'a вершины, выведенные в буфер, все равно будут передаваться на следующую стадию конвейера. Чтобы этого не было, нужно отключить растеризацию. Производится это путем установки пустого пиксельного шейдера и отключения проверки глубины в depth-stencil state.

В-третьих, после обновления вершин и вывода их в буфер в первом pass'e мы не будем знать, сколько в итоге вершин будет находиться в буфере (если, конечно, не использовать динамический буфер, но это сильно снизит производительность). При этом для вызова конвейера всегда необходимо указывать количество исходных вершин или индексов. К счастью, вместе с вводом stream-out был добавлен специальный вызов конвейера – DrawAuto, позволяющий вызвать конвейер для тех вершин всех, которые до этого были выведены в stream-out буфер. Отслеживание количества вершин в таком (и только в таком) случае перекладывается на Direct3D.

И в-четвертых, в Direct3D один и тот же буфер не может одновременно быть задан и как буфер входных вершин, и как буфер для stream-out. Данную проблему решит попеременное использование двух буферов.

Проблемы с прозрачностью: ROP, blending

После того, как все прямоугольники частиц прошли пиксельный шейдер, они попадают на финальную стадию визуализации – output merger. На данной стадии производятся так называемые растровые операции – Raster Operations Pipeline (ROP) [2]. Здесь, в частности, производится проверка глубины (depth buffering) полученных пикселей с отбрасыванием более «глубоких», перекрытых более близкими пикселями, а также смешивание цветов пикселей (blending).

Суть *blending*'а состоит в следующем: для каждого пикселя, полученного в результате работы пиксельного шейдера, производится смешивание его цвета с цветом соответствующего пикселя в буфере кадров по формуле:

$$C = C_{src} * F_{src} + C_{dst} * F_{dst},$$

где C – векторы цветов формата RGBA; F – факторы или сомножители; *src* (*source*) – текущий визуализируемый пиксель, *dst* (*destination*) – пиксель в буфере кадров.

Параметры вычисления по этой формуле задаются в *blending state*'ax – COM-интерфейсах *Direct3D*, являющихся одним из видов *render state*'ов или состояний визуализации.

При визуализации прозрачных объектов при смешивании применяется так называемый *alpha-blending* [1], он же *OVER operator*: в качестве F_{src} используется значение альфа-канала визуализируемого пикселя (т.е. степень его непрозрачности), в качестве же F_{dst} – единица минус степень непрозрачности визуализируемого пикселя. При такой визуализации для получения правильного изображения необходимо, чтобы прозрачные объекты рисовались в порядке от самого дальнего к самому ближнему, ведь только тогда исходное значение C_{dst} при смешивании с очередной прозрачной поверхностью будет верным.

В свою очередь, *raster operations pipeline* принудительно выполняет операции *output merger*'а для пикселей в том порядке, в котором соответствующая им геометрия была записана в буфер вершин [3]. Таким образом, при визуализации системы частиц, элементы которой представляют собой полупрозрачные объекты (например, клубы дыма), более новые, то есть более поздно добавленные в буфер частицы будут всегда отображаться поверх более старых, что в конечном итоге для многих ракурсов дает некорректное изображение.

Weighted blended order-independent transparency (OIT)

Самое очевидное решение этой проблемы – сортировка частиц и упорядочивание их в буфере в порядке «от дальних – к ближним», но такой подход приведет к увеличению количества вызовов конвейера и необходимости выполнения сортировки на центральном процессоре, что сильно скажется на эффективности.

На сегодняшний день уже существует несколько методов, позволяющих упростить вычисления в такой ситуации, избавившись от сортировки (*order-independent transparency*, *OIT*) [4], но наилучшим образом сочетающим эффективность и корректность визуализации является относительно новый метод под названием «*weighted, blended order-independent transparency*», что можно перевести как «независимая от порядка прозрачность с использованием весовых значений и смешивания».

Основная идея данного метода и ему подобных заключается в том, что, одновременно приняв полупрозрачные объекты, переданные в произвольном порядке, можно, взяв из них некоторые значения и проведя на основе их вычисления, получить результат хоть и не идентичный, но близкий к тому, который

мог бы быть получен при обработке отсортированного набора объектов.

В частности, в *weighted, blended OIT* для сбора нужных значений используются две текстуры. Первая (*accumulation*) накапливает в своих пикселях непрозрачные составляющие цветов всех визуализируемых неотсортированных частиц, помноженные на «вес» каждой, зависящий от того, насколько далеко находится та или иная частица от зрителя. Таким образом, если в наборе частиц имеется темная частица, которая при наличии сортировки была бы сзади, но из-за ее отсутствия рисуется перед светлой частицей, перекрывая тем самым ее цвет, то это перекрытие будет скомпенсировано значением «веса».

Вторая (*revealage*) – ее пиксели накапливают степень непрозрачности (*alpha*) каждой визуализирующейся частицы из несортированного набора частиц. То есть если, например, некие две частицы покрывают один и тот же пиксель, то *alpha* для этого пикселя будет рассчитываться дважды, при этом во второй раз будет редактироваться значение непрозрачности, полученное в результате вычислений для первой частицы.

Далее, когда эти текстуры заполнены, значения из них используются для итоговой визуализации эффекта, изображаемого системой частиц: значения цветов пикселей из текстуры *accumulation* берутся, собственно, как цвета эффекта, визуализируемого системой частиц, а значения из текстуры *revealage* – как значения непрозрачности результирующего эффекта в разных его участках.

Формулы и более подробное описание идеи алгоритма приведены в [5]. Что же касается реализации, то последовательность ее применительно к системе частиц такова:

- произвести визуализацию всех непрозрачных объектов (если есть);
- вызвать *pass*, осуществляющий обновление системы частиц;
- вызвать *3D-transparency pass*, выполняющий аккумуляцию прозрачности по формуле в дополнительные текстуры (*render target*'ы);
- вызвать *2D-composing pass*, где происходит объединение содержимого дополнительных *render target*'ов.

3D-transparency pass, выполняющий аккумуляцию и запись в два вспомогательных буфера кадров, принимает прозрачные объекты в любом порядке без сортировки. Соответственно, для него необходимо создать две дополнительные текстуры и установить их перед его вызовом в качестве *render target*'ов. Для этого вызова должен быть установлен *depth state*, выполняющий отбрасывание перекрытых более близкими объектами фрагментов, но не перезаписывающий значения буфера глубины.

Помимо него, для записи правильных значений в дополнительные *render target*'ы должны быть выставлены *blending state*'ы для этих буферов, как показано в таблице 1 («*r*» – цвета фрагментов частиц, «*a*» – степень непрозрачности фрагментов частиц).

Blending state для 3D-transparency pass в Weighted blended OIT

render target	формат текстуры D3D	начальное значение RGBA	F _{src}	F _{dst}	C _{src}
accum	DXGI_FORMAT_R16G16B16A16_FLOAT	(0,0,0,0)	BLEND_ONE	BLEND_ONE	(r*a, g*a, b*a, a) * w
revealage	DXGI_FORMAT_R8_UNORM	(1,0,0,0)	BLEND_ZERO	BLEND_INVSRC_COLOR	a

Здесь w – весовое значение, полученное на основе глубины конкретного визуализируемого пикселя. Формула его вычисления в пиксельном шейдере имеет примерно такой вид [5]:

$$w = \text{clamp}(\text{pow}(\min(1.0, \text{color.a} * 10.0) + 0.01, 3.0) * 1e8 * \text{pow}(1.0 - \text{pin.PosH.z} * 0.9, 3.0), 1e-2, 3e3).$$

Blending state для 2D-composing pass в Weighted blended OIT

render target	формат текстуры D3D	F _{src}	F _{dst}	C _{src}
frame buffer	DXGI_FORMAT_R8G8B8A8_UNORM	BLEND_SRC_ALPHA	BLEND_INV_SRC_ALPHA	(accum.rgb / max(accum.a, 0.0001), 1 - revealage)

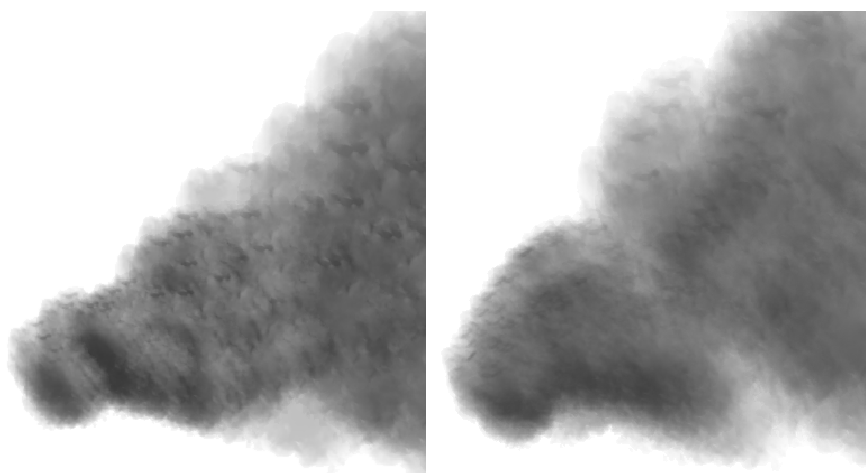


Рис. 1. Сравнение визуализации системы частиц: визуализация с простым alpha blending (слева) и с weighted blended OIT (справа)

Particles Demo	FPS: 1070	Frame Time: 0.934579 (ms)
Particles Demo	FPS: 845	Frame Time: 1.18343 (ms)

Рис. 2. Сравнение кадровой частоты при визуализации: с простым alpha blending (сверху) и с weighted blended OIT (снизу)

2D composing pass представляет собой визуализацию полноэкранный прямоугольника, на который накладываются пиксели, полученные при совмещении цветов пикселей из двух ранее заполненных текстур, служивших render target'ами. После производится смешивание записанных в этот полноэкранный прямоугольник цветов с текущим содержимым буфера кадров. Параметры blending state'a приведены в таблице 2.

На рисунках 1, 2 приведен результат визуализации системы полупрозрачных частиц, имитирующих дым с освещением на основе карт нормалей сначала с простым alpha blending'ом, затем – с использованием метода weighted blended OIT. При сравнении отчетливо видно, что в первом случае из-за особенностей механизма ROP более новые частицы помещаются в конец буфера и визуализируются в последнюю очередь, перекрывая все про-

чие частицы и создавая тем самым неправдоподобное изображение.

Weighted blended OIT исправляет эти дефекты и дает результат, близкий к тому, который мог бы быть получен при применении alpha blending над отсортированными частицами. Также стоит отметить, что все вычисления, проводимые в данном методе, выполняются на видеокарте, сочетаются с подходом к реализации системы частиц типа «GPU-based particle system» и при этом требуется всего лишь 1 лишний вызов конвейера и 2 чтения из текстур.

Colored blended order-independent transparency (OIT)

Предыдущий описанный метод, несмотря на все его достоинства, не может в неизменном виде применяться для визуализации абсолютно любых полупрозрачных объектов и эффектов. Конкретно это касается объектов, окрашенных в любой цвет, кроме серого [6]. Например: окрашенные жидкости или цветные стекла.

Чтобы объяснить суть проблемы, нужно раскрыть следующие понятия [6]:

- transmittance | transmission – это значение, описывающее свет, а конкретно – его RGB-составляющие, пробивающиеся сзади через полупрозрачную (возможно, окрашенную) поверхность;
- reflectivity – это RGB-значение света, отраженного непосредственно от внешней, самой передней поверхности.

В случае с визуализацией полупрозрачных объектов значение reflectivity будет отображать цвет непосредственно полупрозрачного тела, а transmittance – цвет фона за полупрозрачным объектом, получаемый при прохождении сквозь него.

Таким образом, недостаток визуализации, где учитывается только reflectivity (как в weighted blended OIT) будет в том, что полупрозрачный объект на любом фоне окрашивается всегда одинаково,

так как расчет цвет объекта производится только на основе reflectivity, а значит – без учета фона. При учете же значения transmission в визуализации полупрозрачный объект будет всегда окрашиваться по-разному, в зависимости от того, какого цвета объект находится за ним и, соответственно, какой цвет будет пропускать через себя полупрозрачный объект, а какой – не будет. Таким образом, полупрозрачные объекты будут пропускать или поглощать только определенные цвета из меняющегося фона, что в итоге может сильно отразиться на их конечном виде.

Colored blended OIT – это модификация метода weighted blended OIT, где реализован учет значения transmission при расчете цветов полупрозрачных объектов. В основе визуализации все также лежит два pass'а – 3D-transparency pass и 2D-composing pass – и все тот же порядок визуализации – сперва все непрозрачные объекты, после – объекты с прозрачностью.

Отличие 3D-transparency pass в том, что здесь для учета transmission будет использоваться текстура с уже отображенными на ней всеми непрозрачными объектами. Для пикселей этой текстуры, на которые попадает полупрозрачный объект, будет производиться корректировка цветов с учетом того, какова степень прозрачности этого объекта и каков цвет самого фона. Blending state'ы и операции с цветами приведены в таблице 3.

2D-composing pass отличается прежде всего тем, что здесь цвета пикселей back buffer'а уже отредактированы для учета transmission, а это значит, что вместо смешивания по принципу alpha-blending, здесь будет достаточно простого сложения цветов эффекта, полученного с помощью системы частиц и цветов back buffer'а. Параметры blending state'a представлены в таблице 4.

Таблица 3

Blending state для 3D-transparency pass в Colored blended OIT

render target	формат текстуры D3D	начальное значение RGBA	F _{src}	F _{dst}	C _{src}
accum	DXGI_FORMAT_R16G16B16A16_FLOAT	(0,0,0,0)	BLEND_ONE	BLEND_ONE	(r*a, g*a, b*a, a) * w
revealage	DXGI_FORMAT_R8_UNORM	(1,0,0,0)	BLEND_ZERO	BLEND_INVSRC_COLOR	a
color	DXGI_FORMAT_R8G8B8A8_UNORM	-	BLEND_ZERO	BLEND_INVSRC_COLOR	a * (1 - t.rgb)

Таблица 4

Blending state для 2D-composing pass в Colored blended OIT

render target	формат текстуры D3D	F _{src}	F _{dst}	C _{src}
frame buffer	DXGI_FORMAT_R8G8B8A8_UNORM	BLEND_INV_SRC_ALPHA	BLEND_ONE	(accum.rgb / max(accum.a, 0.0001), 1 - revealage)

Другие случаи применения алгоритмов OIT; hardware instancing

Помимо систем частиц, другим частым случаем, в котором могут найти применение алгоритмы по типу colored blended OIT, является визуализация большого числа одинаковых полупрозрачных трехмерных объектов на сцене (например, осколки стекла, стеклянная посуда и тому подобное). Для такой ситуации необходимо упомянуть о технике инстанцирования (instancing), а также о возможностях современных графических API в ее аппаратной реализации. Изначальный смысл инстанцирования заключается в том, что при наличии множества идентичных объектов на сцене, визуализировать их наиболее разумно вместе, не переключаясь на визуализацию других объектов. Так, будет достаточно одной копии повторяющегося объекта в буфере вершин и индексов, а меняться будут только матрицы позиционирования объектов на сцене. Результат – экономия памяти.

Но с большим количеством (одинаковых) объектов связана и другая проблема – для визуализации каждого из них необходим отдельный вызов конвейера визуализации, а это также может привести к нежелательным потерям в эффективности. Для устранения этого недостатка в графических API Direct3D, начиная с Direct3D 10, был введен механизм аппаратного инстанцирования (hardware instancing), при помощи которого можно выполнять визуализацию большого количества одинаковых объектов в одном вызове конвейера. Реализуется данный механизм посредством установки в качестве буфера вершин дополнительного буфера с данными каждого из множества одинаковых объектов (например, с матрицами размещения), а также с помощью специальной команды вызова конвейера для данного случая – «DrawIndexedInstanced». Более подробное описание механизма hardware instancing дано в [1].

Таким образом, в результате исследования был составлен обзор случаев, где в визуализации участвуют полупрозрачные объекты; найдены методы (GPU-based particle system, weighted blended OIT, colored blended OIT, hardware instancing), позволяющие в своем сочетании эффективно реализовать систему полупрозрачных частиц или множество идентичных трехмерных объектов для визуализации различных явлений действительности. Было произведено применение некоторых подходов в тестовой программе с использованием API Direct3D 11.0 и тем самым доказана их применимость и сочетаемость.

Литература

1. Luna F. Introduction to 3D game programming with DirectX® 11 – Dulles ; Boston, 2012. – P. 548–556.
2. GPU Gems. Chapter 28. Graphics Pipeline Performance | NVIDIA Developer. – URL : <https://developer.nvidia.com/gpugems/gpugems/part-v-performance-and-practicalities/chapter-28-graphics-pipeline-performance> (дата обращения: 25.10.2021). – Text : Electronic.
3. Rasterizer Order Views 101: a Primer. – URL : <https://software.intel.com/content/www/us/en/develop/articles/rasterizer-order-views-101-a-primer.html> (дата обращения: 25.10.2021). – Text : Electronic.
4. LearnOpenGL – Weighted Blended. – URL : <https://learnopengl.com/Guest-Articles/2020/OIT/Weighted-Blended> (дата обращения: 25.10.2021). – Text : Electronic.
5. Casual Effects: Implementing Weighted, Blended Order-Independent Transparency. – URL : <http://casual-effects.blogspot.com/2015/03/implemented-weighted-blended-order.html>(дата обращения: 25.10.2021). – Text : Electronic.
6. Casual Effects: Fast Colored Transparency. – URL : <http://casual-effects.blogspot.com/2015/03/colored-blended-order-independent.html> (дата обращения: 25.10.2021). – Text : Electronic.

*A.A. Sukonshchikov, V.V. Kruglov
Vologda State University*

EFFECTIVE RENDERING OF MULTIPLE TRANSPARENT OBJECTS IN REALTIME 3D GRAPHICS

The article deals with the most difficult cases of rendering of transparent objects. It also describes the algorithms and their combinations that allows to make rendering effectively in such cases.

Real-time 3D graphics, order-independent transparency (OIT), particle system, blending state, GPU, Direct3D.



Н.В. Михалевич, Е.Н. Шахова
Вологодский государственный университет

К ВОПРОСУ О ПРИЧИНАХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ РАДИОМАЧТ

В статье рассмотрены причины повреждений железобетонных радиомачт при длительной эксплуатации, произведена оценка технического состояния наземной и заглубленной частей радиомачт.

Железобетонные мачты, причины повреждений.

В XX веке радиовещание составляло одну из важных жизненных отраслей, особенно в малых населенных пунктах. В качестве несущей конструкцией радиомачт для обеспечения радиосигнала на небольшой территории обычно использовались железобетонные опоры. Аналогичные несущие конструкции используются для опор ВАС (высоковольтные сети) и ПВ (проводное вещание), а эксплуатация возведенных опор продолжается и в настоящее время.

Основные причины повреждения несущих конструкций можно разделить на 4 группы:

- воздействие внешних факторов (природных или искусственных);
- воздействие технологических факторов;
- проявление дефектов проектирования и строительства;
- нарушение режима эксплуатации.

Строительные конструкции обследуемого сооружения в общем случае могут быть подвержены физическим, химическим, биологическим и специальным воздействиям. Очень часто причиной повреждений и аварийных ситуаций является отсутствие учета некоторых реальных воздействий на стадии проектирования конструкций или отступление от нормальных условий эксплуатации сооружения. В связи с этим при обследовании обязательным является определение параметров реальных нагрузок и воздействий и сопоставление полученных результатов с данными, указанными в документации.

Основанием для инженерно-конструкторского обследования инженерного сооружения из трех железобетонных радиомачт (Вологодский р-н, с. Молочное, ул. Советская, д. 13) являлся заказ Федерального государственного унитарного предприятия «Российская телевизионная и радиовещательная сеть (РТРС)», филиал РТРС «Вологодский ОРТПЦ». Основной причиной обследования являлось наличие значительного крена.

Целью обследования инженерного сооружения из трех железобетонных радиомачт являлась оценка тех-

нического состояния, степени износа и надежности конструкций объекта, возведенных в 1981 году со сроком эксплуатации 40 лет. Основные характеристики несущих конструкции сооружения представляют три железобетонных столба высотой по 26 метров с диаметром у основания 0,6 м. Расположение сооружения представлено на рисунке 1.

Объект обследования представляет собой надземное инженерное сооружение из трех высоких отдельно стоящих железобетонных радиомачт. Оно относится к классу КС-2, имеет срок службы не менее 50 лет [1] и первую степень огнестойкости (табл. 21 [2]).

Мачты исполнены по чертежам типовых серий 3.407.1-152 вып. 3 и 3.407.1-175 вып. 3 в соответствии с ГОСТ 22687.0 и ГОСТ 22687.1.

Радиоантенны объекта в настоящее время разобраны.

Климатические условия территории определялись для строительно-климатического района II В и в целом оценены как слабоагрессивные, поэтому причины первой группы можно исключить.

Воздействия технологических факторов на несущие конструкции в виде механических воздействий, ударов, вибрации отсутствовали, таким образом, вторая группа причин не влияет на повреждения радиомачт.

Проявление дефектов третьей группы проявилось на стадии проектирования при выборе фундамента. Для того чтобы эксплуатация опор была максимально длительной, бесперебойной, важна правильная установка фундаментов, которые будут устойчивы к нагрузке. Если фундамент будет выбран некорректно, сократится эксплуатационный ресурс опор, повысится вероятность их падения при сильных порывах ветра и появление ненормативных кренов.

Фундаменты мачт столбчатые железобетонные на естественном основании. В качестве фундамента была использована прямостоячая опора: для ее устройства бурили в грунте отверстия, а фиксация опоры осуществлялась с помощью бетонного раствора (рис. 2).

При проектировании отсутствовала фундаментная плита, которая повысила бы надежность несущей

конструкции, но в тоже время привела к удорожанию работ.

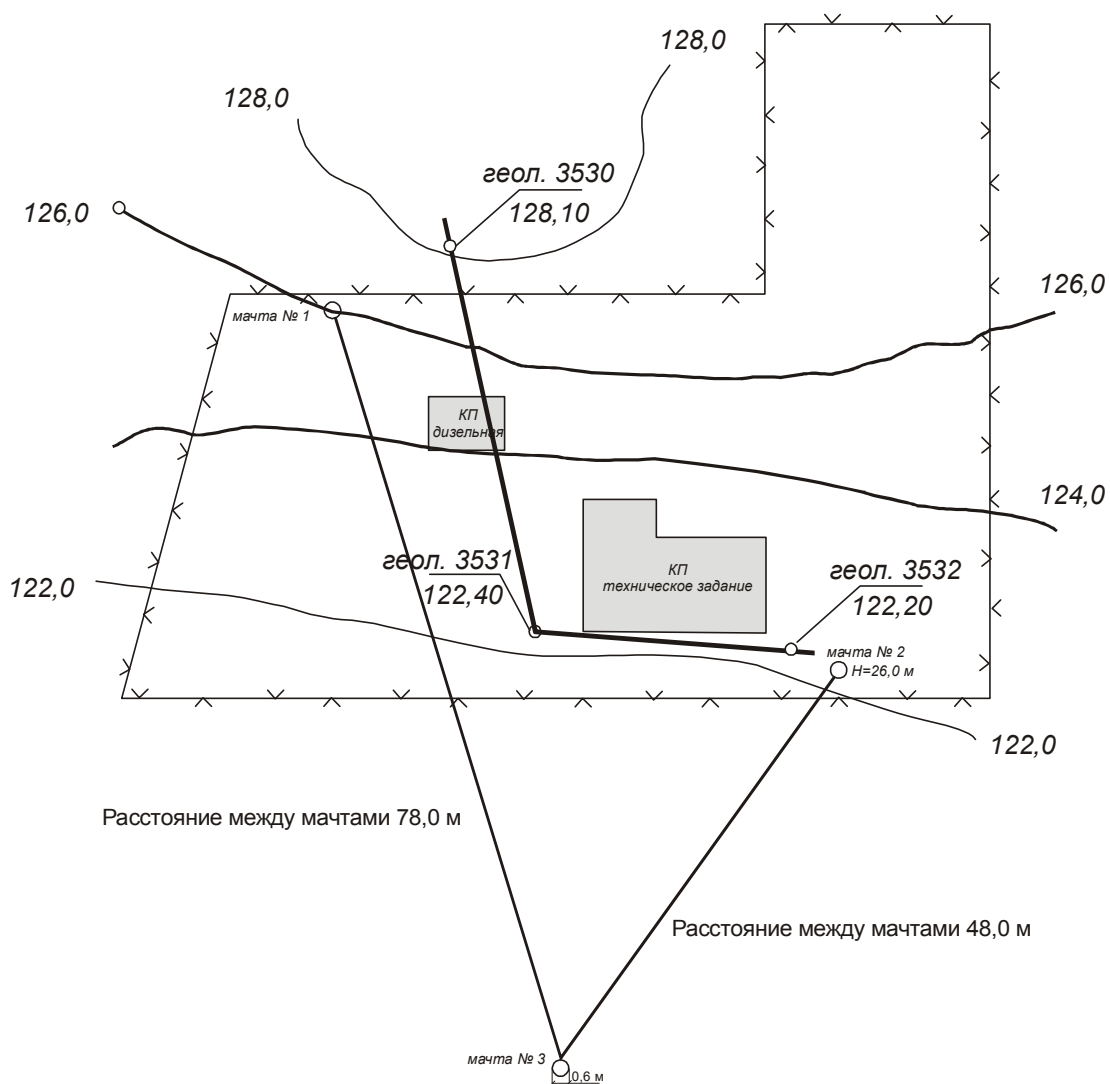


Рис. 1. Расположение инженерного оборудования

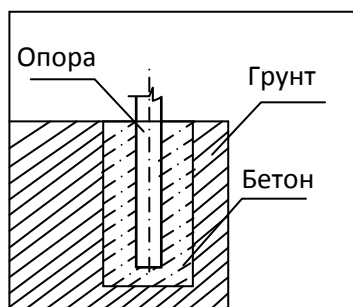


Рис. 2. Фундамент для прямостоячной опоры

Рельеф местности пересеченный, искусственно спланированный. Основание в целом характеризуем как относительно благоприятное для рассматриваемого инженерного сооружения.

В геологическом строении территории принимают участие:

- ИГЭ-1 – техногенные насыпные суглинистые грунты с включениями строительного мусора; толщина слоя от 0 до 2,5 м; эти грунты непригодны в качестве естественного основания фундаментов;

- ИГЭ-2 – озерно-аллювиальные пластичные бурые супеси с модулем деформации 24 МПа; относятся

к среднепучинистым; толщина слоя переменна: от 0 до 1,1 м.

- ИГЭ-3 – плотные бурые полутвердые моренные суглинки с модулем деформации 34 МПа; залегают с глубин 1,7...2,5 м.

Характеристики грунтов приняты по скважинам 3530, 3531 и 3532, показанным на рисунке 1.

Грунты деятельного слоя относятся к среднепучинистым. Нормативная глубина промерзания суглинков в Вологде на открытой территории равна 150 см. По таблице Б.27 [3] степень пучинистости таких грунтов составляет от 7 до 10 %. Это значит, что при промерзании грунта на 100 см его поверхность поднимается на 7...10 см.

Подземные воды приурочены к супесям и кровле морены. Установившиеся уровни зафиксированы на глубинах 1,6...2,4 м. Воды слабоагрессивны по отношению к бетону нормальной плотности. Движение вод происходит по склону в сторону р. Вологды. Наиболее неблагоприятны периоды паводков (апрель – май), когда уровень вод может быть на глубине 0,5 м. Минимальные уровни фиксируются в феврале – марте и июле – августе рассматриваемого инженерного сооружения. При анализе расположения слоев грунта прослеживается наклонное их положение, что создает дополнительное давление на заглубленную часть радиомачт. Глубина заложения столбчатых фундаментов мачт на надежные полутвердые моренные суглинки с модулем деформации 34 МПа должна превышать 1,7...2,5 м.

Каждый из фундаментов рассматриваемого объекта испытывает следующие воздействия:

- постоянные вертикальные нагрузки от собственного веса, веса мачт и радиоантенн;
- временные горизонтальные разнонаправленные нагрузки от ветра;
- постоянные горизонтальные нагрузки от натяжения радиоантенн;
- длительное оседание грунтов основания;
- сезонные процессы морозного пучения при промерзании грунтов основания осенью – зимой и их просадок при оттаивании весной – летом. Промораживание грунтов происходит в течение всех 40 лет существования мачт.

Особенности деформаций пучения:

- а) все они неравномерны;
- б) они накапливаются с годами;
- в) фундаменты мачт испытывают еще и повороты;
- г) в Вологде полное оттаивание грунтов происходит летом около 1 июля. Вследствие действия перечисленных факторов деформации оснований мачт крайне неравномерны.

Отмостка отсутствует.

При проектировании каждой из мачт учитывались следующие воздействия:

- постоянные вертикальные нагрузки от собственного веса и веса радиоантенн;
- временные горизонтальные разнонаправленные нагрузки от ветра;
- постоянные горизонтальные нагрузки от натяжения радиоантенн.

При расчете не были учтены горизонтальные усилия давления грунта вследствие перепада высотных отметок и наклонного расположения слоев грунта.

При обследовании наземной части мачт проводились испытания бетона мачт электронным измерителем прочности ИПС-МГ4.01 по [4]. Прочность R_m и класс бетона В определялись на всех 3 мачтах. Испытания показали следующее:

- на мачте № 1 $R_m = 55,5$ МПа, что соответствует классу В40;

- на мачте № 2 $R_m = 57,3$ МПа, что соответствует классу В40;

- на мачте № 3 $R_m = 54,1$ МПа, что соответствует классу В40.

Класс бетона всех мачт превышает проектный класс В40.

При обследовании наземной части радиомачт были выявлены:

- ствол мачты № 1 не имеет видимых повреждений;
- большая продольная температурная трещина в стволе мачты № 2;
- крупный выкол бетона в стволе мачты № 3, данные повреждения не оказывают влияние на несущую способность.

В целом техническое состояние наземной части радиомачт оценивается как ограниченно-работоспособное по [5], т.е. прочность материала радиомачт по первой группе предельных состояний обеспечивается.

Проведено инструментальное измерение кренов всех трех мачт.

Установлены следующие значения кренов:

- у мачты № 1 $i = 0,064$;

- у мачты № 2 $i = 0,025$;

- у мачты № 3 $i = 0,044$.

Предельное значение кренов основания фундаментов мачт нормировано в Приложении Д [6] – оно составляет 0,002. Таким образом, крены всех трех мачт во много раз превышают нормативную величину и по второй группе предельных состояний дальнейшая эксплуатация не допустима.

В итоге главным следствием ошибок при проектировании фундаментов являются большие крены мачт. При столь крупных кренах возможно их дальнейшее самостоятельное развитие с непредсказуемым результатом.

В соответствии с п. 5.6.28 [6] эксцентриситет нагрузки по подошве фундамента каждой отдельно стоящей мачты не должен был превышать величину

$$e = l / 6, \quad (1)$$

где l – размер подошвы фундамента в плоскости действия момента; иначе начался бы отрыв подошвы фундамента от грунта. Фактически такое событие и произошло, о чем свидетельствуют запредельные величины кренов.

В соответствии с условием длины подошв фундаментов по направлению кренов должны были быть не менее

$$l \geq 30 e, \quad (2)$$

т.е. при эксцентриситете 10 см длина фундамента должна быть не менее 300 см. Фактически это условие не было выполнено.

Деформированное состояние основания фундаментов всех трех радиомачт объекта обследования оцениваем по п. 5.1.5 [5] как аварийное.

Исходя из вышеизложенного следует, что дальнейшая эксплуатация радиомачт невозможна, поэтому целесообразнее произвести их демонтаж.

Нормативный срок службы монолитных фундаментов мачт до капитального ремонта по Приложению 3 [7] составляет 60 лет, минимальный нормативный срок службы радиомачт 50 лет, когда фактический срок службы составил 40 лет, что меньше минимального нормативного.

Таким образом, можно сделать вывод, что причины третьей группы на стадии проектирования значительно влияют на сокращение срока службы, что требует более качественного выбора конструктивного решения.

Литература

1. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований Основные положения. Reliability for constructions and foundations. General principles : дата введения 2015-07-01. – Москва : Стандартиформ, 2019. – 19 с.

2. Российская Федерация. Законы. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Феде-

ральный закон № 123-ФЗ от 4 июля 2008 года // КонсультантПлюс : справочно-правовая система / Компания «КонсультантПлюс» (дата обращения: 02.12.2021).

3. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. Soils. Classification. 01.01.2021 : дата введения 2021-01.01. – Москва : Стандартиформ, 2020. – 41 с.

4. ГОСТ 22690-2015. Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля : дата введения 2016-04-01. – Москва : Стандартиформ, 2016. – 23 с.

5. ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния : дата введения 2014-01-01. – Москва : Стандартиформ, 2014. – 59 с.

6. СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений : дата введения 2011-05-20. – Москва : Стандартиформ, 2011. – 166 с.

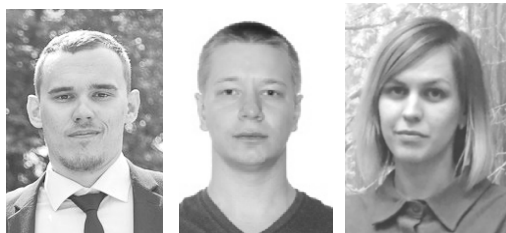
7. ВСН 58-88(р) Ведомственные строительные нормы. Положение об организации и проведении реконструкции, ремонта и технического обслуживания зданий, объектов коммунального и социально-культурного назначения. – Москва : Госстрой России, 2004. – 48 с.

N.V. Mikhalevich, E.N. Shakhova
Vologda State University

ON THE ISSUE OF REINFORCED CONCRETE RADIO MASTS DAMAGE CAUSES

The article considers the causes of damage to reinforced concrete radio masts during long-term operation, the technical condition of the ground and buried parts of radio masts was assessed.

Reinforced concrete masts, causes of damage.



МЕТОД РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПО УСЛОВИЮ ПРОЧНОСТИ ПРИ ИНТЕРВАЛЬНОЙ ОЦЕНКЕ СЛУЧАЙНЫХ ПАРАМЕТРОВ

В статье представлен новый подход к расчету изгибаемых элементов строительных конструкций по условию прочности при интервальной оценке случайных величин. Приведены примеры, когда при отсутствии необходимого объема статистических данных о случайных параметрах можно получить оценку границ их изменчивости в интервальной форме. Преимуществом такого подхода является возможность оперативной оценки надежности элемента на первой стадии расчета, а также наглядность в анализе надежности. Также данный метод может применяться при отсутствии необходимости проверки ряда статистических гипотез о принадлежности выборки конкретному распределению вероятностей. Приведен численный пример подбора сечения деревянного изгибаемого элемента по условию надежности. Предложенный метод расчета надежности можно использовать как при коррелированных, так и при независимых случайных величинах.

Надежность, прочность, вероятность отказа, изгибаемый элемент, интервальная оценка, нечеткие множества.

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 указано в стандарте Eurocode 0 «Basis of structural design», надежность обычно выражается в вероятностных терминах.

Одной из основных проблем при оценке надежности в практических инженерных задачах является выбор и обоснование моделей описания случайных величин. Главной проблемой здесь выступает фактор неопределенности: недостаток статистических данных и погрешность статистических методов.

Как отмечено в исследовании [1], «неопределенности в свойствах материалов, геометрических размерах, нагрузках и других параметрах всегда неизбежны в инженерных конструктивных задачах. Вероятностные модели широко используются для описания неопределенностей, и они оказались очень эффективными в задачах структурной надежности. Тем не менее трудно оценить точные значения параметров, чтобы точно определить распределения вероятностей из-за неточной и недостаточной информации. Как только предположение о распределении вероятностей не выполняется, анализ структурной надежности становится сомнительным и бессмысленным».

Данный тезис подтверждает исследование [2], в котором подчеркнуто, что небольшие отклонения между принятыми параметрами функций распределения и их фактическими значениями могут привести к большим ошибкам в результатах анализа надежности. В [3] также отмечается, что часто бывает трудно получить достаточное количество экспериментальных образцов для практических инженерных задач для построения точных вероятностных распределений.

Для решения данной проблемы были предложены новые подходы к анализу статистических данных и оценке надежности на основе теории выпуклых множеств (convex sets) [2, 4, 5].

Методы и алгоритмы статистического анализа данных при ограниченной информации также актуальны в задачах неразрушающего контроля [6–9].

Как было отмечено выше, для многих случайных параметров могут быть получены интервальные оценки при использовании новых математических теорий анализа данных. Так, в исследовании [10] приводятся графики функций доверия и правдоподобия для распределения вероятностей снеговой нагрузки в г. Вологде (рис. 1).

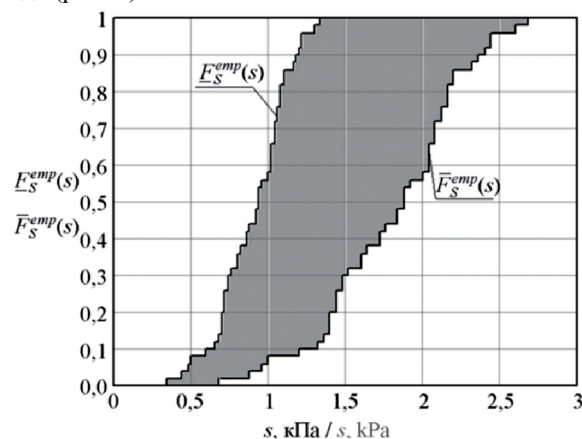


Рис. 1. Распределение вероятностей снеговой нагрузки в г. Вологде по эмпирическим данным метеостанции № 270370

Из рисунка 1 можно установить интервальную оценку снеговой нагрузки по результатам 50-летних наблюдений [0,4; 2,7] кПа. Такой подход учитывает интервальную неопределенность плотности снега: согласно п. 5.3 ГОСТ Р 53613-2009 «Воздействие природных внешних условий на технические изделия. Общая характеристика. Осадки и ветер», плотность

слежавшегося снега изменяется в пределах от 200 до 400 кг/м³. Также учитывается максимальная высота снегового покрова за отчетный год.

Рассмотрим еще один вариант получения оценки границ изменчивости случайной величины при наличии нескольких дискретных ее значений. В этом случае могут быть использованы треугольные или трапециевидные функции распределения возможностей из теории нечетких множеств [11]. Пусть случайная величина \tilde{x} (или нечеткая переменная в терминах теории нечетких множеств) может быть описана треугольной функцией принадлежности $\mu_X(x) = \pi_X(x)$ с аналитическим видом: на интервале $x \in [X_{\min}; a_X]$ имеем:

$$\mu_X(x) = \frac{x(1-\alpha) + a_X\alpha - X_{\min}}{a_X - X_{\min}} ; \text{ на интервале}$$

$$x \in [a_X; X_{\max}] : \mu_X(x) = \frac{X_{\max} - x(1-\alpha) - a_X\alpha}{X_{\max} - a_X}, \text{ где}$$

$a_X = 0,5 \cdot (X_{\max} + X_{\min})$ – условное среднее;

X_{\max} и X_{\min} – соответственно максимальное и минимальное значения в подмножестве значений $\{x\}$; нечеткой переменной \tilde{x} ; $\alpha \in [0;1]$ – уровень среза (риска).

По результатам испытаний и при заданном уровне среза α можно графически (рис. 2) или аналитически установить интервал значений для нечеткой переменной \tilde{x} или функции $X(\tilde{x})$. Аналитически границы интервала $[x; \bar{x}]$ определяются из условий

$$\frac{X(1-\alpha) + a_X\alpha - X_{\min}}{a_X - X_{\min}} = 0 \text{ и } \frac{X_{\max} - \bar{X}(1-\alpha) - a_X\alpha}{X_{\max} - a_X} = 0$$

при известных значениях параметров нечеткой переменной X .

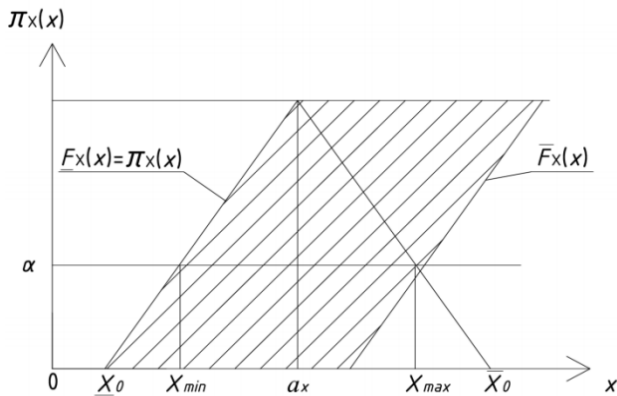


Рис. 2. Граничные функции распределения $F_X(x)$ и $\bar{F}_X(x)$

Рассмотрим подход к оценке с использованием интервальных оценок на примере анализа надежности изгибаемой деревянной балки по критерию прочности нормальных сечений. Математическая модель предельного состояния для шарнирно-опертой однопролетной балки может быть записана в виде:

$$\tilde{q} \leq \frac{4 \tilde{\sigma}_{ult} b h^2}{3 l^2}, \quad (1)$$

где \tilde{q} – равномерно распределенная нагрузка на элемент (случайная величина); $\tilde{\sigma}_{ult}$ – предельное допус-

тимое напряжение при изгибе (случайная величина); l – пролет элемента; b – ширина сечения элемента; h – высота сечения элемента.

Равномерно распределенная нагрузка \tilde{q} представляет собой сумму случайных величин (снеговая нагрузка, нагрузка от вышележащих конструкций, нагрузка от собственного веса и т.д.). Каждая из составляющих может быть описана различными видами распределений: как вероятностно-статистическими, так и интервальными или р-блоками [12]. В общем виде суммарную нагрузку легко представить в виде структуры Демпстера – Шефера. Подробно алгоритм формирования такого вида нагрузки приведен в исследовании [13]. И как было обозначено выше, в рамках структуры Демпстера – Шефера можно выделить границы изменчивости случайной величины по аналогии с рисунком 1.

$$\text{Введем обозначения } \tilde{q} = X, \quad \frac{4 \tilde{\sigma}_{ult} b h^2}{3 l^2} = \tilde{q}_{ult} = Y.$$

В случайную величину \tilde{q}_{ult} входит одна случайная величина $\tilde{\sigma}_{ult}$. Введем дополнительное обозначение для константы $\frac{4 b h^2}{3 l^2} = C$. По правилам интервальной арифметики [1]:

$$C \cdot \tilde{\sigma}_{ult} = C \cdot [\underline{\sigma}_{ult}; \bar{\sigma}_{ult}] = [C \cdot \underline{\sigma}_{ult}; C \cdot \bar{\sigma}_{ult}]. \quad (2)$$

Данное выражение соответствует интервалу $[y; \bar{y}]$.

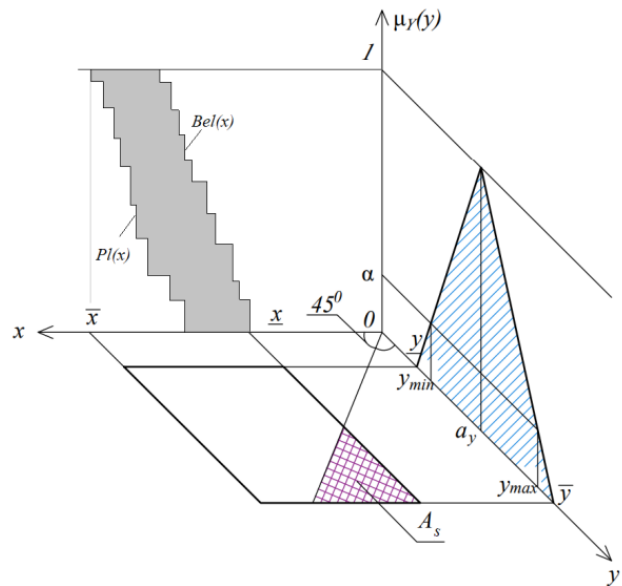


Рис. 3. Графический способ определения вероятности безотказной работы или вероятности отказа

Когда для функций $X(\tilde{x}_i)$ и $Y(\tilde{y}_j)$ сформированы интервалы $[x; \bar{x}]$ и $[y; \bar{y}]$, можно вычислить вероятность безотказной работы в графическом или аналитическом виде. В графическом виде вероятность безотказной работы определяется как отношение площади A_f к площади прямоугольника (рис. 3),

образованного значениями $[x; \bar{x}]$ и $[y; \bar{y}]$. Или вероятность безотказной работы может быть вычислена аналитически в виде:

$$P = \Pr(X \leq Y) = \frac{\int_{\bar{x}}^x \int_{\bar{y}}^y dx dy}{(x - \bar{x})(y - \bar{y})} = \frac{A_y}{(x - \bar{x})(y - \bar{y})}. \quad (3)$$

Рассмотрим численный пример оценки надежности деревянного изгибаемого элемента. Пусть элемент имеет прямоугольное поперечное сечение размерами 150×100 мм. Пролет составляет 3000 мм. Предельное допустимое напряжение при изгибе для рассматриваемой древесины определялось экспериментальным путем и составило интервал [10; 12] МПа.

Пусть по результатам сбора нагрузок с преобразованием в структуры Демпстера – Шефера [13] был получен интервал расчетной нагрузки $[x; \bar{x}] \in [2000; 3500]$ Н/м. Требуется оценить уровень надежности такого решения при отсутствии информации о распределении вероятностей случайных величин. Воспользовавшись уравнением (2), получим интервал изменчивости предельной равномерно-распределенной нагрузки для балки в виде

$[y; \bar{y}] \in [3667; 4000]$ Н/м. Отложим данные значения интервалов в осях (рис. 4).

Общая площадь прямоугольника, формируемого ординатами границ интервалов, составит $A=1$ (кН/м)². Часть площади данного прямоугольника находится за линией границы предельного состояния. Площадь данного треугольника может быть найдена графически $A_f=0,014$ (кН/м)².

Исходя из определения вероятности безотказной работы по (3) можно вычислить:

$$P=(1-0,014)/1=0,986.$$

Предположим, что действительная нагрузка имеет нормальное распределение с параметрами: $m_X = 2900$ Н/м, $S_X = 250$ Н/м. Прочность древесины при изгибе пусть также подчиняется нормальному закону распределения с параметрами $m_\sigma = 11$ МПа, $S_\sigma = 0,35$ МПа.

Как видно из статистических данных, доверительные границы интервала, образованные по правилу трех сигм, примерно соответствуют доверительным границам интервалов в примере.

На рисунке 5 представлено графическое отображение генерации 1000 случайных пар значений нагрузки на элемент и прочности древесины, полученных по указанным выше статистическим данным.

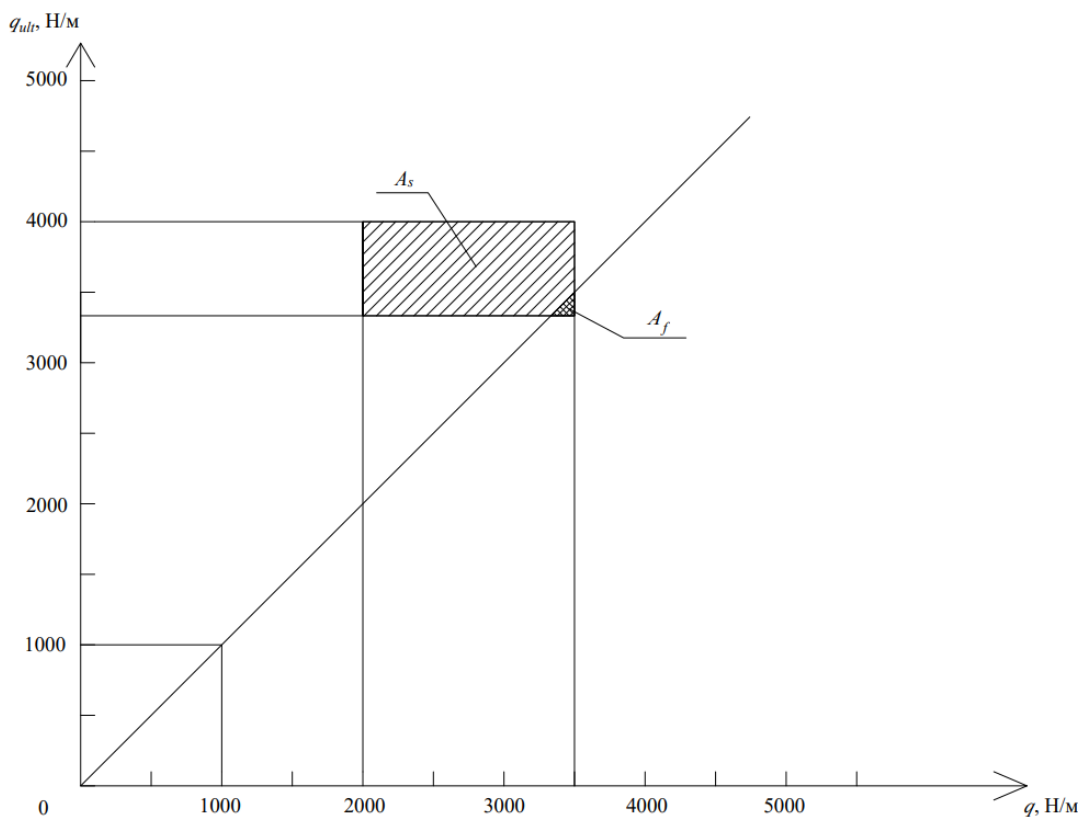


Рис. 4. Графический способ определения вероятности безотказной работы

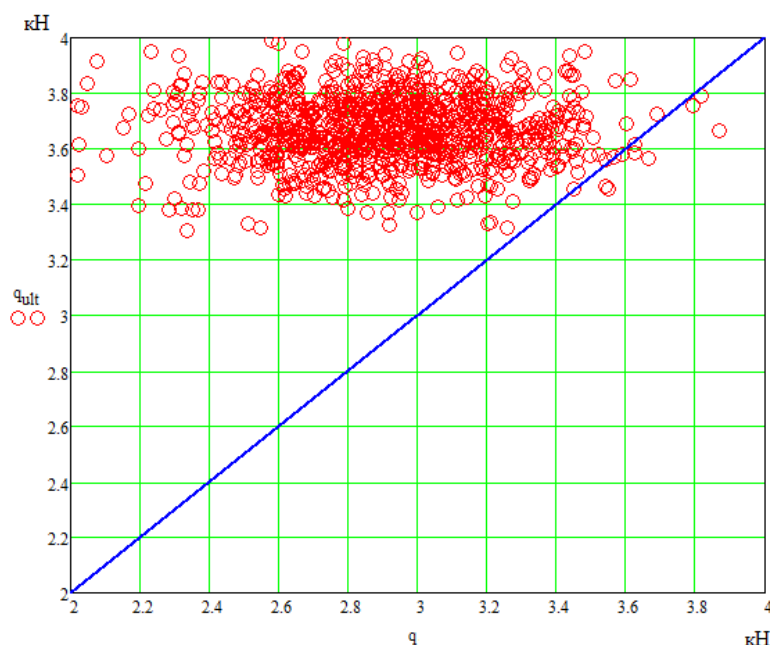


Рис. 5. Реализация 1000 парных значений нагрузки и предельной нагрузки на элемент

Как видно из рисунка 5, одиннадцать значений из результатов генерации пар случайных величин находятся за границей линии предельного состояния. Исходя из метода статистических испытаний [14], можно оценить надежность как $(1000-11)/1000=0,989$. Это значение очень близко к оценке надежности на основе предложенного подхода. Таким образом, предложенная методика оценки уровня надежности при наличии интервальных оценок случайных величин в расчетных математических моделях предельных состояний может быть использована на практике расчетов надежности в инженерных задачах.

Дополнительно можно рассмотреть вариант, в котором размеры поперечного сечения также являются случайными величинами с интервальными оценками. Тогда математическая модель предельного состояния запишется в виде:

$$\tilde{q} \leq \frac{4 \tilde{\sigma}_{ult} \tilde{b} \tilde{h}^2}{3 l^2}. \quad (4)$$

Для правой части неравенства необходимо выполнить последовательное умножение случайных величин по правилам интервальной арифметики:

$$x' \cdot y' = [\underline{x}; \bar{x}] \cdot [\underline{y}; \bar{y}] = [\min\{\underline{x} \cdot \underline{y}; \underline{x} \cdot \bar{y}; \bar{x} \cdot \underline{y}; \bar{x} \cdot \bar{y}\}; \max\{\underline{x} \cdot \underline{y}; \underline{x} \cdot \bar{y}; \bar{x} \cdot \underline{y}; \bar{x} \cdot \bar{y}\}]$$

После трех операций умножения можно будет получить общий интервал $[\underline{y}; \bar{y}]$ для правой части неравенства, который будет характеризовать предельную допустимую нагрузку. Алгоритм дальнейшей оценки надежности останется прежним.

Одной из основных проблем при оценке надежности в практических инженерных задачах является выбор и обоснование моделей описания случайных величин. Допущения при выборе законов распределения случайных величин и оценке параметров распределе-

ний могут привести к большим ошибкам в результатах оценки надежности.

В статье предложен подход к расчету надежности изгибаемых элементов при наличии статистической информации только о границах изменчивости случайных величин. Приведены варианты оценки данных границ: использование теории нечетких множеств, теории свидетельств Демпстера – Шефера и др.

Решение примера на основе метода Монте-Карло показало близость результатов аналитического и численного подходов. Предложенная методика оценки уровня надежности при наличии интервальных оценок случайных величин в расчетных математических моделях предельных состояний может быть использована на практике расчетов надежности в инженерных задачах.

Литература

1. 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). – P. 85–92.
2. Ben-Haim, Y. *Convex Models of Uncertainties in Applied Mechanics* / Y. Ben-Haim, I. Elishakoff. – Amsterdam : Elsevier, 1990. – 240 p.
3. 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). – P. 383–395.
4. Elishakoff, I. *Essay on uncertainties in elastic and viscoelastic structures: from AM Freudenthal's criticisms to modern convex modeling* / I. Elishakoff // *Computers & Structures*. – 1995. – Vol. 56, No. 6. – P. 871–895.
5. Elishakoff, I. Discussion on: A non-probabilistic concept of reliability / I. Elishakoff // *Structural Safety*. – 1995. – Vol. 17(3). – P. 195–199.
6. 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. – P. 311–320.

7. Zheng, R. Role of non-destructive evaluation in time-dependent reliability analysis / R. Zheng, B.R. Ellingwood // *Structural Safety*. – 1998. – Vol. 20, No. 4. – P. 325–339.

8. Karpov, D. F. Algorithm for integrated non-destructive diagnostics of technical condition of structures of buildings and constructions using the thermogram analysis / D. F. Karpov, A. A. Sinitsyn // *E3S Web of Conferences* : International Conference on Efficient Production and Processing, ICEPP 2020, Prague, 27–28 февраля 2020 года. – Prague : EDP Sciences, 2020. – P. 01040.

9. Карпов, Д. Ф. Комплексная энергосберегающая диагностика технического состояния ограждающих конструкций объектов капитального строительства и инженерных систем на основе теплового контроля / Д. Ф. Карпов, М. В. Павлов, А. А. Сеницын // *Энергосбережение и водоподготовка*. – 2020. – № 2 (124). – С. 29–33.

10. 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.

11. Уткин, В. С. Расчет надежности основания фундамента, сложенного просадочными грунтами, по критерию деформации / В. С. Уткин, А. А. Каберова, С. А. Соловьев // *Геотехника*. – 2016. – № 3. – С. 18–25.

12. 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.

13. Соловьев, С. А. Моделирование случайной статической нагрузки на покрытия сооружений при неполной статистической информации / С. А. Соловьев // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. – 2020. – Т. 16, № 4. – С. 243–249.

14. Structural reliability analysis using Monte Carlo simulation and neural networks / J. B. Cardoso, J. R. de Almeida, J. M. Dias [et al.] // *Advances in Engineering Software*. – 2008. – Vol. 39 (6). – pp. 505–513.

S.A. Solovyev, A.E. Inkov, A.A. Solovyeva
Vologda State University

METHOD FOR ANALYSIS OF FLEXURAL STRUCTURAL ELEMENTS RELIABILITY ON THE STRENGTH CRITERIA WITH INTERVAL ESTIMATIONS OF RANDOM PARAMETERS

The article describes a new approach to the structural reliability analysis of flexural structural elements on the strength criteria with interval estimations of random parameters. The examples are given for the cases when in the absence of the necessary amount of statistical data for the random variables it is possible to estimate their variability boundaries in the interval form. The advantage of the proposed approach is the ability to quickly assess the reliability of the structural element at the first stage of design, as well as visibility in the reliability analysis. The proposed method can also be used if there is no need to test a number of statistical hypotheses about the sample belonging to a specific probability distribution function. A numerical example for wooden beam design according to the reliability level is given. The proposed method for reliability analysis can be used for both correlated and independent random variables.

Reliability, strength, failure probability, flexural element, interval estimation, fuzzy sets.



*С.А. Соловьев,
А.Д. Летавин,
Ю.А. Губина,
А.А. Соловьева,
Л.С. Шевцов*

*Вологодский государственный
университет*

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВОВ ВЫСОКОПРОЧНОГО АРБОЛИТА И КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ НА ИХ ОСНОВЕ

В статье исследуются прочностные характеристики арболита как конструкционного материала путем исследования и анализа запатентованных разработок. По результатам анализа нескольких десятков российских и зарубежных запатентованных решений смесей легких бетонов с органическим заполнителем установлено, что арболит как физико-механический материал может иметь прочность выше 5 МПа при различных видах составов и модификаторов. Следовательно, существует возможность его использования в качестве материала для несущих элементов строительных конструкций балочного типа (перемычки, ростверки, плиты перекрытий). Предложен вариант использования армированного арболита как материала для конструктивного решения энергоэффективной перемычки из легкого бетона. По результатам численного примера на базе классической теории железобетона установлена потенциальная несущая способность нормальных и наклонных сечений перемычки из армированного арболита при изгибе.

Арболит, прочность, предельное напряжение, легкий бетон, органические заполнители, патенты.

Научно-координационным советом по бетону и железобетону Госстроя СССР в «Координационный план основных научно-исследовательских работ» на 1986–1990 гг. была включена тема «Разработать, исследовать и внедрить эффективные конструкции из арболита прочностью до 5,0 МПа для зданий различного назначения». Однако, как отмечено в [1], «арболит остается малоизученным материалом. Введенные с определенной осторожностью в нормативные документы требования по проектированию и применению конструкций из арболита сдерживают разработку новых эффективных конструкций».

Арболит как строительный материал известен давно – материал и технологию изготовления изобрели в 30-е годы XX века под названием Durisol [2]. В России он получил распространение с 60-х годов прошлого века [3–5].

Арболит является одним из видов легких бетонов, которые производятся на органическом заполнителе (щепа, опилки). Основные правила производства, проектирования, транспортировки изделий из арболита приведены в Межгосударственном стандарте ГОСТ 19222-2019 «Арболит и изделия из него». Прочность арболита по ГОСТ 19222-2019 невелика в сравнении с тяжелыми бетонами: расчетное сопротивление арболита при сжатии составляет от 0,3 до 2,1 МПа, при осевом растяжении от 0,087 до 0,570 МПа. На основе этих характеристик предлагается использовать арболит или в виде теплоизоляционных самонесущих элементов строительных конструкций, или в виде элементов кладки стен.

Исследование вопроса повышения прочностных свойств легких бетонов на органических заполнителях при минимизации их плотности и теплопроводности позволило бы разработать новые виды несущих элементов строительных конструкций, отличающихся энергоэффективностью, низким собственным весом, а также

позволит использовать отходы деревопереработки. В связи с этим в данной статье предлагается рассмотреть существующие виды высокопрочного легкого бетона на органических заполнителях, а также исследовать вопрос несущей способности изгибаемых элементов из армированного легкого бетона по типу арболита.

Преимуществом легких бетонов на основе органических заполнителей также является возможность использования древесных отходов и материалов деревопереработки в качестве заполнителя. Так, в исследовании [6] одного из самых известных ученых в данной области д-ра техн. наук профессора И.Х. Наназавили отмечается, что «Древесная щепа-дробленка, получаемая из деревянных поддонов, бывших в употреблении и находившихся в длительной эксплуатации в разных температурно-влажностных условиях и не подвергнутых биологическому воздействию, в большей мере имеет стабилизированные свойства по деформативным показателям и химической активности. Дело в том, что многие легкогидролизуемые сахара и экстрактивные вещества, содержащиеся в древесине (сахароза, фруктоза, глюкоза, галактоза, арабиноза и др.), либо существенно снижены под воздействием влаги и солнечных лучей, либо видоизменены в более труднорастворимые формы, поэтому их влияние на процессы структурообразования и на замедление твердения цементного камня, а следовательно, и арболита, минимизировано».

На эффективность использования строительных материалов из продуктов деревопереработки указывают и авторы исследования [7], отмечая что «Повторное использование техногенных экологически чистых промышленных и бытовых отходов в строительстве позволяет улучшить условия проживания человека, уменьшить себестоимость продукции за счет повышения полезного выхода и снижения издержек на утилизацию отходов».

В работе [8] проведено исследование влияния фракционного состава древесного заполнителя на физико-механические показатели арболита.

В зарубежных исследованиях [9, 10] также отмечается актуальность использования отходов деревопереработки для использования в качестве крупного и мелкого заполнителя в легких бетонах. В исследовании [10] приведен большой обзор разработок составов бетонов на органических заполнителях из древесных отходов.

Современные методы и методики теплового контроля [11–14] могут быть использованы при дальнейшей оценке качества нового вида строительной про-

дукции из арболита в частности и легкого бетона на органическом заполнителе в целом.

Таким образом, исследование и разработка новых видов элементов строительных конструкций на основе высокопрочного арболита является актуальной задачей для строительной отрасли. В таблице 1 рассматриваются запатентованные способы получения сырьевой смеси арболита и технологических процессов ее изготовления и высушивания, которые позволяют получить арболит с прочностью выше 5 МПа.

В таблице 2 приведен обзор технических решений по производству и изготовлению блоков из арболита, конструкционная прочность которых не менее 5 МПа.

Таблица 1

Анализ запатентованных составов арболитовых смесей по максимальной прочности

Номер патента, год	Состав арболитовой или опилкобетонной смеси	Максимальная прочность, МПа	Примечание
SU 1477712, 1987	Мас., %: гипс 42–46, древесный заполнитель 25–27, измельченная в кислой среде костра льна 4–8, остальное – вода	8,70–10,20	Значительно возрастает сцепление камня вяжущего с заполнителем, что наряду с армирующим действием тонкоизмельченных волокон констры способствует значительному возрастанию прочности арболитовых изделий при изгибе и сжатии
SU 1574572 А1, 1987	Мас., ч.: древесный крупный заполнитель 220–250, древесный мелкий заполнитель 100–130, цемент 160–190, вода 80–95	5,70–12,80	В качестве древесного заполнителя используют гранулы, покрытые полимерным связующим, получаемые путем прессования при давлении 25–75 МПа и температуре 150–180 °С, причем для крупного заполнителя используют станочную стружку и опилки в соотношении 3:2, а для мелкого – опилки
RU 2620696 С1, 2016	Мас., %: древесный заполнитель 52–58; цемент 23–27; гипс 0,5–0,9; указанный лигносульфонат 0,45–0,75; хлористый кальций 0,75–1,65; вода 16–19	6,96	Обработка древесного заполнителя осуществляется в 4%-ном растворе гидроксида натрия при температуре 50–60 °С и одновременном ультразвуковом воздействии частотой 30–40 кГц в течение 20–30 мин, далее после слива раствора NaOH осуществляется промывка древесного заполнителя водой
RU 2338715 С1, 2008	Мас., ч.: указанная кора 1,0, указанное жидкое стекло ($n=4$) 0,25, указанная зола-унос 2,1–2,2, указанное жидкое стекло ($n=1$) 1,9–2,0	6,50–7,10	Кора обрабатывается жидким стеклом из микрокремнезема, содержащего до 17 % примесей в форме графита и карбида кремния. Уплотнение смеси вибрированием с пригрузом ($P=0,05$ кгс/см ²)
RU 2130911 С1, 1997	Мас., %: Опилки – золаунос – жидкое стекло = 14,6 – 15:34,3 – 35:51,1	7,90–11,60	Отходы древесины лиственницы в виде опилок подвергают водотепловой обработке – экстракции при температуре 100 °С в течение 1 ч, перемешивают последовательно с компонентами вяжущего – золой-уносом, а затем с углеродсодержащим жидким стеклом до однородного состояния, после чего изделия формируют послойным вибропрессованием
SU 1724622 А1, 1990	Способ предусматривает обработку высушенных опилок 2/3 ч. 30%-го водного раствора технических лигносульфонатов и затем портландцементом, смешивают 3-полугидрат сульфата кальция, песок и оставшуюся 1/3 ч. указанных технических лигносульфонатов. В полученную смесь вводят обработанные опилки	6,40–7,40	Высушенные до постоянного веса и отдозированные опилки засыпают в смеситель, в последний вводят 30%-ный раствор лигносульфонатов, например (СДБ), перемешивают 3–4 мин, затем в обработанные опилки в работающий смеситель вводят портландцемент, где перемешивание длится 2–3 мин, потом вводят в смесь, параллельно приготовленную в другом бетоносмесителе, полугидрат сульфата кальция, песок и воду, предварительно перемешанную с остальной частью лигносульфонатов, и перемешивают в течение 3–4 мин и, наконец, вводят обработанные лигносульфонатами и цементом опилки и перемешивают 3 мин

Номер патента, год	Состав арболитовой или опилкобетонной смеси	Максимальная прочность, МПа	Примечание
RU 2695313 C1, 2018	Мас., %: модифицированный цитрогипс 80,18–82,80; древесные опилки 2,30–4,58; вода – остальное	20,22–23,56	Смешивание древесных опилок с водой, введение модифицированного цитрогипса, перемешивание до равномерного его распределения на поверхности опилок; формование осуществляется в пресс-формах под давлением 20 МПа
SU 1699976 A1, 1989	Мас., %: цемент 38,1–46,7; дробленая обработанная древесина 18,3–22,8; подвспененный полистирольный песок крупностью 3 мм 0,85–2,6; древесная омыленная смола 0,19–0,23; остальное – вода	3,7–5,5	С целью снижения отпускной влажности, теплопроводности арболита, повышения прочности, морозостойкости дробленую древесину перед смешиванием с компонентами сырьевой смеси обрабатывают вязкой пеной, состоящей из водных растворов гидроксида кальция, сернистого алюминия и древесной омыленной смолы
SU 1294779 A1, 1987	Мас., %: опилки 60; шлак 28; щелочь 6; ТЭАТ-1 2; ТЛС 2; сульфат хрома (III) 2. На 1 мас.ч. суммы компонентов 1 мас.ч. воды	10,4	С целью снижения плотности и повышения прочности дополнительно содержит смесь триэтаноламинтитана, технического лигносульфоната и сульфат трехвалентного хрома
SU 1671638 A1, 1989	Мас.%: цемент 41,5; древесный наполнитель 18,3; пеностекло 9,1; вода 31,1	4,90–6,85	С целью повышения прочности и снижения отпускной влажности при изготовлении арболитовых изделий в арболитовую смесь вводят пеностекло
SU 1694528 A1, 1989	Мас., %: сланцевая зола 41,6–43; древесный наполнитель 8,5–9,4; карбонатная опока 13,9–14,3; хлорид кальция 0,57–0,86; активизатор твердения – отработанный раствор дубления мехов 0,44–0,63; остальное – вода	16,30–20,08	Мелкие карбонатные частицы служат как центры кристаллизации при твердении смеси, что сказывается на увеличении количества низкоосновных гидросиликатов, повышающих прочность строительных изделий

Таблица 2

Анализ запатентованных составов арболитовых смесей по максимальной прочности

Номер патента, год, страна	Состав арболитовой или опилкобетонной смеси	Максимальная прочность, МПа	Примечание
KR20080106508A, 2007, Южная Корея	Мас. %: цемент 35; щепа 18; этиленвинилацетат 8; гидроксипропилметил-целлюлоза 1; остальное – вода	6–20	Продукты пиломатериалов могут иметь средний размер частиц в диапазоне от 1000 микрон или менее до 20–30 мм
CN104386989A, 2014, Китай	Мас. %: мелкий наполнитель 70, крупный наполнитель 10, силикатный цемент 5,6, алюмосульфатный цемент 4,4, вода 2,97, жидкое стекло 4, алебастр 2, полипропиленовое волокно 1, тропамин 0,03	19,3	В состав элемента входит наполнитель из строительных отходов, после дробления подвергается трехкратному отбору путем просеивания, отбирается древесная щепа и органические отходы. Вибрационное просеивающее устройство, имеющее сита размером 400 мкм, разделяет элементы на мелкий и крупный наполнитель
WO2004099102A2, 2003, WIPO	Сухая часть (смесь): - оксид магния (каустический магnezит) в количестве от 25 до 60; - Органические отходы 40–75. - Красители – от 0 до 5. Жидкая часть: - Водный раствор MgCl ₂ с концентрацией 18–32°Be, количество от 70 до 100 % от количества MgO. Добавки: - MgSO ₄ в качестве добавки к водному раствору MgCl ₂ – до 5 % от количества MgCl ₂ ; - гипс – до 10 % от количества MgO.	3–10	Варьируя тип и количество наполнителей (натуральная глина, вспученное вулканическое стекло, керамзит, зола от теплоэлектростанций, целлюлозные волокна, древесная стружка, древесная мука, измельченная древесная кора, волокна пальм, рисовая шелуха, шелуха подсолнечника, хлопковое семя, отходы производства гибких и конопляных волокон, хрупкие, нарезанные) и связующего, в вышеупомянутых пределах можно получить различные группы марок блоков

Номер патента, год, страна	Состав арболитовой или опилко-бетонной смеси	Максимальная прочность, МПа	Примечание
CN1254457C, 2006, Китай	Мас. % от веса брутто сырья: композитные цементирующие материалы 20~70; мелкий песок 22,5~50; легкий каркасный материал 10~40; волокно 0,5~2. Мас. % от веса композитных цементирующих материалов: материал, образующий поры, 0,1~3; пластификатор 0,2~2,5; едкая щелочь 0,2~3; вода 15~30	15~30	Размеры щепы 1–5 мм
CN101298379B, 2011, Китай	Дозирующее сырье: 12 килограммов резиновых зерен, 18 килограммов древесной шерсти, 42 килограмма цемента, 0,36 килограмма полимерного полиизоцианата, 0,5 килограмма органического армирующего ПК, 1,5 килограмма жидкого стекла, 14 килограммов в воде, концентрация составляет 2 %-ный водный раствор гидроксида натрия	3–6,6	Размеры щепы: длина 2 мм~15 мм, ширина 0,2~20 мм, толщина 0,2~2,0 мм. Щепы пропитывается в 2%-ом водном растворе гидроксида натрия в течение 5 часов, после чего высушивается до влажности ~7 %.

Как видно из таблиц 1 и 2, использование специальных химических добавок, специальных типов связующих, а также вариация и модификация органического заполнителя позволяют создать легкие бетоны на органическом заполнителе с прочностью от 5 до 30 МПа.

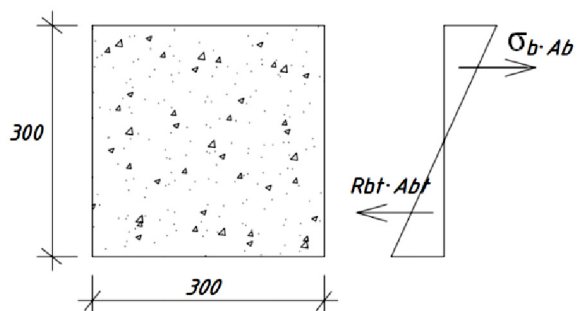


Рис. 1. Нормальное сечение и эпюры напряжений перемычки без арматуры

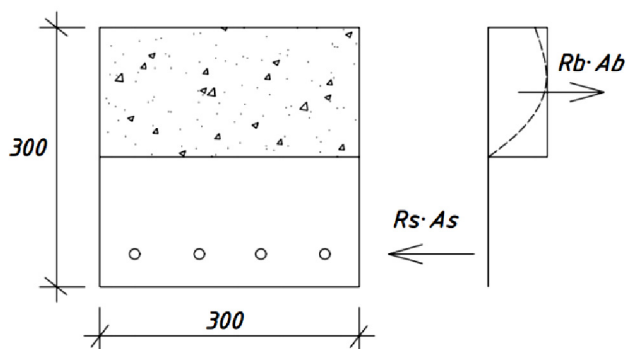


Рис. 2. Нормальное сечение и эпюры напряжений перемычки с арматурой

Как видно на рисунке 1, в неармированном изгибаемом элементе из арболита определяющим фактором при разрушении является достижение критических напряжений в растянутой зоне R_{bt} . Напряжения в сжатой зоне бетона σ_b не достигают критических зна-

чений. При добавлении в исследуемый элемент арматурных стержней с общей площадью A_s расчетная схема для определения прочности нормальных сечений меняется (рис. 2).

В армированном элементе не учитывается работа растянутой зоны бетона (в запас надежности). Растягивающие усилия воспринимает арматура, сжимающие усилия воспринимаются площадью сжатой зоны бетона $A_b = b \cdot x$. В первом приближении можно принять классическую модель теории предельного сопротивления железобетона, когда напряжения распределяются равномерно по сжатой зоне при достижении предельного состояния. В дальнейшем данную функцию необходимо уточнить по результатам испытаний образцов выбранного типа арболита на сжатие с построением диаграмм деформирования. Вид данной функции будет нелинейный, как показано на рисунке 2.

Рассмотрим числовой пример. Пусть имеется изгибаемый элемент из армированного легкого бетона с органическим заполнителем. Размеры поперечного сечения элемента 300x300 мм, пролет 2500 мм. По результатам испытаний образцов легкого бетона на сжатие и растяжение установлены следующие характеристики: расчетное сопротивление сжатию $R_b = 5,00$ МПа; расчетное сопротивление растяжению $R_{bt} = 1,00$ МПа.

Случай 1. Напряжения в нормальном сечении достигнут предельных значений при величине изгибающего момента:

$$M_{ult} = R_{bt} W = R_{bt} \frac{bh^2}{6} \rightarrow 4,50 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

В данном случае элемент выдерживает 720 кг нагрузки, сосредоточенной в середине пролета или распределенную нагрузку 576 кг/м.

Случай 2. Пусть элемент армируется 4 стержнями арматуры А400 диаметром 12 мм. Площадь армирования составит $A_s = 4,52 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$. Расчетное сопротивление арматуры, в соответствии с СП 63.13330.2018 «Бе-

тонные и железобетонные конструкции», составит $R_s=350$ МПа. По модели прочности нормальных сечений железобетонных элементов можно записать:

$$M_{ult} = R_s A_s \left(h_0 - \frac{R_s A_s}{2 R_b b} \right) \rightarrow 30,00 \text{ кН}\cdot\text{м},$$

где h_0 – рабочая высота сечения элемента, принятая 0,28 м.

Как видно из расчета, предельный изгибающий момент, который может воспринять сечение, вырастает более чем в 6 раз. В данном случае элемент выдерживает 4800 кг нагрузки, сосредоточенной в середине пролета, или распределенную нагрузку 3840 кг/м.

Поперечная сила, воспринимаемая арболитом в наклонном поперечном сечении:

$$Q_{ult} = 0,5 R_{bt} b h_0 \rightarrow 42 \text{ кН},$$

что соответствует равномерно распределенной нагрузке 5600 кг/м для рассматриваемой конструкции.

Сохранность арматуры в теле легкого бетона на органическом заполнителе подтверждается экспериментальными исследованиями [1], где отмечается, что «хранение балочных образцов с преднапряженной арматурой в течение шести лет при влажности 63–77 % и температуре 15–25 °С показало хорошие защитные свойства поризованного арболита класса В5 и возможности сохранения требуемых свойств конструкции на весь период эксплуатации зданий».

В то же время железобетон имеет коэффициент теплопроводности $\lambda = 1,69$ Вт/(м·°С) в соответствии с СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий», а арболит самой высокой плотности D800 имеет коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,24$ Вт/(м·°С) в соответствии с ГОСТ 19222-2019 «Арболит и изделия из него».

Вышеизложенное расчетное обоснование отражает возможность создания энергоэффективных конструкций из армированного арболита.

В исследовании выполнен научно-технический обзор запатентованных разработок по составу и технологии изготовления легких бетонов на органических заполнителях (в частности, арболита), прочность при сжатии которых превышает значение 5 МПа.

Предложен вариант энергоэффективной перемычки из армированного арболита с предварительным расчетным обоснованием несущей способности нормальных и наклонных сечений.

Для более точных и достоверных математических моделей определения несущей способности таких конструкций необходимо проведение экспериментальных исследований с введением в уравнение факторов особенностей работы армированного арболита под нагрузкой.

Литература

1. Обрезкова, В. А. Исследование изгибаемых предварительно напряженных конструкций из поризованного арболита : специальность 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» : автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук / В. А. Обрезкова. – Самара : СГАСУ, 2005. – 20 с.

2. Современные строительные композиционные материалы на основе древесных отходов / Р. Г. Сафин, В. В. Степанов, Э. Р. Хайруллина, А. А. Гайнуллина, Т. О. Степанова // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17, №. 20. – С. 123–128.

3. Первовский, А. Н. Арболит в строительстве / А. Н. Первовский. – Москва : Московский рабочий, 1964. – 131 с.

4. Авторское свидетельство № 250718 А1 СССР, МПК С04В 18/26, С04В 28/04. Арболит : № 1178681/29-33 : заявл. 04.08.1967 : опубл. 12.08.1969 / Г. А. Бужевич, И. П. Мещерякова, А. С. Щербаков ; заявитель Научно-исследовательский институт бетона и железобетона.

5. Пискарева, Л. Н. Арболит из отходов лесозаготовительной промышленности Сибири / Л. Н. Пискарева // Местные строительные материалы : сборник. – Красноярск : КПИ, 1970. – С. 45–67.

6. Наназашвили, И. Х. Древесные отходы – вторая жизнь. Арболитовые стеновые блоки / И. Х. Наназашвили, А. А. Соколов, Р. А. Марченков // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2011. – № 7 (150). – С. 24–25.

7. Лукаш, А. А. Эффективные строительные материалы и изделия из техногенных отходов для жилищного строительства / А. А. Лукаш, Н. П. Лукутцова // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2017. – № 2. – С. 26–37.

8. Влияние фракционного состава древесного заполнителя на физико-механические показатели арболита / В. П. Сеничев, Л. М. Воропай, Ю. Р. Осипов, С. А. Шлыков // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2015. – № 6 (67). – С. 47–50.

9. Chowdhury, S. The incorporation of wood waste ash as a partial cement replacement material for making structural grade concrete: An overview / S. Chowdhury, M. Mishra, O. M. Suganya // Ain Shams Engineering Journal. – 2015. – Vol. 6, No. 2. – Pp. 429–437.

10. Kasun Uthpala De Silva L.V. Light weight concrete using waste wood chips as a partial replacement. – URL: https://www.researchgate.net/publication/343961794_LIGHT_WEIGHT_CONCRETE_USING_WASTE_WOOD_CHIPS_AS_A_PARTIAL_REPLACEMENT (Дата обращения: 1.11.2021). – Текст: электронный.

11. Некоторые особенности и результаты теплового контроля навесных вентилируемых фасадных систем объектов капитального строительства / Д. Ф. Карпов, М. В. Павлов, А. А. Сеницын [и др.] // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2020. – Т. 47, № 1. – С. 147–155.

12. Карпов, Д. Ф. Комплексная энергосберегающая диагностика технического состояния ограждающих конструкций объектов капитального строительства и инженерных систем на основе теплового контроля / Д. Ф. Карпов, М. В. Павлов, А. А. Сеницын // Энергосбережение и водоподготовка. – 2020. – № 2 (124). – С. 29–33.

13. Карпов, Д. Ф. Оценка теплозащитных свойств ограждающих конструкций строительных объектов по анализу термограмм / Д. Ф. Карпов, М. В. Павлов // Вестник Дагестанского государственного технического

го университета. Технические науки. – 2021. – Т. 48, № 2. – С. 92–102.

14. Павлов, М. В. Современные теплоизоляционные материалы для повышения теплозащитных свойств ограждающих конструкций зданий и энерго-

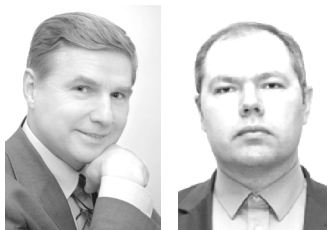
эффективности инженерных систем / М. В. Павлов, Д. Ф. Карпов, В. П. Березина // Научно-технические проблемы совершенствования и развития систем газоснабжения. – 2020. – № 1. – С. 81–87.

S.A. Solovyev, A.D. Letavin, Yu.A. Gubina, A.A. Solovyeva, L.S. Shevtsov
Vologda State University

RESEARCH OF HIGH-STRENGTH ARBOLITE MIXTURES AND STRUCTURAL SOLUTIONS ON THEIR BASIS

The article describes the strength characteristics of arbolite as a high-strength lightweight concrete with wood chips. According to the results of the analysis of several dozen Russian and foreign patented solutions for mixtures of lightweight concrete with organic aggregate, it was found that arbolite as a mechanical material can have a compressive strength above 5 MPa with various types of mixtures and modifiers. Therefore, it is possible to use it as a material for beam-type load-bearing structural elements (beams, slabs, lintels, etc.). A variant of using reinforced arbolite as a material for a structural solution of an energy-efficient lintel made of lightweight concrete is proposed. Based on the results of a numerical example by the classical theory of reinforced concrete, the potential bearing capacity of normal cross-sections and shear capacity have been established for the flexural reinforced arbolite lintel.

Arbolite, compressive strength, ultimate stress, lightweight concrete, organic aggregates, patents.



В.А. Шорин, А.Ю. Вельсовский
 Вологодский государственный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НЕФТЯНОГО ДОРОЖНОГО БИТУМА МОСКОВСКОГО НПЗ С МОДИФИЦИРОВАННОЙ БИФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДОБАВКОЙ HONEYWELL

Данная работа посвящена вопросам исследования факторов, улучшающих свойства нефтяных дорожных битумов, в частности степени влияния модифицирующих добавок. Объектами исследования выбраны дорожный битум марки БНД 69/90 Московского НПЗ и перспективная модифицирующая бифункциональная добавка Honeywell. Впервые проведено комплексное исследование реологических и адгезионных свойств дорожного битума, модифицированного добавкой Honeywell. Выявлены четкие коррелятивные связи влияния концентрации добавки Honeywell на вязкость, температуру размягчения, дуктильность и величину адгезии модифицированного битума.

Нефтяной дорожный битум, модифицирующие добавки, реологические свойства, вязкость, температура размягчения, дуктильность, спектрофотометрический метод, когезия, адгезия битума.

Дорожное строительство является одной из важнейших отраслей современной экономической системы любой страны, формируя ее транспортную инфраструктуру. Особенно это актуально для России с ее огромной территорией, суровыми природно-климатическими условиями, растущим количеством автоперевозок промышленных грузов и ростом личного автопарка жителей страны.

Большое значение в этом плане имеет качество и долговечность асфальтобетонного покрытия автомобильных дорог. Асфальтобетон – это строительный композиционный материал, который получают в результате затвердевания уплотненной смеси органического вяжущего (битума), заполнителей (щебня, гравия, песка или отсева), минерального порошка и добавок. Качество асфальтобетона во многом определяется техническими свойствами битума, который выполняет роль связующего материала.

При этом надлежащее качество битума сегодня не обеспечивает никто из российских производителей этого материала [1]. В России производство битума сосредоточено на крупных нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ), где битум является остаточной частью производства нефтепродуктов и качество этого материала находится на низком уровне. По данным отчетов V Конгресса «Евроасфальт и Евробитум», роль вяжущих в процессах разрушения покрытия велика: около 90 % в случае термического растрескивания, примерно 60 % при усталостном растрескивании и около 40 % при постоянной деформации [2]. Таким образом, эксплуатационная надежность дорог с длительным сроком службы и низкой стоимостью технического обслуживания в значительной степени зависит от вяжущего.

Представляется, что сегодня единственный способ повысить качество битума в России – применять модифицированный битум с полимерными и адгезионными добавками [3, 5, 6].

Процесс структурообразования битумо-минеральных композитов обязан, прежде всего, адгезионному взаимодействию битумного вяжущего с поверхностью минерального заполнителя. Адгезионное сцепление дорожного битума с поверхностью минеральных частиц имеет первостепенное значение для обеспечения основных свойств асфальтобетона. Не менее важной характеристикой, которая отвечает за структурно-механические (реологические) свойства битумов, является когезия битума. Когезия – сцепление внутри слоя битумного вяжущего.

Адгезионные свойства нефтяных дорожных битумов можно увеличить за счет введения специальных адгезионных присадок, таких как «Дорос-АП», «Азол-1008», «Амдор-9», Sasobit, Wetfix-BE и др. Добавление ПАВ к битуму заметно улучшает обволакивание частиц и прилипание пленки вяжущего (адгезию) к каменным материалам кислых пород, поэтому эти добавки называются адгезионными. Улучшение адгезии существенно повышает качество асфальтобетонных смесей и, соответственно, дорожных покрытий.

Когезионные свойства нефтяных дорожных битумов можно значительно усилить путем введения различных полимерных материалов (дивинилстирольный термопласт, ДСТ-30, добавку «Кратон» и др.)

Особенность добавки Honeywell заключается в ее способности одновременно усиливать как когезионные, так и адгезионные свойства нефтяных дорожных битумов. Honeywell – многофункциональная добавка, комбинирующая свойства низкотемпературной укладки, эффективного сопротивления деформациям дорожного полотна и хорошую адгезивность. Honeywell состоит из функционального низкомолекулярного полиэтиленового воска – это порошок средней крупности, белого цвета. Эта добавка отлично сочетается практически со всеми разновидностями

битумов. Добавка в битуме с легкостью диспергируется при 150 °С с использованием простой мешалки.

Основные преимущества, обеспечиваемые добавкой:

- Увеличение срока службы покрытия: повышение устойчивости и колеежности.

- Улучшение адгезионных характеристик: улучшение способности к агломерированию, повышение водостойкости.

- Снижение затрат при строительстве новых дорог: повышение производительности благодаря легкости смешения (отсутствие необходимости в специальном оборудовании с большим усилием сдвига).

- Повышение скорости укладки: для достижения тех же результатов требуется меньше проходов катка.

Авторами проведено комплексное исследование реологических (вязкость, температура размягчения, дуктильность) и адгезионных свойств дорожного битума Московского НПЗ модифицированного бифункциональной добавкой Honeywell. Согласно ГОСТ 33133-2014 «Дороги автомобильные общего пользования, битумы

нефтяные дорожные вязкие» были определены важнейшие эмпирические показатели, такие как пенетрация при 25 °С и 0 °С, температура размягчения, растяжимость битумов (дуктильность) при температуре 25 °С и 0 °С. Данные показатели тесно связаны с реологическими характеристиками и могут использоваться для оценки структуры и качества битумов [4].

Результаты экспериментальных исследований влияния концентрации добавки Honeywell на величину пенетрации (глубины проникания иглы) при 25 °С приведены в таблице 1.

Результаты исследования выявили зависимость уменьшения значения глубины проникания иглы с увеличением роста концентрации добавки Honeywell. Таким образом, был сделан вывод, что при вводе добавки увеличиваются когезионные силы в битуме, а также повышается вязкость битумного вяжущего.

В таблице 2 приведены результаты испытаний модифицированного вяжущего с добавкой Honeywell на основе битума Московского НПЗ БНД 60/90 при температуре 0°С.

Таблица 1

Результаты исследования влияния добавки Honeywell на величину глубины проникания иглы при 25 °С битума БНД 60/90 Московского НПЗ

Вид битумного вяжущего	1-е значение пенетromетра	2-е значение пенетromетра	Глубина проникания иглы, °П	Среднее значение глубины проникания иглы, °П
БНД 60/90	67	136	71	73
	63	138	75	
	69	142	73	
БНД 60/90 (+1,0%-й Honeywell)	66	120	54	56
	70	127	57	
	71	128	57	
БНД 60/90 (+1,5%-й Honeywell)	65	118	53	54
	69	124	55	
	67	121	54	
БНД 60/90 (+2,0%-й Honeywell)	65	119	54	53
	68	120	52	
	70	123	53	

Таблица 2

Результаты исследования влияния добавки Honeywell на величину глубины проникания иглы при 0 °С битума БНД 60/90 Московского НПЗ

Вид битумного вяжущего	1-е значение пенетromетра	2-е значение пенетromетра	Глубина проникания иглы, °П	Среднее значение глубины проникания иглы, °П
БНД 60/90	71	95	24	25
	69	94	25	
	70	96	26	
БНД 60/90 (+1,0%-й Honeywell)	68	91	23	23
	74	97	23	
	69	92	23	
БНД 60/90 (+1,5%-й Honeywell)	75	97	22	22
	67	90	23	
	70	91	21	
БНД 60/90 (+2,0%-й Honeywell)	77	94	17	18
	73	92	19	
	70	88	18	

**Результаты исследования влияния добавки Honeywell
на температуру размягчения битума БНД 60/90 Московского НПЗ**

Вид битумного вяжущего	Температура размягчения, °С		Среднее значение температуры размягчения, °С
	1-е значение	2-е значение	
БНД 60/90	50,0	50,8	50,4
БНД 60/90 (+1,0%-й Honeywell)	57,8	58,1	57,9
БНД 60/90 (+1,5%-й Honeywell)	63,5	64,5	64,0
БНД 60/90 (+2,0%-й Honeywell)	70,8	71,4	71,1

Таблица 4

**Результаты исследования влияния добавки Honeywell
на величину растяжимости при 25 °С битума БНД 60/90 Московского НПЗ**

Вид битумного вяжущего	Растяжимость, см			Среднее значение растяжимости, см
	1-е значение	2-е значение	3-е значение	
БНД 60/90	94,0	95,0	94,8	94,6
БНД 60/90 (+1,0%-й Honeywell)	38,4	38,5	38,0	38,3
БНД 60/90 (+1,5%-й Honeywell)	35,5	35,2	35,8	35,5
БНД 60/90 (+2,0%-й Honeywell)	27,6	28,2	28,2	28,0

Можно отметить, что при температуре 0 °С также наблюдается уменьшение значения пенетрации, хоть и менее существенное, чем при 25 °С.

Данные, полученные в ходе исследования, дают подтверждение априорного предположения, что введение добавки Honeywell улучшает однородность смеси битума с полимером и увеличивают прочность микроstructures внутримолекулярных связей битума. Все эти выводы обуславливают повышение величины когезии нефтяного дорожного битума марки БНД 60/90.

Один из этапов работы заключался в экспериментальном исследовании влияния концентрации добавки Honeywell на величину температуры размягчения модифицированного битума БНД 60/90. За температуру размягчения битума условно принимается та температура, при которой битум переходит в капельно-текущее состояние в условиях стандартного испытания. Определение температуры размягчения производилось по стандартному методу «кольцо и шар» [4]. Результаты исследования температуры размягчения битума БНД 60/90, модифицированного добавкой, представлены в таблице 3.

Полученные результаты исследования отчетливо показывают, что с увеличением концентрации добавки Honeywell температура размягчения битума повышается. При концентрации добавки в 2 % температура размягчения достигает значения, которое более чем на 40 % превышает температуру размягчения для немодифицированного битума. Это обусловлено более сильным когезионным взаимодействием в структуре вяжущего вещества. Поэтому обоснованно сделан

вывод, что деформационные свойства битума, такие как упругость, усиливаются.

Исследование растяжимости модифицированного битума БНД 60/90 с добавкой Honeywell выполнялось по методике, описанной в [4]. Результаты исследования приведены в таблице 4.

Растяжимость (дуктильность) битума характеризуется расстоянием, на которое его можно вытянуть в нить до разрыва. В таблице 4 просматривается четкая зависимость уменьшения средней величины растяжимости в зависимости от концентрации добавки Honeywell. Этот показатель косвенно характеризует также прилипаемость битума и связан с природой его компонентов. Растяжимость битумов при 25 °С имеет максимальное значение, отвечающее их переходу от состояния ньютоновской жидкости к структурированной.

Исследование адгезионных свойств было проведено с использованием инновационной нанотехнологии. Был использован современный спектрофотометрический метод определения величины адгезии битумного вяжущего к поверхности щебеночного каменного материала. Были проведены экспериментальные исследования по определению адгезии модифицированного битума к поверхности гранитного щебня с использованием спектрофотометра ПЭ-5300В. На рисунке 1 изображена зависимость оптической плотности от показателя адгезии. По вертикальной оси указывается значение оптической плотности исследуемого раствора и определяется величина адгезии по горизонтальной оси.

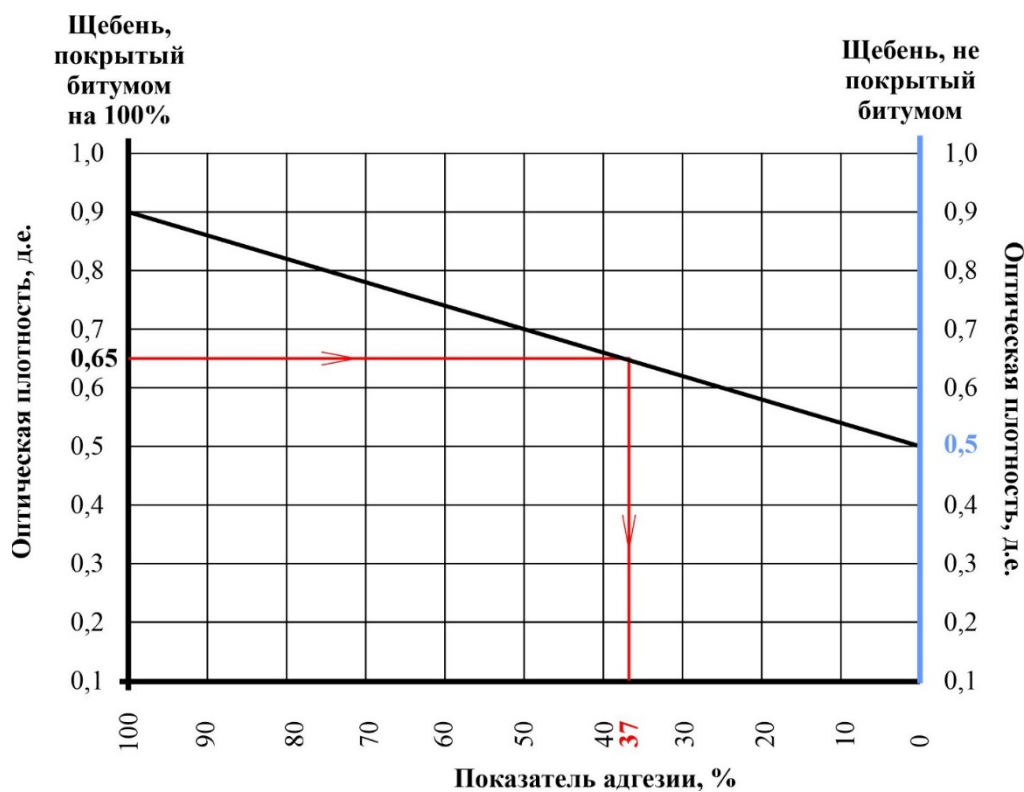


Рис. 1. Графическая зависимость линии адсорбции

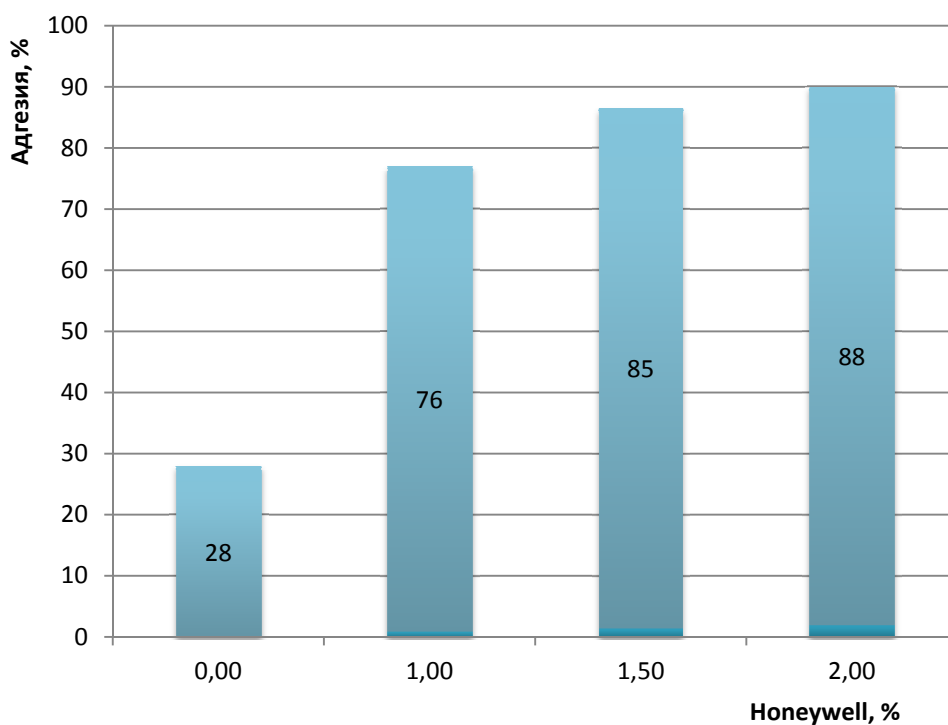


Рис. 2. Влияние добавки Honeywell на величину адгезии БНД 60/90 к поверхности гранитного щебня

Результаты исследования адгезионных свойств композиций битума с бифункциональной добавкой Honeywell отражены в диаграмме, приведенной на рисунке 2. Отчетливо видно, что введение в битум марки БНД 60/90 Московского НПЗ модифицирующей добавки Honeywell увеличивает величину адгезии битумного вяжущего к поверхности гранитного щебня более чем в три раза (с 28 до 88 %).

В заключение следует отметить, что авторами впервые проведено комплексное исследование реологических свойств и адгезии нефтяного битума БНД 60/90 Московского НПЗ модифицированного бифункциональной добавкой Honeywell. Доказано, что при введении добавки Honeywell происходит улучшение когезионных свойств нефтяных битумов, а именно: возрастает вязкость битума, увеличивается

его температура размягчения, уменьшается величина растяжимости модифицированного битума.

Поэтому введение добавки Honeywell значительно увеличивает величину адгезии дорожного битума марки БНД 60/90 Московского НПЗ к поверхности гранитного щебня.

Литература

1. Гуреев, А. А. Производство дорожных битумов в России / А. А. Гуреев // Химия и технология топлив и масел. – 2009. – № 6. – С. 6–8.

2. Высоцкая, М. А. Вяжущее: особенности правильного выбора / М. А. Высоцкая, Д. А. Кузнецов, С. Ю. Русина // Дорожная держава. – 2014. – № 54. – С. 54–57.

3. Модифицирующие присадки к дорожным битумным вяжущим / П. И. Грязнов, Т. Р. Фосс, И. М. Зайдуллин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. – 2012. – Т. 55, № 10. – С. 89–91.

4. ГОСТ 33133-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические требования: издание официальное: утвержден и введен в действие приказом Росстандарта от 29.05.2015 N 520-ст : дата введения 2015-10-01. – Текст : электронный // Техэксперт: информационно-справочная система / Консорциум «Кодекс» (дата обращения: 20.04.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

5. Шорин, В. А. Reliability of Indirect Methods for Evaluation of the Heaving Properties of Soils / В. А. Шорин, Г. Л. Каган, А. Ю. Вельсовский // Soils Mechanics and Foundation Engineering. – 2012. – V. 49, Issue 3. – P. 111–114.

6. Каган, Г. Л. A method for construction of an energy-efficient ice floating pier in the Arctic using hardened ice / Г. Л. Каган, Л. Р. Мухаметова, А. Ю. Вельсовский // E3S Web of Conferences: – 2020. – V. 178. – P. 01064.

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

RESEARCH OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF PETROLEUM ROAD BITUMEN OF MOSCOW REFINERY WITH MODIFIED BIFUNCTIONAL ADDITIVE HONEYWELL

This work is devoted to the study of factors that improve the properties of petroleum road bitumen, in particular, the degree of influence of modifying additives. The objects of the study were road bitumen of the BND 69/90 brand of Moscow Refinery and a promising modifying bifunctional additive Honeywell. For the first time, a comprehensive study of the rheological and adhesive properties of road bitumen modified with the addition of Honeywell was carried out. Clear correlative relationships of the influence of the concentration of the Honeywell additive on the viscosity, softening temperature, ductility and the amount of adhesion of modified bitumen were revealed.

Petroleum road bitumen, modifying additives, rheological properties, viscosity, softening temperature, ductility, spectrophotometric method, cohesion, bitumen adhesion.

УДК 697.911



Н.А. Кудрин, Н.С. Григорьев
Вологодский государственный университет

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ КРЫЛЬЧАТКИ ВЕНТИЛЯТОРА В СООТВЕТСТВИИ С ТРЕБОВАНИЯМИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

В статье представлены результаты расчетов по оптимизации конструктивных параметров крыльчатки вентилятора, предложена новая форма лопасти и по ее трехмерной модели методом моделирования потоковых процессов в текучей среде определено их оптимальное число по критерию производительности.

Система вентиляции, вентилятор, конструкция, расчет, производительность.

Задача роста производительности оборудования и оптимизации затрат при его эксплуатации является важным фактором конкурентных преимуществ продукции. В статье рассматривается задача обеспечения максимального потока воздуха в системах охлаждения путем изменения геометрии лопасти крыльчатки вентилятора при сохранении заданных параметров мощности.

В настоящее время для проведения вычислительных экспериментов все больше используются методы нелинейного конечно-элементного анализа (FEA – Finite Element Analysis) и моделирования потоковых процессов в текучей среде (CFD-анализ). Одним из средств выполнения данных задач является вычислительный инструмент SOLIDWORKS Flow Simulation фирмы Dassault Systems.

Исходными данными для расчета является 3D-модель крыльчатки с пятью лопастями, представленная на рисунке 1.

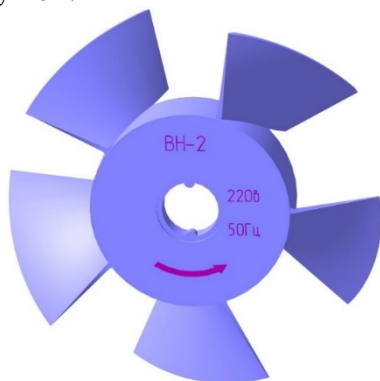


Рис. 1. 3D-модель крыльчатки с пятью лопастями

Суть расчета заключается в построении траекторий потока газа, проходящего через вентилятор, вращающийся со скоростью 2200 об/мин, и в вычислении характеристик этого потока.

Моделирование происходит в расчетной области размером 160 мм × 160 мм × 400 мм, разбитой на сетку элементов, в которую помещен вентилятор (рис. 2). В качестве газа выбираем воздух. Задаются внешние условия, такие как давление, равное нормальному давлению в 101 325 Па, и температура воздуха 20 °С. Граничным условием в данной системе является внутренняя цилиндрическая поверхность корпуса

50

вентилятора, которая представляется реальной стенкой и имеет статус статора.

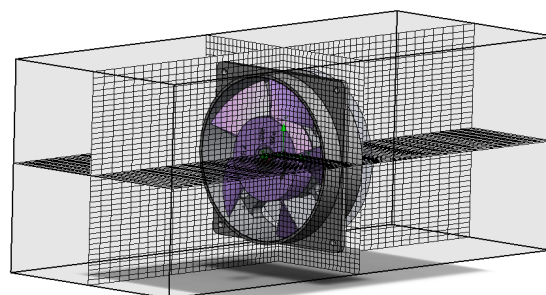


Рис. 2. Область моделирования

Результат расчета представлен на рисунке 3.

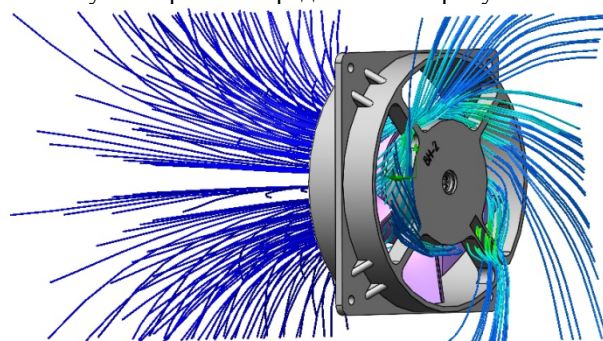


Рис. 3. Эюра скорости потока воздуха, проходящего через исходную крыльчатку

Изменим конструкцию лопасти крыльчатки вентилятора по рекомендациям фирмы Jamicon (рис. 4) [1].

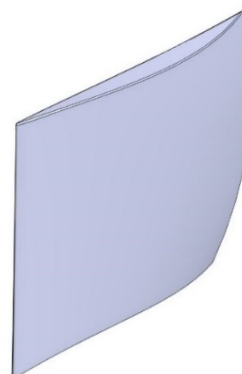


Рис. 4. Лопасть разрабатываемой крыльчатки

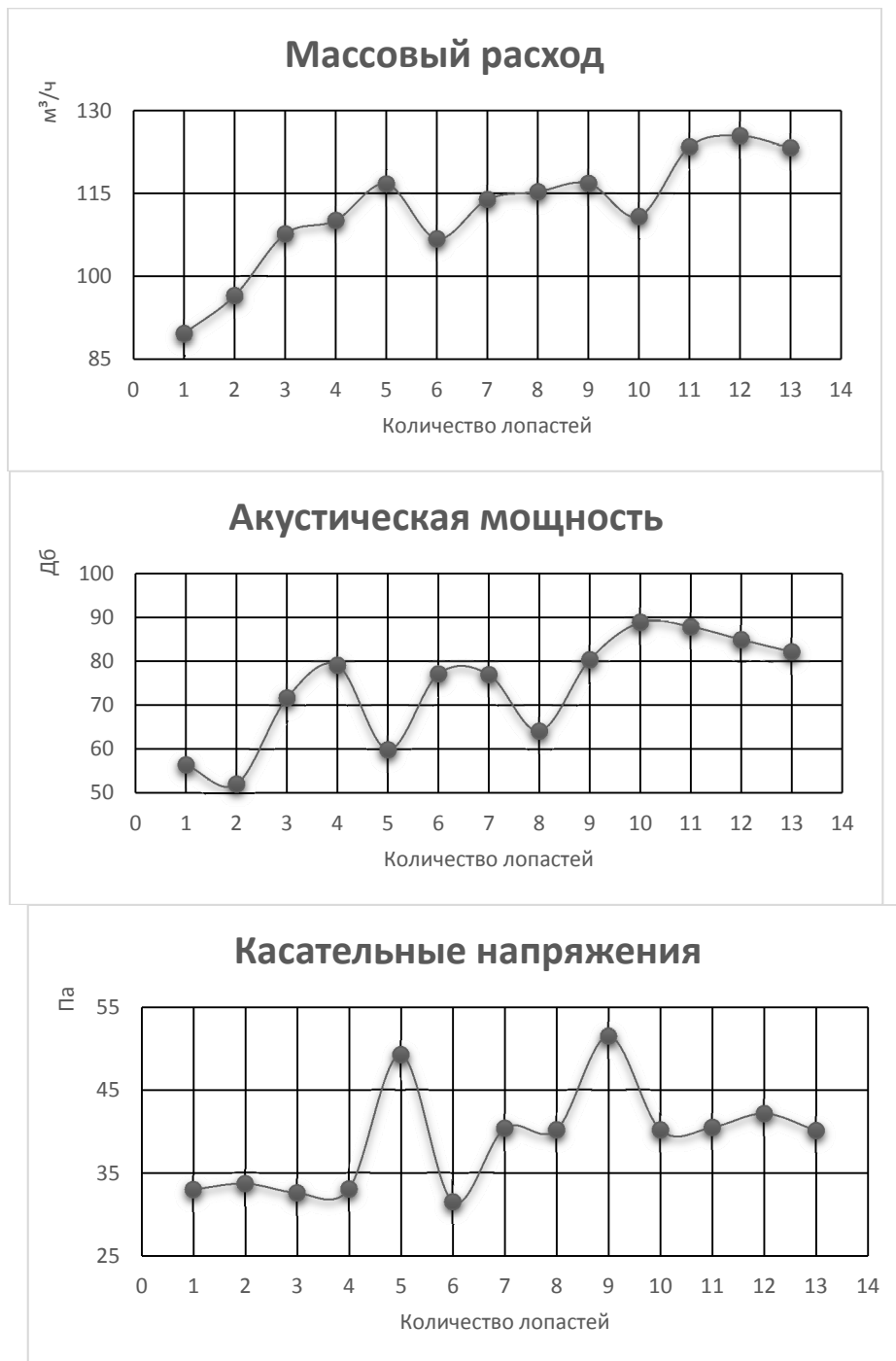


Рис. 5. Графики зависимостей рабочих характеристик крыльчаток от количества лопастей

Проведем расчет для крыльчаток с различным количеством лопастей для выбора оптимального варианта и сравним его с базовой крыльчаткой. Сравнение основных расчетных характеристик крыльчаток представлено на рисунке 5.

Из графика видно, что при конструкции, имеющей 7 лопастей, достигается высокий уровень объемного расхода воздуха и низкий уровень акустической мощности. Крыльчатки, имеющие 10 и 14 лопастей, также показывают высокий уровень объемного расхода воздуха, но при этом и создаваемый ими уровень акустической мощности выше, а это основная характеристика, которую требуется понизить. Исходя из этого, для конструирования крыльчатки выбираем конструкцию, которая имеет 7 лопастей (рис. 6).



Рис. 6. Модель разрабатываемой крыльчатки

Таблица 1

Результат расчета объемного расхода воздуха

Крыльчатка	Значение	Выполнение процесса	Критерии	Дельта
Оригинальная	97,1077 м ³ /ч	100	8,68472603	8,4565175
Модернизированная	107,6938 м ³ /ч	100	8,84684210	8,6573271

Таблица 2

Результат расчета характеристик потоков

Крыльчатка	Оригинальная		Модернизированная	
	Минимум	Максимум	Минимум	Максимум
Давление, Па	101161,22	101460,12	100885,74	102428,34
Скорость, м/с	0	20,923	0	28,765
Завихренность, 1/с	1,43e-0,3	4256,30	3,39e-0,3	24857,95
Скорость во вращающейся системе координат, м/с	0	14,535	0	28,765
Число Маха	0	0,6	0	0,8
Касательное напряжение, Па	0	20,64	0	16,73
Относительное давление, Па	-163,78	135,12	-439,26	1103,34
Уровень акустической мощности, дБ	0	83,87	0	50,58

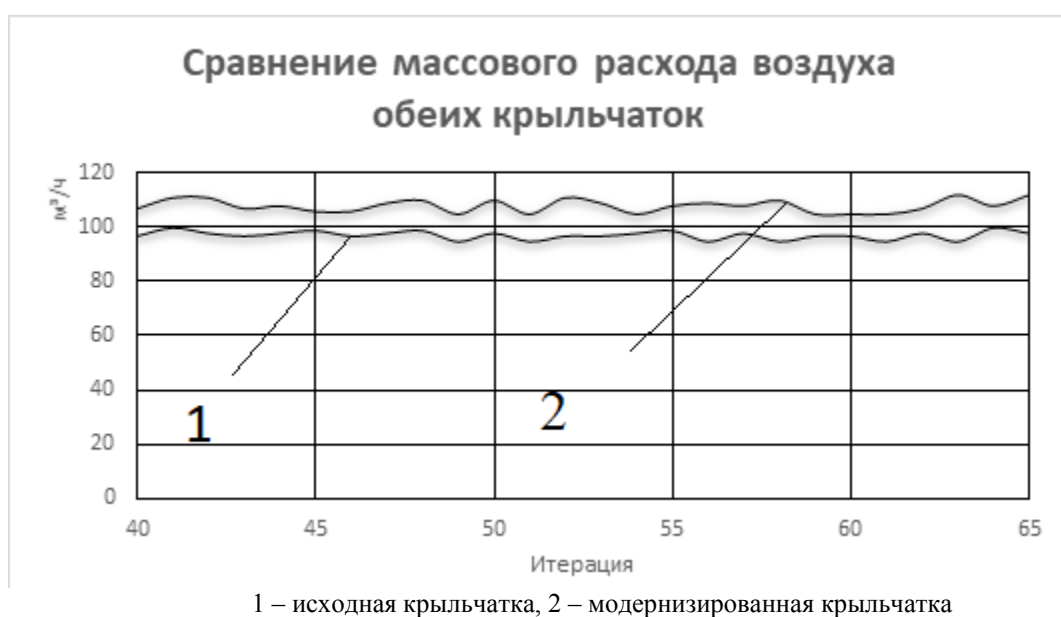


Рис. 7. Сравнение объемных расходов воздуха обеих крыльчаток в зависимости от итерации расчета

Далее проводится сравнение характеристик новой и исходной крыльчаток. Из расчетов получено, что скорость потока в модели с новой крыльчаткой выше, чем с оригинальной.

Главной характеристикой производительности вентилятора является объемный расход воздуха – это объем газа, проходящего через поперечное сечение потока в единицу времени. Результат расчета объемного расхода воздуха для обеих крыльчаток представлен в таблице 1.

Сравнение результатов расчетных характеристик потоков воздуха для обеих крыльчаток представлено в таблице 2.

Имитационное моделирование характеристик потока показало, что новая крыльчатка выигрывает по всем показателям.

На графике, представленном на рисунке 7, показано сравнение объемных расходов воздуха обеих крыльчаток в зависимости от итерации расчета. По нему можно проанализировать, как ведет себя характеристика объемного расхода воздуха во времени. Из графика видно, что сначала объемный расход воздуха модернизированной крыльчатки меньше, чем у оригинальной, но когда поток воздуха стабилизируется, объемный расход воздуха модернизированной крыльчатки становится выше, чем у оригинальной, и выравнивается.

Итак, по результатам расчетов видно, что объемный расход воздуха у новой крыльчатки выше на 9,83 %, касательные напряжения снижены на 18,94 %, а также уровень акустической мощности снижен на 39,69 %.

Показанный способ оптимизации конструкции крыльчатки вентилятора позволяет значительно

улучшить его характеристики в соответствии с требованиями производительности.

Литература

1. Конструкция крыльчатки вентилятора. Свободный софт. – URL: <https://vmashtabe.ru/free/ventilyator-jf-0925b2h-r-f-jamicon.html> (дата обращения: 27.10. 2021). – Текст : электронный.

N.A. Kudrin, N.S. Grigoriev
Vologda State University

OPTIMIZING FAN IMPELLER DESIGN TO MEET PERFORMANCE REQUIREMENTS

The article presents the results of calculations on optimization of design parameters of the fan impeller, proposes a new shape of the blade and, according to its three-dimensional model, determines their optimal number by the performance criterion with the help of the method of modeling flow processes in a fluid medium.

Ventilation system, fan, design, calculation, performance.



А.В. Колобов
 ООО «Севергрупп»,
Е.М. Игумнов
 Бизнес-системы «Свеза»

УПРАВЛЕНИЕ ПРОДУКТОВЫМИ ИННОВАЦИЯМИ КАК ЭВОЛЮЦИОННЫЙ ЭЛЕМЕНТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ БИЗНЕС-СИСТЕМЫ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ МНОГООТРАСЛЕВОГО ХОЛДИНГА

В статье описывается одно из новых направлений в развитии гибкого управления проектами – Agile-подход, его основные отличия от традиционного подхода. Показаны этапы адаптации инструмента на примере крупной промышленной компании многоотраслевого холдинга, даны рекомендации по формированию необходимых условий и инфраструктуры.

Гибкие методы управления проектами, agile, scrum-мастер, отраслевые команды, waterfall.

В настоящее время компании работают в сложной среде с постоянными изменениями, заставляющими их постоянно стремиться к новым инструментам и методам, необходимым для повышения производительности, улучшения качества, удовлетворенности клиентов и создания конкурентных преимуществ. Эти инструменты должны затрагивать максимальное количество различных бизнес-процессов, реализуемых организационной единицей для достижения ее стратегических целей. Набор данных процессов также называют бизнес-системой. Одним из многообещающих подходов для достижения организационных целей является применение различных инструментов (методов и практик) повышения эффективности бизнес-системы [1]. Большой накопленный опыт внедрения доказывает их результативность при повышении операционной эффективности компаний [2–4]. За это время было предложено множество инструментов и способов их адаптации под различные условия внедрения. Они позволяют выявить недостатки и резервы в бизнес-процессах компании, идентифицировать их сущность, а порой обнаружить причины серьезного конкурентно-

го отставания, давая при этом сотрудникам эффективные варианты корректирующих действий.

Для обеспечения системной работы по повышению эффективности бизнес-системы, направленной на обеспечение конкурентоспособности компании, целесообразно выделить следующие функции:

1. Выстраивание системы целеполагания.
2. Диагностика текущего состояния и оценка потенциала повышения эффективности.
3. Выбор инструментов повышения эффективности бизнес-системы.
4. Распределение ресурсов для получения максимального эффекта.
5. Разворачивание проекта и внедрение изменений.

Фокус нашего внимания в данном исследовании в первую очередь обращен на функцию целеполагания. Выбор ключевых зон для повышения конкурентоспособности компании делается исходя из целевого значения показателя совокупного дохода акционеров (Total Shareholder Return, TSR), рычагов 2-го уровня зоны стратегического хозяйствования (качество продукции) и рычагов управления (новый вид продукции) (рис. 1).



Рис. 1. Дерево драйверов TSR

		Мультипликатор						
		3	4	5	6	7	8	9
ЕБИТДА	1000	73%	82%	91%	100%	109%	118%	127%
	1100	84%	93%	102%	111%	120%	129%	138%
	1200	95%	104%	113%	122%	131%	140%	149%
	1300	106%	115%	124%	133%	142%	151%	160%
	1400	117%	126%	135%	144%	153%	162%	171%
	1500	128%	137%	146%	155%	164%	173%	182%
	1600	139%	148%	157%	166%	175%	184%	193%
	1700	150%	159%	168%	177%	186%	195%	204%
	1800	161%	170%	179%	188%	197%	206%	215%
	1900	172%	181%	190%	199%	208%	217%	226%
2000	183%	192%	201%	210%	219%	228%	237%	

XX Значение показателя TSR лучше, чем у Конкурента 1

XX Значение показателя TSR лучше, чем у Конкурента 2

Рис. 2. Таблица чувствительности TSR

Данный показатель отражает, насколько успешно компания обеспечивает доход акционерам и делает компанию привлекательной для инвесторов. Как видно из дерева драйверов TSR (рис. 1), одним из рычагов управления выручкой является новый вид продукции. Именно такой вид решения для клиента позволяет получить дополнительную маржинальность. Традиционно разработка нового вида продукции входит в периметр ответственности R&D и может занимать многие годы. В металлургической отрасли время вывода на рынок (Lead Time) нового вида продукции достигает 7 лет (в зависимости от сложности и инновационности требований клиента), что в существующих экономических условиях было неприемлемо. Это явилось толчком для пилотирования нового подхода гибкого управления разработкой нового вида продукции «А» с помощью Agile-подхода. В данной статье раскрывается процесс управления организационными процессами продуктовых инноваций, описываются основные понятия и алгоритм гибких методов управления формированием продукта под клиента, что позволяет контролировать TSR и внимание инвесторов.

Из-за высокой конкуренции на рынке целевые значения TSR необходимо определять относительно конкурентов. Постановка целей базируется на достижении максимального на рынке значения показателя TSR. Этот показатель также был выбран по той причине, что по нему можно получить данные и аналитику от крупных инвестиционных банков, например Goldman Sachs [5]. Это позволяет моделировать и прогнозировать данный показатель.

Сначала осуществляется оценка и прогнозирование данного показателя и его динамики у конкурентов. При этом учитываются проекты по снижению затрат, рост мультипликатора, снижение долга, дополнительная плановая ЕБИТДА от CAPEX-проектов, макротренды на рассматриваемых рынках металлопродукции и сырья, курсы валют. Для достижения требуемого значения TSR компании необходимо повышать ЕБИТДА и Multiple (мультипликатор). Для

выбора оптимальных целевых значений этих показателей строится таблица чувствительности TSR (рис. 2).

Цель считается амбициозной, если она позволяет обогнать конкурентов по показателю TSR. Целевое значение мультипликатора целесообразно брать на основе прироста прошлого периода. В зависимости от текущего уровня ЕБИТДА компании и найденного теоретически достижимого потенциала возможны три варианта:

1. Если компания и так является лидером рынка и ей не требуется опережать конкурентов, то в качестве амбициозной цели по ЕБИТДА используется теоретически достижимый потенциал на базе существующей технологии.

2. Если найденного теоретически достижимого потенциала на базе существующей технологии достаточно для того, чтобы опередить конкурентов, то его значение используется в качестве амбициозной цели по ЕБИТДА. При этом в качестве цели берется весь теоретически достижимый потенциал, даже если для того, чтобы обогнать конкурентов, не требуется достигать его полностью.

3. Если найденного теоретически достижимого потенциала на базе существующей технологии недостаточно для того, чтобы опередить конкурентов, то в значении амбициозной цели по ЕБИТДА включают и эффект от использования альтернативных (прорывных технологий).

Полученная амбициозная цель декомпозируется для каждого подразделения пропорционально значению теоретического потенциала.

В современном мире скорость реагирования на волатильность требований рынка выходит на совершенно новый уровень. Глобальная диджитализация всех индустрий, высокая степень конкуренции и стремление предложить продукт с уникальными характеристиками подталкивают компании искать новые подходы разработки инновационных продуктов и решений. Гибкая клиентоцентрированная модель управления является одним из инструментов, позво-

ляющих компании сформировать конкурентное преимущество реагирования на изменчивые требования рынка и кастомизации под запросы конкретных клиентов [7]. Это позволяет обновить систему гибкого управления инновационными проектами и инициативами. Несмотря на то, что концепции гибких методов управления Agile в управлении проектами около 30 лет, необходима адаптация подхода к текущим условиям компании. И тем не менее реальная практика предприятий, реализующих данные методы, показывает их эффективность и результативность относительно классических способов проектного управления при разработке новых видов продукции. Данные примеры демонстрируют, что вне зависимости от отрасли или направления деятельности предприятия, правильная адаптация системы управления и применение гибких методов управления, порядок их внедрения и использования способны обеспечить эффективное развитие как проекта, так и бизнеса в целом.

Для примера, отчет «Состояние гибких методов» (State of Agile) 2018 г. показал следующие средние результаты по компаниям, внедряющим и применяющим Agile-менеджмент в своей деятельности: 71 % – улучшение управления изменениями, 65 % – адаптация технологий для целей бизнеса, 62 % – ускорение вывода продукта на рынок, 61 % – рост производительности труда рабочих групп.

Преимущества гибких методов представляют собой значимый инструмент развития компании в современных условиях [6]. Этот инструмент многогранен, адаптивен, демонстрирует гибкость относительно проблематики современного управления и бизнеса в условиях рынка, когда ориентация на клиента и его постоянно меняющиеся потребности являются одним из главных драйверов конкурентоспособности предприятия.

Концепциям гибких подходов к построению системы управления и их реализации посвящены современные исследования: в работах Х. Такеучи и И. Нонаки, Дж. Хайсмита, Г. Аллемана, Г. Чина, А. Кокберна, К. Швабера, К. Ульриха, С. Эппинджера, П. Фаулера, К. Бека, Дж. Сазерленда и др. [9–12].

Стоит отметить, что данные работы не отражают применение концепции Agile относительно клиентоцентричной концепции в рамках современной инновационной экономики в части разработки продукта. На данный момент можно отметить, что в недостаточной степени изучены проблемы, касающиеся внедрения семейства гибких персонифицированных подходов с учетом специфики видов деятельности предприятия; факторов успешного внедрения гибких подходов в предприятия; ошибок и причин возникновения проблем при проведении Agile-трансформации. Можно отметить недостаточный анализ практик внедрения гибких клиентоцентричных подходов в системе управления предприятия; отсутствие подробного методического инструментария оценки Agile-трансформации предприятия и методических рекомендаций по развитию системы гибкого менеджмента предприятия с точки зрения регулирования инновационного развития и кастомизации управления.

Agile – это название методики управления проектами, в которой проект разделен на несколько мелких частей, которые будут завершены к определенному

сроку, вместо длительного выполнения всего проекта. Применяется как эффективная практика организации труда небольших групп (например, команда по разработке нового вида продукта «А»). Большинство гибких методологий нацелены на минимизацию рисков путем сведения создания проекта к серии коротких циклов, называемых итерациями (этапами), которые обычно длятся две-три недели. Каждый этап включает все процедуры, необходимые для достижения цели, поставленной на данный спринт (планирование, анализ требований, проектирование, моделирование, экспериментирование, сбор обратной связи). Хотя отдельный этап недостаточен для выпуска новой версии продукта, подразумевается, что минимально жизнеспособный продукт (MVP) готов к выпуску в конце каждого спринта. По окончании каждого этапа команда выполняет переоценку приоритетов разработки. Agile-команда включает в себя различные роли (не должности). Например, владелец продукта (productowner) определяет требования к продукту. Также в команде есть еще ряд ролей, таких как scrum-мастер, тестировщики, дизайнеры технических решений и т.д. Подход Agile подразумевает возможность уделять особое внимание формированию команд, проведению работы не на длительный период, а на короткую перспективу. При использовании данной методологии обеспечивается система обратной связи, благодаря чему можно производить корректировки очень быстро. В результате применения данного подхода улучшается внутрикорпоративная коммуникация, уменьшается количество конфликтов внутри организации, эффективность выполнения проектов увеличивается.

Все принципы Agile можно структурировать следующим образом:

1. Удовлетворенность клиентов за счет ранней и непрерывной поставки программного обеспечения. Клиенты более счастливы, когда они получают рабочее программное обеспечение через регулярные промежутки времени.
2. Возможность внесения изменений требований к продукту на протяжении всего процесса разработки.
3. Частая поставка рабочего программного обеспечения (каждый месяц, две недели, неделю и т.д.).
4. Сотрудничество между заинтересованными сторонами (заказчиком и разработчиками) на протяжении всего проекта.
5. Поддержка, доверие и мотивация вовлеченных людей. Мотивированные команды с большей вероятностью выполняют свою лучшую работу, чем сотрудники, недовольные условиями труда.
6. Взаимодействие лицом к лицу. Коммуникация более успешна, когда команды разработчиков имеют возможность общаться напрямую.
7. Рабочее программное обеспечение является основной мерой прогресса. Предоставление функционального программного обеспечения клиенту является конечным фактором, который измеряет прогресс.
8. Поддержка постоянного темпа работы. Команды устанавливают повторяемую и поддерживаемую скорость работы, с которой они могут доставлять функционирующее программное обеспечение.
9. Внимание к техническим деталям и дизайну. Правильные навыки и хороший дизайн позволяют

команде поддерживать темп, постоянно совершенствовать продукт и работать над изменениями.

10. Простота внедрения. Квалифицированные и мотивированные члены команды, которые обладают полномочиями принимать решения, регулярно общаются с другими членами команды и обмениваются идеями, которые обеспечат создание качественного продукта.

11. Постоянная адаптация к изменяющимся условиям, что поможет сделать продукт более конкурентоспособным на рынке.

Основой метода гибкого управления проектами является ряд ключевых элементов:

1. Визуальный контроль. Участники проекта в ходе работы над проектом используют карточки различных цветов и видов, которые сигнализируют, какой элемент конечного продукта уже разработан, спланирован, завершен и т.д. Таким образом, команда имеет наглядное представление о существующем положении дел. Визуальный контроль обеспечивает одинаковое видение проекта каждым из участников.

2. Совместность. Все участники проекта работают рядом, включая клиента. Такой подход не только ускоряет многие процессы, связанные с информированием участников рабочей группы, исключает возможность потери информации и непонимания целей, но и создает благоприятную атмосферу для сотрудничества и эффективной работы. Также прозрачность всех процессов позволяет моментально исключать появившиеся проблемы и находить удачные решения.

3. Адаптируемое управление. Руководитель проекта – не человек, который раздает указания, а лидер, определяющий основные правила работы и сотрудничества.

4. Дробление процесса: работа, основанная на разделении общего объема проекта на составные части. Такая система работы значительно снижает сложность проекта и позволяет командам сфокусироваться на каждой части в отдельности.

5. Работа над ошибками. В ходе работы одного цикла команда осваивает новые навыки и анализирует произошедшие ошибки, что исключает их появление в следующем цикле.

6. Спринты и ежедневные встречи. Спринты – отрезки времени, за которые команда выполняет ряд задач, – позволяют четко видеть результаты работы.

Agile – семейство гибких итеративно инкрементальных методов к управлению проектами и продуктами. Согласно данному подходу, проект разбивается не на последовательные фазы, а на маленькие подпроекты, которые затем «собираются» в готовый продукт. Схема работы приведена на рисунке 2.

5 этапов традиционного использования Agile [11]:

Этап 1. Инициация. Руководитель проекта и команда определяют требования к проекту. На данном этапе часто проводятся совещания и «мозговые штурмы», на которых определяется, что же должен представлять из себя продукт проекта.

Этап 2. Планирование. На данном этапе команда решает, как она будет достигать цели, поставленной на предыдущем этапе; уточняет и детализирует цели и результаты проекта, а также состав работ по нему. На основании данной информации команда формирует календарный план и бюджет, оценивает риски и выявляет заинтересованные стороны.

Этап 3. Разработка. Данная стадия является частью фазы планирования. В фазе разработки, характерной для технологических проектов, определяется конфигурация будущего продукта и технические способы его достижения.

Этап 4. Реализация и тестирование. В этой фазе происходит основная работа по созданию нового продукта. Следуя разработанным планам, команда начинает создавать содержание проекта, проводится контроль по выбранным метрикам.

Во второй части данной фазы происходит тестирование продукта, он проверяется на соответствие требованиям заказчика и заинтересованных сторон. В части тестирования выявляются и исправляются недостатки продукта.

Этап 5. Мониторинг и завершение проекта. В зависимости от проекта данная фаза может состоять из простой передачи заказчику результатов проекта или же из длительного процесса взаимодействия с клиентами по улучшению проекта, повышению их удовлетворенности и поддержке результатов проекта.

Agile-методология



Рис. 2. Цикл по принципу Agile

Пример практического применения Agile. При разработке продукта «А» за основу был взят классический процессный фреймворк Scrum (методология, помогающая командам вести совместную работу). Понятия Scrum и Agile часто путают, потому что Scrum строится вокруг идеи о постоянном совершенствовании, которое является главным принципом Agile. И все же Scrum – это методология работы, а Agile – это образ мышления. Перейти на Agile не так просто; вся команда должна стремиться изменить свой подход к созданию ценности для клиентов. Но в качестве первых шагов можно просто начать использовать методологию Scrum. Это направит мышление в нужное русло и поможет практиковать принципы Agile в повседневном общении и работе. Именно благодаря Scrum руководители могут держать ситуацию под контролем, в максимально короткие сроки находить новые идеи, которые в дальнейшем реализуются и предоставляются пользователям [8].

AgileScrum – это самоуправляемая команда, где все равны и нет боссов, где каждая идея ценится и обсуждается, где все решается путем совместного голосования. В классическом Scrum существует 3 базовых роли:

- 1) владелец продукта (Product owner);
- 2) скрам-мастер (Scrum master);
- 3) команда разработки (Development team).

Владелец продукта является связующим звеном между командой разработки и заказчиком. Задача владельца продукта – максимальное увеличение ценности разрабатываемого продукта и работы команды. Одним из основных инструментов владельца продукта является перечень задач или продуктовый бэклог (Product Backlog).

Scrum master является «служащим лидером» (servant-leader). Задача Scrum master – помочь команде максимизировать ее эффективность посредством устранения блокираторов, помощи, обучения и мотивации команды, помощи владельцу продукта.

Команда разработки (Development team) состоит из специалистов, производящих непосредственную работу над производимым продуктом. Согласно The Scrum Guide (документу, являющимся официальным описанием Scrum от его авторов), она должна обладать следующими качествами и характеристиками:

- быть самоорганизующейся: никто не может указывать команде как преобразовать перечень задач в работающий продукт;

- быть многофункциональной: обладать всеми необходимыми навыками для выпуска работающего продукта;

- быть ответственной коллективно: за выполняемую работу отвечает вся команда, а не индивидуальные члены команды;

Рекомендуемый размер команды – 7 человек (плюс/минус 2).

Согласно идеологам Scrum, команды большего размера требуют слишком больших ресурсов на коммуникации, в то время как команды меньшего размера повышают риски (за счет возможного отсутствия требуемых навыков) и уменьшают размер работы, который команда может выполнить в единицу времени.

Основой Scrum является спринт (Sprint), в течение которого выполняется работа над продуктом. По окончании спринта должна быть получена новая рабочая версия продукта. Спринт всегда ограничен по времени (1–4 недели) и имеет одинаковую продолжительность на протяжении всей жизни продукта. Перед началом каждого спринта производится планирование, на котором оценивается содержимое бэклога. Каждый спринт должен иметь цель, которая является мотивирующим фактором и достигается с помощью выполнения задач из текущего спринта. Каждый день проводится оперативная встреча (Daily Scrum), на которой каждый член команды отвечает на вопросы «что я сделал вчера?», «что я планирую сделать сегодня?», «какие препятствия в своей работе я встретил?». Задача Daily Scrum – определение статуса и прогресса работы над спринтом, раннее обнаружение возникших препятствий, выработка решений по изменению стратегии, необходимых для достижения целей спринта. По окончании спринта производится обзор и ретроспектива (Sprint Review и Sprint Retrospective), задачи которых – оценить эффективность (производительность) команды в прошедшем спринте, спрогнозировать ожидаемую эффективность (производительность) в следующем спринте, выявить имеющиеся проблемы, оценить вероятности завершения всех необходимых работ по продукту и др.

Как уже было сказано, при разработке нового продукта «А» за основу был взят классический процессный фреймворк Scrum. Использовали все его основные атрибуты, которые были описаны выше. Была сформирована кроссфункциональная команда из специалистов по технологии, продажам, маркетингу и службы технической поддержки клиентов. Для продукта был сформирован бэклог, команды работали совместно двухнедельными итерациями, каждый день собирались у доски для проведения оперативных встреч. В конце спринта проводили обзоры и обязательные ретроспективы. Эффект от применения данного подхода был виден практически с самого начала. Команды совместно работали над генерацией гипотез, планированием и проведением экспериментов. При этом участники пилотных команд не были выделены на 100 %. Было организовано тесное взаимодействие с клиентами, которые итерационно корректировали MVP продукта, проводили совместные эксперименты и исследования, собирали обратную связь после переработок опытных партий.

Далее в фокус внимания было добавлено построение экосистемы вокруг команд для оказания поддержки на всех управленческих уровнях. Команды сталкивались с блокираторами: начиная от элементарного взаимодействия с сервисными функциями, заканчивая проведением экспериментов (очень сложно включить опытное производство в четко спланированный производственный поток). Роль модератора по выявлению и снятию блокираторов выполнял Scrum master, используя специальную площадку для эскалации и решения проблем – Meta Scrum.

Основным значимым результатом использования гибкого метода стало сокращение времени вывода нового вида продукта с 3 лет до 8 месяцев. Также важными показателями изменений стала полная

укомплектованность всеми необходимыми компетенциями для обеспечения процесса вывода нового вида продукции, высокая степень прозрачности и доверия в команде, эффективное управление всем портфелем продуктов. Быстрый вывод продукта на рынок позволил занять новые ниши (ветроэнергетика, криогенная сталь) и развить новые бизнес-модели (платформенные решения в кровле).

Таким образом, предлагается использовать методику внедрения Agile-подходов в системе управления создания новых видов продукции предприятия. Предлагаемый подход направлен на формирование перехода к гибким методам в совокупности с реализацией клиентоцентричной концепции, что необходимо в условиях нарастающей конкуренции и инновационных требований на рынках. Реализация предложенных в работе рекомендаций и методик позволит сократить время вывода продукта на рынок, обеспечить повышение конкурентоспособности компаний.

Литература

1. Глухов, В. В. Производственный менеджмент. Анатомия резервов. Lean production : учебное пособие / В. В. Глухов, Е. С. Балашова. – Санкт-Петербург : Лань, 2008. – 352 с.
2. Глухов, В. В. Производственный менеджмент. Анатомия резервов. Lean production: учебное пособие / В. В. Глухов, Е. С. Балашова. – Санкт-Петербург : Лань, 2008. – 354 с.
3. Обеспечение устойчивости процесса развития бизнес-системы предприятия / Колобов А. В., Глухов В. В., Петреня Ю. К., Игумнов Е. М. – DOI: 10.18721/JE.11509 // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. – 2018. – Т. 11, № 5. – С. 101–110.
4. Kumar, V. S., Implementation of Lean Tools and Techniques in an Automotive Industry / D. S. Kumar, S. S. Abuthakeer // J. Appl. Sci. – Oct. 2012. – vol. 12, No. 10. – P. 1032–1037.
5. Горшков, Р. К. Анализ существующих методов оценки конкурентоспособности предприятия / Р. К. Горшков // РИСК Ресурсы, информация, снабжение, конкуренция. – 2010. – № 2. – С. 114–117.
6. Самоукина, М. В. Эффективная мотивация персонала при минимальных финансовых затратах / М. В. Самоукина. – Москва : Вершина, 2008. – 224 с.
7. Черноруцкий, И. Г. Методы принятия решений: учебник / И. Г. Черноруцкий. – 2-е изд. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2010. – 416 с.
8. Коул, Дж. Управление персоналом в современных организациях / Дж. Коул. – Москва : Вершина, 2004. – 352 с.
9. Сазерленд, Д. Scrum. Революционный метод управления проектами / Д. Сазерленд. – 2-е изд. – Москва : Манн, Иванов и Фербер, 2017. – 272 с.
10. Грин, Д. Постигая Agile / Д. Грин, Э. Стеллман. – Москва : Манн, Иванов и Фербер, 2019. – 441 с.
11. Аддкинс, Л. Коучинг agile-команд. Руководство для scrum-мастеров, agile-коучей и руководителей проектов в переходный период / Л. Аддкинс. – Москва : Манн, Иванов и Фербер, 2017. – 416 с.
12. Шохова, З. Путь скрам-мастера / З. Шохова. – Москва : Манн, Иванов и Фербер, 2018. – 160 с.

A.V. Kolobov
Severgroup LLC,
E.M. Igumnov
Business systems "Sveza"

PRODUCT INNOVATIONS MANAGEMENT AS AN EVOLUTIONARY ELEMENT OF IMPROVING THE BUSINESS SYSTEM IN MULTIFUNCTIONAL HOLDING ENTERPRISES

The article describes one of the new directions in the development of agile project management - the Agile approach, its main differences from the traditional approach. The stages of adaptation of the tool are shown on the example of a large industrial company of a diversified holding, recommendations are given on the formation of the necessary conditions and infrastructure.

Agile project management, agile, scrum master, industry teams, waterfall.



ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ АСПЕКТ ПРОМЫШЛЕННОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ ВИРТУАЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

В статье представлены элементы решений, необходимые для эффективной кластеризации технологической подготовки производства на основе виртуальных предприятий. Рассматривается технологический аспект промышленной кластеризации, который необходимо воплотить для успешной промышленной кластеризации, осуществляемой в рамках единого информационного пространства, построенного на основе PLM-системы.

Промышленная кластеризация, виртуальные предприятия, САРР-системы.

В настоящее время на территории Российской Федерации работает огромное количество небольших машиностроительных предприятий, образовавшихся на месте обанкротившихся крупных промышленных заводов. Данные организации в массе своей обладают весьма ограниченными технологическими возможностями и устаревшей инфраструктурой подготовки производства. Создание устойчивых кооперационных связей в форме промышленного кластера с единым информационным пространством на основе виртуального предприятия решило бы обе эти проблемы.

Формирование промышленного кластера – многогранный и многоступенчатый процесс, способный принести немалую пользу даже не будучи законченным. Он особенно эффективен при кооперировании малых индустриальных предприятий. В первую очередь потому, что небольшие организации банально неспособны обеспечить сколь-либо широкую номенклатуру технологических решений сами по себе, а следовательно, возможность разделить сложный заказ с другим заводом является вопросом не дележа прибыли, но самой возможности выполнения данного заказа. И пусть подобного рода сотрудничество может осуществляться без какого-либо объединения, сугубо в виде договора между независимыми агентами, формирование устойчивой кооперационной связи несомненно повысит эффективность работы всех участников кластера [1, 2].

Технологический аспект промышленной кластеризации осуществляется в рамках единого информационного пространства, построенного на основе PLM-системы «Лоцман» от корпорации «Аскон» как наиболее перспективном программном продукте для существующей на российском рынке среды [3, 4]. В качестве основы промышленного кластера предлагается САРР-система «Вертикаль» от корпорации «Аскон».

После осуществления конструкторской подготовки производства и получения технологами законченного пакета конструкторской документации осуществляется проектирование технологических маршрутов в САРР ТП – следующая ступень подготовительного периода. К задачам автоматизированной технологиче-

ской подготовки производства (ТПП) относятся определение методов и способов обработки деталей, выполнение требований технологичности изготовления изделия и сборки конструкции.

Процесс технологической подготовки производства начинается с момента получения задания на проектирование, продолжается при управлении технологическими изменениями и оформлением заявок на разработку средств технического оснащения (приспособлений, оснастки). Сюда входят разделы по проектированию управляющих программ (УП) для оборудования с ЧПУ и финальный этап сдачи задания.

Поддержка технологической подготовки производства обеспечивается наличием многопрофильных, структурированных и постоянно расширяющихся баз данных [5]. Их накопление и пополнение с целью привязки к конкретному предприятию происходит непосредственно в процессе работы. Распределение ролей для участников проекта с соответствующим уровнем доступа позволяет осуществить первый уровень защиты от несанкционированного проникновения.

САРР ТП обеспечивает:

- многовариантность при проектировании типового/группового ТП;
- выбор станочного парка, инструментария, оснастки, приспособлений, универсального и специализированного измерительных средств;
- расчет режимов металло- и термообработки, гальваники, лакокраски, сборки, сварки;
- расчет себестоимости, нормирование материальных и трудовых затрат;
- создание комплекта технологических документов.

САРР-платформа «Вертикаль» построена на принципах и условиях коллективного инжиниринга комплексных проектов в реальном времени, что обеспечивается единым информационным пространством на основе виртуального предприятия [6, 7]. Для созданных объектов реализована ассоциированная связь атрибутов ТП с параметрами графических материалов (эскизов и чертежей) САД-приложения, в качестве которого, для обеспечения минимальных проблем с

совместимостью, предлагается использовать «Компас-3D». Все изменения атрибутов в графических материалах приводят к модификациям связанных параметров ТП.

Допускается возможность и обратного характера – обновление атрибута в графическом документе как ответ на правки в ТПП [5, 8]. Например, в автоматическом режиме осуществляется перерасчет отклонений, классов допусков и других зависимых величин как отклик на корректирование номинала параметра.

Автоматизированная технологическая подготовка производства позволяет выбрать станочное оборудование и его количество, привести перечень инструментов и оснастки, сопроводив этот список операционным эскизом детали. Это дает возможность провести эффективный инструментальный контроль как на стадии выполнения, так и по завершении перечня всех операций.

На принципе многоуровневой структуры из операций и переходов, оборудования и оснастки, а также необходимых технологических объектов образуется дерево ТП. В ходе разработки ТП детали/сборочной единицы формируется структурированная информация с различными уровнями, где отображаются все основные элементы ТПП: данные об изделии (3D-модель, чертежи, спецификации и др.), маршруты обработки и выполнения операции. Это позволяет быстро комбинировать объекты ТП, реализуя требуемую технологию обработки детали/сборочной единицы, электронные модели изделий которой всегда является корневым элементом дерева ТПП.

В ходе ТПП определяются численность и состав персонала, требования к его квалификации, а также указываются сопровождающие атрибуты, необходимые для достижения планируемых производственных показателей [9, 10]. На базе САPP-платформы участники проекта разрабатывают технологические процессы всех видов: единичный, типовой/групповой и сборки изделия.

Полученные данные оформляются в виде заранее согласованного пакета технологической документации, затем дистанционно визируется всеми вовлеченными участниками кластера посредством системы «Лощман» и передается на следующий этап разработки.

К сожалению, российские предприниматели в массе своей не выглядят заинтересованными в формировании промышленных кластеров даже в аспекте единой информационно-технологической кооперации. Несмотря на очевидные достоинства данного подхода, необходимость долгосрочных инвестиций и значительной степени доверия между участниками входит в резкое противоречие с сформировавшейся на территории РФ традиции крайне малого горизонта бизнес-планирования и низкого уровня общественной сплоченности. Единственным рациональным выходом из создавшегося положения выглядит активное вовлечение в процесс промышленной кластеризации локальных и федерального правительств – в качестве инвесторов и/или гарантов, способных снизить опасность бизнесменов.

Литература

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

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

3. Кошутин, Д. В. Выбор PLM-системы при использовании интеграционной методики построения виртуального предприятия / Д. В. Кошутин. – Текст : электронный // Современные инновации в науке и технике : сборник научных трудов 8-й Всероссийской научно-технической конференции. – 2018. – С. 104–106. – URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_34920314_88376138.pdf (дата обращения: 27.10. 2021).

4. Кошутин, Д. В. Виртуальное предприятие на основе PLM-системы «Лощман» в виде многоагентной системы / Д. В. Кошутин. – doi: 10.21822/2073-6185-2020-47-2-75-85 // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2020. – № 2. – С. 75–85.

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

6. Кошутин, Д. В. Пример разработки изделия в виртуальном предприятии на основе PLM-системы лощман в рамках основных компонентов решения Ас-кон. – Текст : электронный // Управление качеством на этапах жизненного цикла технических и технологических систем : сборник научных трудов Всероссийской научно-технической конференции. – 2019. – С. 396–398 – URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_38524696_66757790.pdf (дата обращения: 27.10. 2021).

7. Кошутин, Д. В. Применимость виртуального предприятия на основе PLM-системы «Лощман» в рамках технологической подготовки производства / Д. В. Кошутин // Современные материалы, техника и технология : сборник научных трудов Всероссийской научно-технической конференции. – Курск, 2018. – С. 217–219.

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

9. Bulavin, V. F. Digital space of small enterprises in engineering / V. F. Bulavin, T. G. Bulavina, A. S. Stepanov // Proc. ICIE, 2020. – Springer – 2021. – P. 462–468.

10. Digital support of production small business preparation in engineering / V. F. Bulavin, T. G. Bulavina, V. V. Yahrchev, A. S. Stepanov. – doi:10.1088/1742-6596/1399/3/033045 // J. Phys.: Conf. Ser., 2019. – № 3. – art. 033045.

D.V. Koshutin
Vologda State University

**TECHNOLOGICAL ASPECT OF INDUSTRIAL CLUSTERIZATION
ON THE BASIS OF A VIRTUAL ENTERPRISE**

The article presents the elements of solutions required for effective clustering of technological preparation of production based on virtual enterprises. The author describes the technological aspect of industrial clustering which must be implemented for successful industrial clustering, carried out within a single information space, built on the basis of a PLM system.

Industrial clusterization, virtual enterprises, CAPP systems.



МАГНИТОУПРУГИЙ ДАТЧИК УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

В статье предлагается новый подход к построению магнитоупругих датчиков угловых перемещений с системой позиционирования, выполненной в виде пространственной кривой одновитковой цилиндрической винтовой линии. Представлен один из вариантов исполнения датчика и схема формирования магнитоупругих волн.

Машиностроение, датчик, магнитоупругость, угловые перемещения, гелиса.

Для контроля углового положения вращающихся устройств в различных областях техники используются датчики угла поворота. Наиболее известны оптические, механические и магнитные датчики угла поворота. Все они имеют свои особенности и назначение. Преимущество магнитоупругих датчиков угловых перемещений (МУДУП) заключается в возможности нормально функционировать в средах с разной степенью агрессивности, при перепадах рабочих температур, механических воздействиях и т.п. [2].

Большинство известных фирм-производителей выполняют первичный преобразователь (ПП) с магнитоупругим чувствительным элементом (МУЧЭ) в виде U-образной или O-образной пространственной кривой, что создает в МУЧЭ нежелательные механические напряжения и, как следствие, искажает его магнитные свойства: чем меньше радиус ПП, тем больше эти напряжения [1]. Для устранения данного недостатка предлагается иная концепция построения МУДУП. Первичный преобразователь с чувствительным элементом обязательно должен быть линейным, а система позиционирования (СП) – нелинейной, например в виде пространственной кривой из одного магнитного витка геликоиды (гелисы), расположенной на внешней поверхности цилиндра.

На рисунке 1 показан один из вариантов выполнения МУДУП. Ось вращения цилиндра с СП соединена с осью вращения контролируемого объекта 3 (например, с валом электрической машины). Параллельно цилиндру 4 размещен ПП 1, входящий в состав датчика.

Математически форма гелисы имеет следующий вид

$$\begin{cases} x = R \cdot \sin \Psi \\ y = R \cdot \cos \Psi \\ z = \frac{l_{\text{мсп}}}{2\pi} \cdot \Psi \end{cases}, \quad (1)$$

где x, y, z – координаты декартовой системы координат, центром которой является точка пересечения оси цилиндра 4 с перпендикуляром, возобновленным в точке начала рабочей зоны a_0 , изображенной на рисунке 1;

R – радиус цилиндра;

$l_{\text{мсп}}$ – рабочая зона измерения угловых перемещений объекта;

Ψ – угол поворота объекта 3.

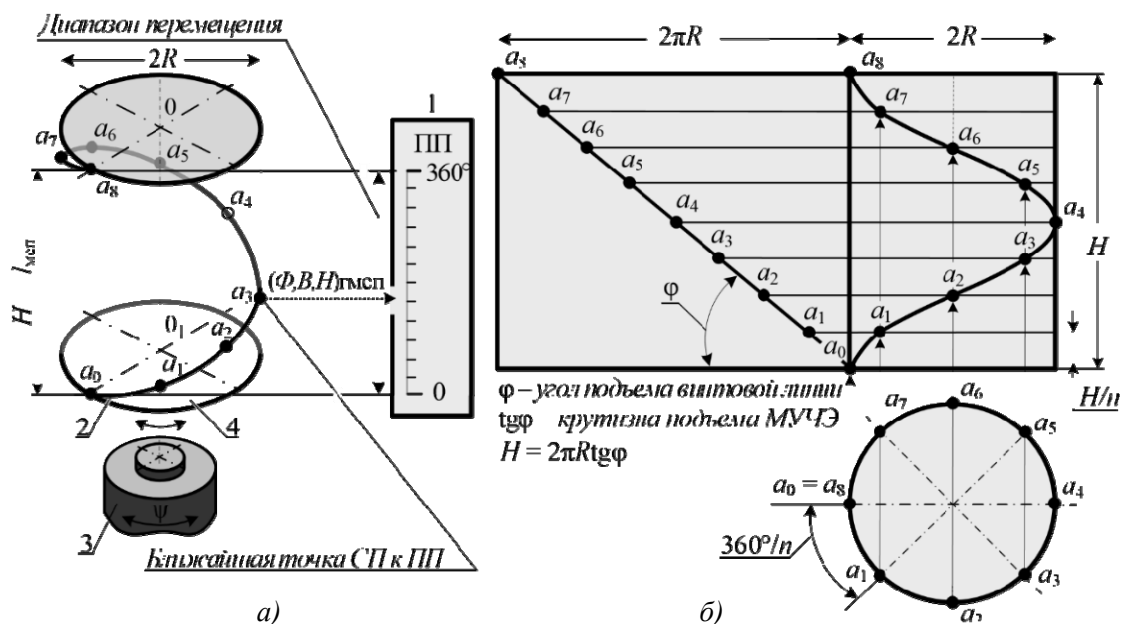


Рис. 1. Магнитоупругий датчик угловых перемещений: а) взаимодействие СП с ПП; б) развертка боковой поверхности цилиндра с СП

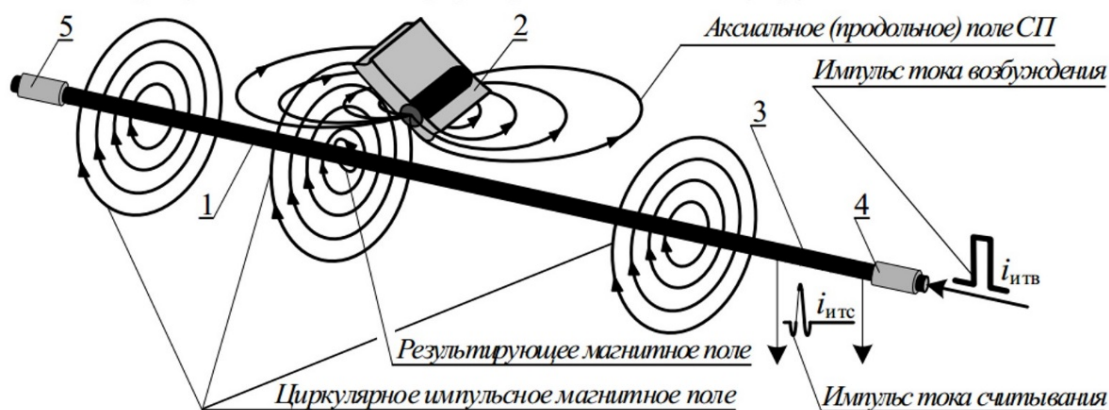


Рис. 2. Формирование магнитоупругих волн:

1 – магнитоупругий волновод; 2 – магнитная СП; 3 – обмотка катушки считывания; 4 и 5 – магнитоупругие демпферы

Таким образом, за один оборот вращения объекта 3 с СП 4 магнитное поле 2 последовательно, в диапазоне $a_0...a_8$ взаимодействует с ПП 1.

Система позиционирования 2 может быть выполнена путем нанесения на прямоугольник со сторонами $2\pi R$ и H магнитной прямой (рис. 1б) и размещения ее на внешней поверхности цилиндра 4. В результате прямая преобразуется в пространственную кривую в виде одного витка винтовой линии гелисы.

На рисунке 2 показано формирование магнитоупругих волн в МУЧЭ.

В среду МУЧЭ (1) периодически подаются импульсы тока возбуждения магнитоупругих волн в чувствительном элементе $i_{итв}$, и в его рабочем диапазоне формируется круговое импульсное электромагнитное поле. При взаимодействии этого поля с продольным полем магнитной СП (2) образуется искривленное результирующее импульсное магнитное поле. В результате в среде МУЧЭ (1) создаются крутильные магнитоупругие волны (эффект Видемана). Эти волны достигают обмотки катушки считывания (3) и считываются (эффект Виллари). При дальнейшем распространении поглощаются магнитоупругими демпферами (4, 5) [3].

Проведенный анализ и экспериментальные исследования разработанного магнитоупругого датчика угловых перемещений с магнитной СП, выполненной в виде пространственной кривой, показали, что в сравнении с другими способами измерения угловых перемещений предложенный вариант датчика обладает следующими преимуществами: технологичностью, низкими массогабаритными размерами, высокой точностью, линейностью, надежностью и бесконтактным способом измерений.

Литература

1. Волков, Ю. В. Датчики для измерений при производстве электрической и тепловой энергии : учебное пособие / Ю. В. Волков. – Санкт-Петербург : ВШТЭ СПбГУПТД, 2019. – 89 с.
2. Сысоева, С. С. Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы. Часть 14. Итоговый сравнительный анализ. Выводы и обновление / С. С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2006. – № 7. – С. 40–53.
3. Таганова, В. А. Оптимизация состава и свойств магнитоэластомерных композиций на основе фторкаучука СКФ-26 / В. А. Таганова // Каучук и резина. – 2012. – № 4. – С. 23–26.

A.V. Morozov, V.N. Proshkin
Penza State Technological University

MAGNETOELASTIC ANGULAR MOVEMENT SENSOR

The article proposes a new approach to the construction of magnetoelastic sensors of angular displacements with a positioning system made in the form of a spatial curve – a single-turn cylindrical helix. One of the sensor versions and a diagram of the formation of magnetoelastic waves are presented.

Mechanical engineering, sensor, magneto elasticity, angular displacement, helix.



МЕХАНИЧЕСКИЕ РЕАКТАНСЫ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЯХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ

В статье показано, что механические реактивная и полная мощности, развиваемые при гармонических колебаниях исполнительных органов машин и механизмов, напрямую связаны с их механическими реактансами, являющимися дуально-инверсными аналогами реактансов электрических цепей.

Привод, активная, реактивная, полная мощности, инертный, упругий реактансы.

Задача корректного учета как активной, так и реактивной механических мощностей для целей энергосбережения, а также силовых конструкторских расчетов является актуальной [1].

Пусть к массивному исполнительному органу машины или механизма приложена синусоидальная сила

$$f = F_m \cos \omega t. \quad (1)$$

В соответствии с основной аксиомой механики

$$F_m \cos \omega t = m \frac{dv}{dt},$$

$$\int_0^v dv = \frac{F_m}{m} \int_0^t \cos \omega t dt,$$

$$v = \frac{F_m}{\omega m} \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right).$$

Из этого следует, что амплитуда имеет вид:

$$V_m = \frac{F_m}{\omega m} = \frac{F_m}{X_m}.$$

Здесь X_m – инертный реактанс, кг · рад/с.

Полученное выражение можно представить в комплексном виде.

$$\dot{V} = -i \frac{\dot{F}}{\omega m} = \frac{\dot{F}}{i \omega m} = \frac{\dot{F}}{\underline{X}_m}. \quad (2)$$

Знак « \leftarrow » обусловлен тем, что фаза мгновенной скорости отстает от фазы силы на $\pi/2$. Комплексные величины, соответствующие синусоиде, обозначаются точкой сверху. Прочие – подчеркиваются снизу [2, 3].

В соответствии с (2) инертный реактанс равен

$$\underline{X}_m = i \omega m.$$

Он характеризует свойство массивного тела оказывать сопротивление приводу, понуждающему его совершать колебания. Вполне закономерно, что он определяется не только массой, но и частотой. В механику реактансы введены А.Г. Вебстером в начале XX века.

Дуально-инверсным аналогом формулы (2) является закон Ома для участка электрической цепи. При этом V соответствует току, F – ЭДС, X_m – индуктивному реактивному сопротивлению.

В соответствии с выражением (1) вектор силы ориентирован вдоль вещественной оси комплексной плоскости, поэтому в соответствии с формулой (2) вектор скорости ориентирован вдоль мнимой оси (т.е. скорость – чисто мнимая). Мгновенное значение реактивной (инерционной) мощности равно [4]

$$q_i = f v.$$

Эта величина является мнимой, поскольку является произведением мнимой величины v на действительную f .

Реактивная (инерционная) мощность в комплексном виде

$$\dot{Q}_i = \dot{F} \dot{V}. \quad (3)$$

В электротехнике величина реактивной мощности отождествляется с ее амплитудой [5]. Аналогично этому, учитывая (2), реактивная (инерционная) мощность равна

$$Q_i = \frac{F^2}{X_m} = V^2 X_m.$$

Пусть сила трения определяется формулой

$$f = r v,$$

где r – коэффициент пропорциональности, Н · с/м. Отсюда скорость равна

$$v = \frac{f}{r}.$$

Дуально-инверсным аналогом этой формулы является закон Ома для участка электрической цепи. При этом v соответствует току, f – ЭДС, r – активному сопротивлению. Поскольку вектор силы ориентирован вдоль вещественной оси комплексной

плоскости (1) и r – вещественная величина, величина V является тоже вещественной.

Мгновенное значение активной (тепловой) мощности равно [6]

$$p = fV.$$

Активная мощность тоже вещественная величина, поскольку является произведением вещественных величин.

Активная (тепловая) мощность в комплексном виде

$$\underline{P} = \dot{F} \dot{V}.$$

В электротехнике величина активной мощности отождествляется с ее средним за период значением. Это положение обобщается и на механическую активную (тепловую) мощность P .

В соответствии с (3) и (2) реактивная (инерционная) мощность представляет собой чисто мнимую величину

$$\dot{Q}_i = \dot{F} \dot{V} = -i \frac{(\dot{F})^2}{\omega m}.$$

Активная (тепловая) мощность при любом характере движения, например развиваемая силой трения скольжения, является вещественной величиной. В этой связи реактивная и активная мощности являются условно «ортогональными». Следовательно, полная механическая мощность определяется выражением

$$S = \sqrt{Q^2 + P^2}. \quad (4)$$

Нетрудно показать, что формула упругого реактанса имеет вид:

$$\underline{X}_k = -i \frac{k}{\omega}.$$

здесь k коэффициент упругости, Н/м. \underline{X}_k соответствует емкостному реактивному сопротивлению в электротехнике.

Реактивная (упругодеформационная) мощность определяется выражением

$$Q_d = \frac{F^2}{X_k} = V^2 X_k.$$

Эта мощность обусловлена способностью упругого тела запасать и возвращать потенциальную энергию упругой деформации. Реактивная (упругодеформационная) мощность является чисто мнимой величиной. Ее знак противоположен знаку реактивной (инерционной) мощности.

Полная мощность также вычисляется по формуле (4).

В механической системе, состоящей из пружины и груза сумма реактансов равна

$$\underline{X} = \underline{X}_m + \underline{X}_k = i\omega_0 m - i \frac{k}{\omega_0}.$$

Если она равна нулю, возникает резонанс [7–10].

$$i\omega_0 m - i \frac{k}{\omega_0} = 0,$$

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

Активная и реактивная механические мощности, являясь условно «ортогональными», не складываются. Для полной мощности справедлив аналог теоремы Пифагора (точно так же, как в электротехнике). Инертный и упругий реактансы характеризуют свойства массивного и упругого тел оказывать сопротивление приводу, понуждающему их совершать колебания.

Литература

- Юрина, Е. А. Основные проблемы, связанные с энергосбережением, и возможные пути решения / Е. А. Юрина, Я. А. Куликова, Д. В. Пустовалов. – DOI: 10.51965/2076-7919 2021 2 1 144 // Вестник Волжского университета имени В. Н. Татищева. – 2021. – Т. 2, № 1 (47). – С. 144–149.
- Попов, И. П. Исследование вынужденных колебаний механических систем. Часть 1 / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2019. – № 4 (6). – С. 21–25.
- Попов, И. П. Исследование вынужденных колебаний механических систем. Часть 2 / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2020. – № 1 (7). – С. 27–32.
- Попов, И. П. Диссипативная, реактивная и полная мощности виброприводов машин / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2019. – № 3 (5). – С. 72–74.
- Павлов, В. Д. Автокомпенсация реактивной мощности в электрических сетях / В. Д. Павлов. – DOI: 10.17516/1999-494X-0342 // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2021. – Т. 14, № 6. – С. 684–688.
- Попов, И. П. Производительная мощность при сортировке сыпучих материалов / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2020. – № 1 (7). – С. 70–72.
- Попов, И. П. Исследование резонансов в технических системах / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2019. – № 2 (4). – С. 15–18.
- Попов, И. П. Исследование вариантов и особенностей околорезонансных явлений в механических системах / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2021. – № 1 (11). – С. 12–18.
- Попов, И. П. Инертная колебательная система из двух грузов для вибрационных механизмов / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2020. – № 2 (8). – С. 10–12.
- Павлов, В. Д. Математические модели резонансных и антирезонансных процессов / В. Д. Павлов. – DOI: 10.20291/2079-0392-2021-1-17-27 // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 1 (49). – С. 17–27.

I.P. Popov
Kurgan State University

**MECHANICAL REACTANCES AT HARMONIC VIBRATIONS
OF MACHINES AND MECHANISMS EXECUTIVE ELEMENTS**

The article shows that the mechanical reactive and total powers developed during harmonic oscillations of the executive elements of machines and mechanisms are directly related to their mechanical reactances, which are dual-inverse analogs of the reactances of electrical circuits.

Drive, active, reactive, full power, inert, elastic reactants.



ФРАКТОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОВЕРХНОСТЕЙ РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ С ЖЕЛЕЗНОЙ СВЯЗКОЙ

Фрактографический анализ поверхностей разрушения после оценки прочности при изгибе позволяет установить общий хрупкий характер разрушения сплавов на основе разных карбидов с железной связкой. Характер разрушения карбидных зерен – хрупкий у всех сплавов, однако работа разрушения – разная. Наибольшая работа разрушения определена для сплава на основе карбида ниобия. Наименьшая работа разрушения – у сплава на основе карбида хрома. У сплава на основе карбида титана обнаружено вязкое разрушение по железной связке и прохождение разрушающей трещины по границам зерен. Для повышения прочности сплава на основе карбида титана необходимо за счет легирования добиться упрочнения связки, повышения прочности ее границ с карбидом и уменьшения размеров карбидных зерен.

Поверхность разрушения, фасетка излома, карбидная основа, железная связка.

Промышленные твердые сплавы должны обладать комплексом механических и специальных свойств. Механическая прочность, кроме способности оказывать сопротивление разрушению, влияет на износостойкость и надежность материала. Для изделий из твердых сплавов характерна работа в условиях нагружения сжатием, изгибом и кручением. С учетом хрупкого в целом характера разрушения твердые сплавы весьма чувствительны к концентраторам напряжений, внешним и внутренним. Наиболее адекватной, предусмотренной стандартом, является оценка прочности твердых сплавов при изгибе. По разным методикам (которые дают отличающиеся результаты) прочность при изгибе определяют при 3-точечном сосредоточенном или при 4-точечном нагружении («чистым» изгибом) образцов разных размеров в состоянии после спекания или продольно шлифованных.

Нами для экспериментальной оценки выбран метод 3-точечного нагружения нешлифованных образцов с размерами 5×5×40 мм (основной метод в отечественной практике). Испытания выполнены на разрывной машине Р-10 с фиксацией разрушающегося

усилия с точностью ±20 Н. Расчетная погрешность определения предела прочности при изгибе ±5 МПа с усреднением результата на 6–10 образцах. Для оценки прочности и характера разрушения выбрана группа твердых сплавов с железной связкой на основе 70 % масс. карбидов переходных металлов (TiC, VC, NbC, TaC, Cr₃C₂, Mo₂C, WC). Технология изготовления образцов описана в работе [1]. Кроме предела прочности при изгибе определялись: пористость сплавов, средний размер карбидного зерна (металлографическим методом). Использованы данные [2]: прочность при сжатии и растворимость карбидов в железе при эвтектической температуре – как факторы, влияющие на прочность при изгибе. Корреляционные зависимости между факторами и пределом прочности при изгибе приведены в работе [3]. В дальнейшем наши исследования структуры твердых сплавов методом рентгеноструктурного фазового анализа [4] показали несколько большую растворимость карбидов в железе, что, однако, не нарушает установленных связей с прочностью. Данные по экспериментальной оценке и для анализа прочности при изгибе сплавов приведены в таблице.

Таблица

Данные для анализа прочности при изгибе сплавов с железной связкой

№ п/п	Состав сплава, % масс	Предел прочности при изгибе, МПа	Прочность при сжатии карбида, МПа	Пористость сплава, %	Средний размер карбидного зерна, мкм	Растворимость карбида в железе при эвтектической температуре, % масс
1	70 % TiC, 30 % Fe	790	1380	3,4	5	0,5
2	70 % VC, 30 % Fe	660	620	0,3	8	6
3	70 % NbC, 30 % Fe	1050	2420	2,0	4	2
4	70 % TaC, 30 % Fe	730	1800	7,3	3	1
5	70 % Cr ₃ C ₂ , 30 % Fe	240	-	1,6	40	16
6	70 % Mo ₂ C, 30 % Fe	390	-	0,3	10	10
7	70 % WC, 30 % Fe	710	2720	0,6	M ₆ C:10 WC:1,5	5

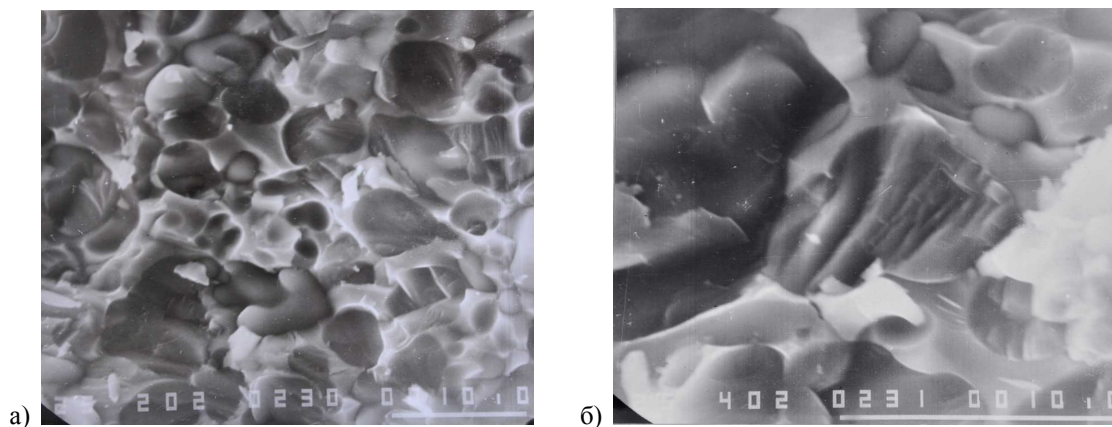


Рис. 1. Микрорельеф излома сплава 70 % TiC – Fe:
 а) общий вид, частичное разрушение по границам карбидных зерен, $\times 2000$;
 б) хрупкое разрушение карбида, признаки вязкого разрушения связки, $\times 4000$

При разрушении гетерогенного сплава образуется поверхность разрушения, что является следствием совершения некоторой работы, связанной с разрывом связей кристаллического строения материала в зоне разрушения. В соответствии с принципом минимизации затрат энергии разрушающая трещина проходит по местам ослабленных или напряженных зон и связей в материале. Поэтому наблюдение за прохождением разрушающей трещины позволяет ориентировочно, в сравнении с аналогами, оценить работу разрушения, т.е. оценить прочность материала и пути повышения его прочности. Фрактографический анализ позволяет путем наблюдения и описания поверхности разрушения (при большом увеличении) по характерным признакам оценить путь прохождения трещины (через зерна, по границам зерен, через поры), отклонение трещины от плоскостности (самой компактной поверхности), ветвление трещины, образование чашевидных фасеток, оценить долю хрупкого и вязкого разрушения – в итоге оценить работу разрушения.

Фрактографический анализ поверхностей разрушения образцов при изгибе (изломах) был выполнен на растровом электронном микроскопе JSM-35 (Япония). Условия съемки: ускоряющее напряжение 25 кВ, серебряное напыление, увеличение от $\times 300$ до $\times 6600$. Для анализа использованы фрагменты (обломки) образцов после разрушения изгибом. Поверхности разрушения (изломы) для съемки выбирались с типичными признаками прохождения трещины. Результаты анализа изломов:

1. В сплаве 70 % TiC, 30 % Fe разрушающая трещина проходит в основном по границам зерен со связкой с пересечением прослоек связки и отдельных (наиболее крупных) зерен (рис. 1). Характер разрушения связки имеет признаки вязкости (оттянутые в поперечном направлении к ходу главной трещины края чашек и остановленные релаксацией сопутствующие трещины). Разрушение по зерну имеет речный признак хрупкого разрушения с волнообразным изменением направления развития хрупкой трещины, что характерно для разрушения поликристаллических зерен. Главное разрушение по границам зерен указы-

вает на ослабленную связь между зернами карбида титана и железной связкой. Это означает, что на таких границах прерывается кристаллическое строение обеих фаз, между ними нет переходной фазы, в итоге: действуют ослабленные силы межзатомного сцепления на уровне сил адгезионной природы и обобществленных электронных оболочек (электронного «газа»), а также чисто механические силы, связанные с внутренним рельефом границ округлых зерен и связки.

Пониженная смачиваемость при жидкофазном спекании карбида титана железом (краевой угол смачивания в вакууме при 1550 °C составляет 41° [2]) является причиной и следствием пониженной интенсивности взаимодействия и ослабленной связи по границам фаз.

Относительно небольшая прочность при изгибе сплава TiC–Fe (790 МПа) по сравнению, например, со сплавами TiC–Ni–Mo (1000 МПа [5]) объясняется, главным образом, пониженным взаимодействием карбида титана с железом (низкая растворимость и смачиваемость) и пластичностью феррита (несмотря на некоторое его упрочнение за счет растворения в железе титана при спекании [4]). Путем легирования (использования в качестве связки легированной стали) может быть достигнуто как упрочнение связки, так и усиление ее взаимодействия с карбидом титана за счет растворимости карбидообразующих легирующих компонентов в карбиде титана.

2. В сплаве 70 % VC, 30 % Fe разрушающая трещина с сильным разветвлением и изменением направления проходит через тело крупных зерен с пересечением прослоек связки (рис. 2). Характер разрушения зерен – чисто хрупкий, с ветвлением разрушающей трещины иногда в пределах зерен. Вид поверхности разрушения в зерне – гладкий, иногда с пологой речностью (стеклообразный), что объясняется небольшой хрупкой прочностью карбида ванадия (значительно ниже, чем у карбида титана). Крупные зерна карбида ванадия вырастают вследствие высокой скорости его перекристаллизации через расплав железа при спекании сплава. Большие размеры хрупких зерен снижают работу разрушения, а значит – прочность сплава. Резкое изменение направления разрушающей трещины

при переходе тонкой прослойки связки свидетельствует о высоком сопротивлении разрушению со стороны связки, т.е. о значительном упрочнении феррита. Характер разрушения связки из-за ее малых размеров установить трудно, но судя по некоторым ее относительно крупным фрагментам – преимущественно хрупкий. Это свидетельствует о сильном насыщении железа компонентами карбида ванадия (преимущественно ванадием) при спекании и о сильном упрочнении связки. Прохождение разрушающей трещины, огибающей зерна, т.е. по межфазовым границам, не обнаружено. Это является следствием сильного взаимодействия карбида ванадия с железом, которое проявляется в высокой растворимости в железе и в идеальной смачиваемости ($\theta=0^\circ$ в вакууме при 1400°C [2]). Общая прочность сплава 660 МПа представляется вполне закономерной – на уровне прочности карбидов ванадия, связанных высокопрочной [6] ванадиевой сталью.

3. В сплаве $70\% \text{ NbC}$, $30\% \text{ Fe}$ разрушающая трещина пересекает карбидные зерна и прослойки связки между зернами с резким изменением направления при переходе из зерна в связку и из связки в зерно. Излом

имеет мелкую фасетку (рис. 3), соответствующую малой величине карбидного зерна в сплаве (в среднем около 3 мкм), что удлиняет путь разрушающей трещины и увеличивает работу разрушения (по сравнению со сплавом $70\% \text{ VC}$, $30\% \text{ Fe}$ со средним размером фасетки $10\text{--}15\text{ мкм}$).

Характер разрушения зерен – хрупкий, на более крупном зерне-агрегате обнаруживается резкая речность, что свидетельствует о повышенной прочности карбида ниобия (в два раза выше, чем у карбида титана). Характер разрушения связки установить трудно, даже при большом увеличении. По резкому изменению хода трещины можно судить о несколько большей вязкости связки (феррита, легированного ниобием) по сравнению с ванадиевым ферритом. Огибания зерен трещиной не обнаружено, что является следствием хорошей смачиваемости (0° при 1550°C) карбида ниобия расплавом железа и меньшей растворимости карбида ниобия в железе (по сравнению с карбидом ванадия). В итоге сплав имеет самую высокую в данной группе прочность при изгибе (1050 МПа).

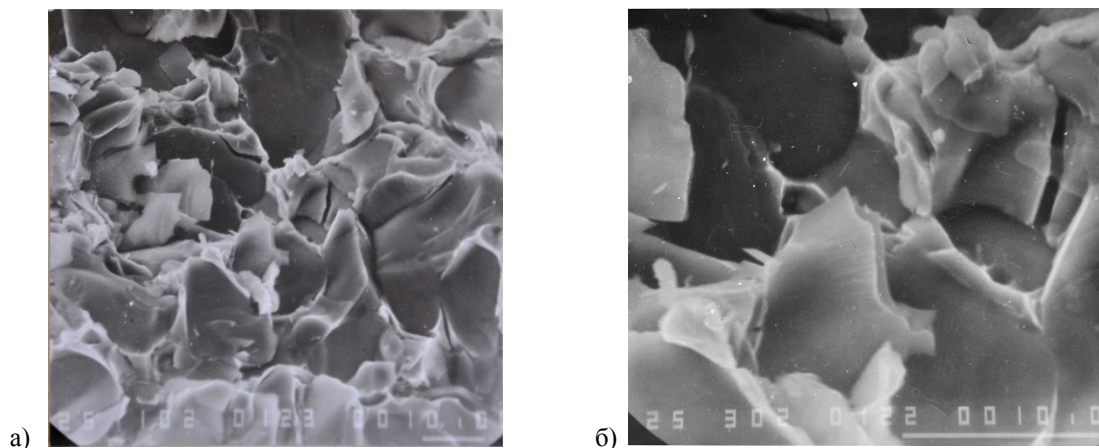


Рис. 2. Микрорельеф излома сплава $70\% \text{ VC} - \text{Fe}$:
 а) общий вид, укрупненная фасетка хрупкого разрушения, $\times 1000$;
 б) ветвление разрушающей трещины в карбидных зернах, хрупкое разрушение участков связки, $\times 3000$

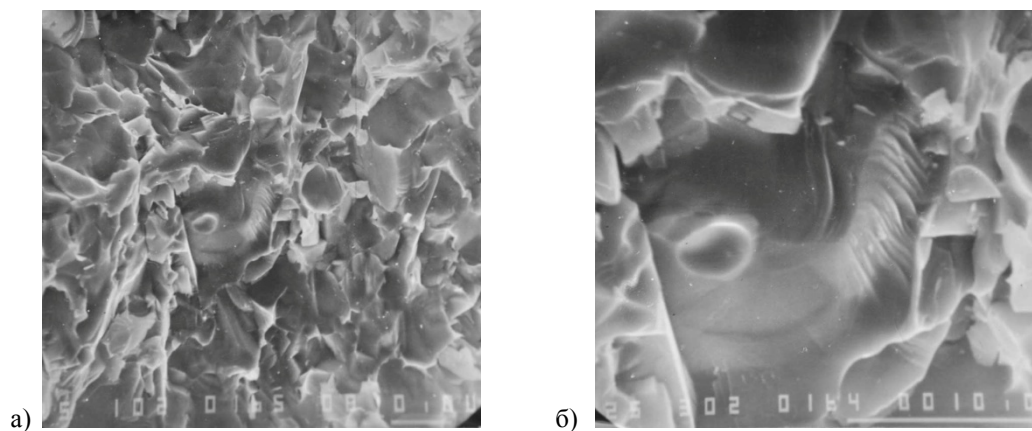


Рис. 3. Микрорельеф излома сплава $70\% \text{ NbC} - \text{Fe}$:
 а) общий вид, мелкая фасетка хрупкого разрушения, $\times 1000$;
 б) хрупкое разрушение карбидного зерна и участков связки, $\times 3000$

4. В сплаве 70 % TaC, 30 % Fe разрушающая трещина пересекает крупные и мелкие зерна карбида тантала, с резким изменением направления пересекает прослойки и более крупные фрагменты связки.

Структура сплава и фасетки излома неравномерны, наряду с мелкими (размером 2–5 мкм) встречаются фасетки величиной до 15 мкм (рис. 4). Характер разрушения по зернам – хрупкий, с мелкой речечностью, по связке – с большой долей вязкости (чашечного вида). Причиной вязкости связки является меньшая растворимость карбида тантала в железе. Можно предположить более слабое взаимодействие карбида тантала с железом при спекании и связанную с этим неравномерную скорость перекристаллизации карбида тантала через железную связку, что объясняет разную величину карбидных зерен. В сплаве обнаружено частичное стекание связки в нижнюю часть образцов (предположительно из-за большой объемной доли связки в сплаве и меньшей смачиваемости железом карбида тантала). Несмотря на довольно высокую прочность карбида тантала (1800 МПа [2]), сплав имеет пониженную прочность при изгибе (730 МПа).

5. В сплаве 70 % Cr₃C₂, 30 % Fe разрушающая трещина пересекает весьма крупные зерна карбида M₇C₃

по поверхности, близкой к плоской, практически без изменения направления для разных зерен (рис. 5). Предельный карбид хрома Cr₃C₂ при спекании активно взаимодействует с железом с образованием сложного карбида типа M₇C₃, в итоге в сплаве практически исчезает железная (ферритная) связка и исходный карбид хрома, а сложный карбид разрастается в крупные (до 100 мкм) зерна, слабо связанные друг с другом [4]. Характер разрушения в целом для сплава – хрупкий, сильно отличающийся от предыдущих сплавов. В крупных зернах наблюдается стекловидная речечность. Редкие фрагменты связки и границы зерен не реагируют на прохождение трещины, не изменяют ее направление. Это является следствием чрезмерной активности карбида хрома при спекании с железной связкой. Идеальная смачиваемость в сочетании с высокой растворимостью карбида хрома в железе (близкие атомные радиусы железа и хрома), карбидное превращение с переходом значительной части железной связки в состав сложного карбида M₇C₃, склонного к разрастанию, приводят к возникновению грубой крупнозернистой структуры без вязких составляющих. Вид излома указывает на небольшую работу разрушения (хрупкость) и низкую прочность (240 МПа) сплава.

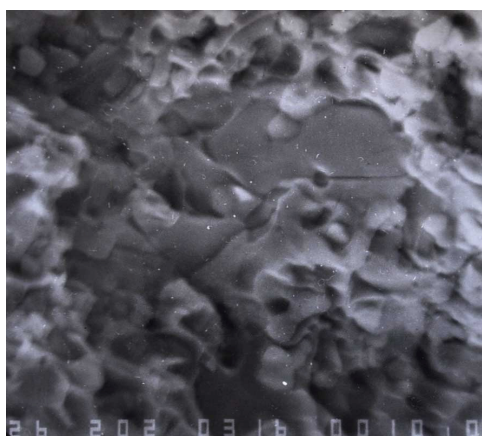


Рис. 4. Микрорельеф излома сплава 70 % TaC – Fe, ×2000

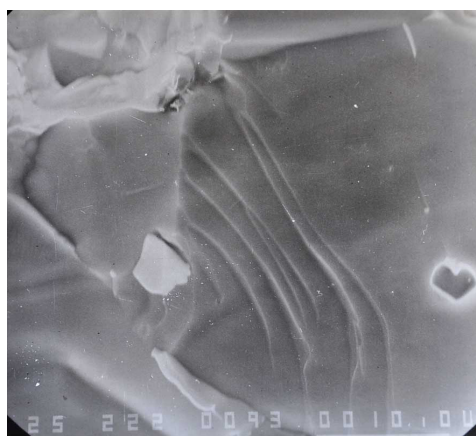


Рис. 5. Микрорельеф излома сплава 70 % Cr₃C₂ – Fe, ×2200

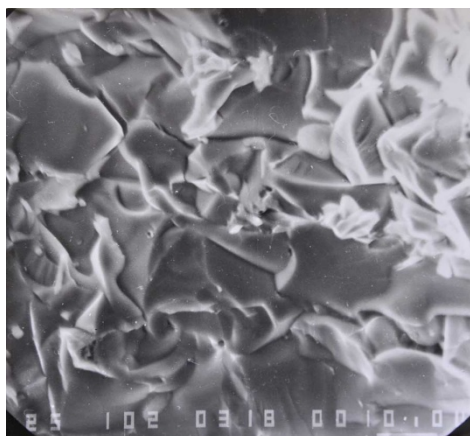


Рис. 6. Микрорельеф излома сплава 70 % Mo₂C – Fe, ×1000



Рис. 7. Микрорельеф излома сплава 70 % WC – Fe, ×2000

6. В сплаве 70 % Mo_2C , 30 % Fe разрушающая трещина проходит по телу крупных зерен сложного карбида M_6C с изменением направления на границах зерен и в прослойках связки (рис. 6). Фасетка излома – крупная (10 мкм и более). Поверхность разрушения зерен – гладкая с ветвлением трещины и изменением направления в пределах границ зерен, что является признаком хрупкого, но повышенного (по сравнению с M_7C_3) сопротивления разрушению. Характер разрушения фрагментов связки – с признаками вязкости (чашевидная волнообразная фасетка) и сильного упрочнения, характерного для молибденовых сталей [6]. Межфазовые границы между зёрнами и связкой упрочнены: каждый переход границы приводит к значительному изменению направления развития трещины. Крупные зёрна карбида M_6C – продукта взаимодействия исходного карбида молибдена с железом – явно снижают прочность сплава (390 МПа), так как карбидное превращение значительно уменьшает содержание в сплаве более прочной структурной составляющей (связки). Прочность сплава оказалась существенно ниже ожидаемой.

7. В сплаве 70 % WC, 30 % Fe разрушающая трещина проходит через тело мелких карбидов вольфрама и связки, оставляя характерный мелкоячеистый след, а также пересекает крупные зёрна сложного карбида M_6C (рис. 7), который также является следствием карбидного превращения [4]. Характер разрушения зерен M_6C – хрупкий (вид – гладкий с глубокой рейкой, что свидетельствует о большей прочности карбидов M_6C с вольфрамом, чем карбидов M_6C с молибденом и карбидов M_7C_3 с хромом). Более мелкие зёрна карбида вольфрама и упрочненная вольфрамом ферритовая связка совместно оказывают значительно большее сопротивление разрушению, о чем говорит извилистый ход разрушающей трещины. Явного разрушения по границам зерен не обнаружено, что подтверждает довольно сильное взаимодействие карбида вольфрама и железа (краевой угол смачиваемости $\theta=0^\circ$ при 1550 °C [2]). Несмотря на очень высокую собственную прочность монокарбида вольфрама (от 2720 МПа при изгибе до 4000 МПа при сжатии [2]), прочность его спеченного сплава с железом (710 МПа) оказалась значительно ниже ожидания. Аналогичное явление резкого снижения прочности отмечается также при спекании классических твердых сплавов WC–Co: обезуглероживание приводит к образованию сложного карбида типа M_6C – $(\text{W},\text{Co})_6\text{C}$, которая считается технологическим браком (устраняет-

ся добавлением в порошковую смесь графитового порошка [5]). По нашей технологии добавление углерода не предусматривается, так как в качестве связки предполагается использование безуглеродистых сталей как наиболее теплостойких.

В заключение отметим: приведенный фрактографический анализ в сочетании с анализом структуры и превращений при спекании позволяет научно интерпретировать экспериментальные данные и количественный анализ прочности при изгибе твердых сплавов с железной связкой, выбрать вид структуры сплава для достижения высокой прочности при изгибе.

Литература

1. Яняк, С. В. Экспериментальная оценка свойств твердых сплавов с железной связкой / С. В. Яняк, Г. Ю. Пивень // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производства: технология и надежность машин, приборов и оборудования: материалы XIII международной научно-технической конференции 27 марта 2018 г. – Вологда, 2018. – С. 281–284.
2. Самсонов, Г. В. Тугоплавкие соединения. Справочник / Г. В. Самсонов, И. М. Виницкий. – Москва: Металлургия, 1976. – 560 с.
3. Яняк, С. В. Анализ прочности твердых сплавов с железной связкой / С. В. Яняк, Г. Ю. Пивень // Междисциплинарные исследования, современное состояние и перспективы развития: материалы XVI международной научно-практической конференции 27 апреля 2018 г. / «ИМПРУВ». – Екатеринбург, 2018. – С. 25–29.
4. Яняк, С. В. Анализ структуры спеченных твердых сплавов с железной связкой / С. В. Яняк, Г. Ю. Пивень // Механика, оборудование, материалы и технологии: сборник научных статей по материалам международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», Краснодар, 29–30 марта 2018 года. – Краснодар: ПринтТерра, 2018. – С. 273–282.
5. Третьяков, В. И. Основы металловедения и технологии производства спеченных твердых сплавов / В. И. Третьяков. – Москва: Металлургия, 1976. – 528 с.
6. Геллер, Ю. А. Инструментальные стали / Ю. А. Геллер. – 5-е изд. – Москва: Металлургия, 1983. – 527 с.

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

FRACTOGRAPHIC ANALYSIS OF HARD ALLOYS WITH IRON BINDING FAILURE SURFACES

Fractographic analysis of destruction surfaces after estimation of bend strength allowed us to determine general fragile nature of the destruction of alloys based on different carbides with an iron ligament. The nature of the destruction of carbide grains is fragile in all alloys, however, the work of destruction is different. The greatest work of destruction is determined for alloy based on Niobium carbide. The smallest work of destruction - at alloy based on chromium carbide. Viscous destruction on the iron ligament and the passage of the destructive crack on the borders of the grain was discovered at alloy based on titanium carbide. To increase the strength of the alloy based on titanium carbide, it is necessary due to the doping to achieve the hardening of the bundle, increase the strength of its boundaries with carbide and reduce the size of carbide grains.

The surface of the destruction, the fastest of the frame, carbide base, the iron bunch.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Вельсовский Анатолий Юрьевич

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

Веселов Михаил Владимирович

обучающийся Института машиностроения, энергетики и транспорта Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
uvs@vogu35.ru

Григорьев Николай Станиславович

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
tms@vogu35.ru

Губина Юлия Александровна

аспирант кафедры промышленного и гражданского строительства Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
gubinaiu@vogu35.ru

Давыдова Елена Николаевна

кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации и вычислительной техники Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
davidova_en@mail.ru

Игумнов Евгений Михайлович

начальник центра развития Бизнес-системы АО «Северсталь Менеджмент» (Череповец, Россия)
emigumnov@severstal.com

Иньков Александр Эдуардович

аспирант кафедры промышленного и гражданского строительства Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
aleksandr.inkov@gmail.com

Колобов Александр Владимирович

кандидат технических наук, директор по развитию Бизнес-системы ООО «Севергрупп» (Череповец, Россия)
avkolobov@severgroup.ru

Комиссарова Ирина Игоревна

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

Коппалина Анастасия Александровна

обучающийся Института математики, естественных и компьютерных наук Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
ana.koppalina@yandex.ru

Кошутин Дмитрий Валерьевич

старший преподаватель кафедры технологии машиностроения Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
koshutindv@mail.ru

Круглов Владислав Владимирович

обучающийся Института математики, естественных и компьютерных наук Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
avt@vogu35.ru

Кудрин Никита Александрович

обучающийся Института машиностроения, энергетики и транспорта Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
tms@vogu35.ru

Летавин Алексей Дмитриевич

обучающийся Инженерно-строительного института Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
letavinad@vogu35.ru

Михалевич Надежда Вениаминовна

кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
nadmix1958@yandex.ru

Морозов Андрей Владимирович

обучающийся факультета промышленных технологий Пензенского государственного технологического университета (Пенза, Россия)
andrey_morozov_1998@list.ru

Никулин Сергей Витальевич

обучающийся Института математики, естественных и компьютерных наук Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
sergeynikulin177@gmail.com

Попов Игорь Павлович

старший преподаватель кафедры технологии машиностроения, металлорежущих станков и инструментов Курганского государственного университета (Курган, Россия)
ip.porow@yandex.ru

Прошкин Виктор Николаевич

кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации и управления Пензенского государственного технологического университета (Пенза, Россия)
gradient13@gmail.com

Сапиев Азамат Заурбиевич

кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры информационной безопасности и прикладной информатики Майкопского государственного технологического университета (Майкоп, Республика Адыгея)
sapiew@yandex.ru

Сергушичева Анна Павловна

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматики и вычислительной техники Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
annpas@list.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)
solovevaaaa@vogu35.ru

Суконщиков Алексей Александрович

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматики и вычислительной техники Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
avt@vogu35.ru

Федотовский Сергей Борисович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управляющих и вычислительных систем Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
fsb1960@yandex.ru

Шахова Елена Николаевна

старший преподаватель кафедры промышленного и гражданского строительства Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
shen1401@mail.ru

Шевцов Леонид Сергеевич

обучающийся Инженерно-строительного института Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
sle6488@gmail.com

Шорин Владимир Александрович

доктор химических наук, профессор, профессор кафедры автомобильных дорог Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
ad@vogu35.ru

Яняк Сергей Владимирович

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
tms@vogu35.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Velsovsky Anatoly Yurievich

Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Highways, Vologda State University (Vologda, Russia)

vau@vogu35.ru

Veselov Mikhail Vladimirovich

Student at the Institute of Mechanical Engineering, Energy and Transport, Vologda State University (Vologda, Russia)

uvs@vogu35.ru

Grigoriev Nikolay Stanislavovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Vologda State University (Vologda, Russia)

tms@vogu35.ru

Gubina Yulia Alexandrovna

Postgraduate student of the Department of Industrial and Civil Construction, Vologda State University (Vologda, Russia)

gubinaia@vogu35.ru

Davydova Elena Nikolaevna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automation and Computer Engineering, Vologda State University (Vologda, Russia)

davidova_en@mail.ru

Igumnov Evgeny Mikhailovich

Head of the Business System Development Center, Severstal Management JSC (Cherepovets, Russia)

emigumnov@severstal.com

Inkov Alexander Eduardovich

Postgraduate student of the Department of Industrial and Civil Construction, Vologda State University (Vologda, Russia)

aleksandr.inkov@gmail.com

Kolobov Alexander Vladimirovich

Candidate of Technical Sciences, Business System Development Director, Severgroup LLC (Cherepovets, Russia)

avkolobov@severgroup.ru

Komissarova Irina Igorevna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Highways, Vologda State University (Vologda, Russia)

irigkom@mail.ru

Koppalina Anastasia Alexandrovna

Student of the Institute of Mathematics, Natural and Computer Sciences, Vologda State University (Vologda, Russia)

ana.koppalina@yandex.ru

Koshutin Dmitry Valerievich

Senior Lecturer, Department of Mechanical Engineering Technology, Vologda State University (Vologda, Russia)

koshutindv@mail.ru

Kruglov Vladislav Vladimirovich

Student of the Institute of Mathematics, Natural and Computer Sciences, Vologda State University (Vologda, Russia)
avt@vogu35.ru

Kudrin Nikita Alexandrovich

Student at the Institute of Mechanical Engineering, Energy and Transport, Vologda State University (Vologda, Russia)
tms@vogu35.ru

Letavin Alexey Dmitrievich

Student of the Civil Engineering Institute of the Vologda State University (Vologda, Russia)
letavinad@vogu35.ru

Mikhalevich Nadezhda Veniaminovna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial and Civil Construction, Vologda State University (Vologda, Russia)
nadmix1958@yandex.ru

Morozov Andrey Vladimirovich

Student at the Faculty of Industrial Technologies, Penza State Technological University (Penza, Russia)
andrey_morozov_1998@list.ru

Nikulin Sergey Vitalievich

Student of the Institute of Mathematics, Natural and Computer Sciences, Vologda State University (Vologda, Russia)
sergeynikulin177@gmail.com

Popov Igor Pavlovich

Senior Lecturer, Department of Mechanical Engineering Technology, Metal-Cutting Machine Tools and Tools, Kurgan State University (Kurgan, Russia)
ip.popov@yandex.ru

Proshkin Victor Nikolaevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automation and Control, Penza State Technological University (Penza, Russia)
gradient13@gmail.com

Sapiev Azamat Zaurbievich

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Security and Applied Informatics, Maikop State Technological University (Maikop, Republic of Adygea)
sapiew@yandex.ru

Sergushicheva Anna Pavlovna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation and Computer Engineering, Vologda State University (Vologda, Russia)
annpas@list.ru

Solovyev Sergey Aleksandrovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial and Civil Construction, Vologda State University (Vologda, Russia)
solovevsa@vogu35.ru

Solovyeva Anastasia Andreevna

Postgraduate student of the Department of Industrial and Civil Construction, Vologda State University (Vologda, Russia)
solovevaaa@vogu35.ru

Sukonshchikov Alexey Alexandrovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Automation and Computer Engineering, Vologda State University (Vologda, Russia)
avt@vogu35.ru

Fedotovskiy Sergey Borisovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Control and Computer Systems, Vologda State University (Vologda, Russia)
fsb1960@yandex.ru

Shakhova Elena Nikolaevna

Senior Lecturer, Department of Industrial and Civil Construction, Vologda State University (Vologda, Russia)
shen1401@mail.ru

Shevtsov Leonid Sergeevich

student of the Civil Engineering Institute of the Vologda State University (Vologda, Russia)
sle6488@gmail.com

Shorin Vladimir Alexandrovich

Doctor of Chemistry, Professor, Professor of the Department of Highways, Vologda State University (Vologda, Russia)
ad@vogu35.ru

Yanyak Sergey Vladimirovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Vologda State University (Vologda, Russia)
tms@vogu35.ru

Научное издание

ВЕСТНИК ВОЛОГОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

Серия: Технические науки
№ 4 (14) / 2021

Главный редактор А. А. Кочкин

Свидетельство о регистрации СМИ: ПИ № ФС77-75456 от 05.04.2019 г.
выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций
(Роскомнадзор)

Подписано в печать 20.12.2021. Выпуск в свет 24.12.2021. Формат 60 × 84/8
Уч.-изд. л. 9,0. Усл. печ. л. 10,0. Тираж 56 экз. Заказ № 832. Бесплатно

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