

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ
ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ «АКАДЕМИЯ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ»
THE RUSSIAN ACADEMY OF NATURAL HISTORY
PUBLISHING HOUSE «ACADEMY OF NATURAL HISTORY»

НАУЧНОЕ ОБОЗРЕНИЕ • ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

№ 5

SCIENTIFIC REVIEW • TECHNICAL SCIENCES

2016

Учредитель:

Издательский дом

«Академия Естествознания»,

440026, Россия, г. Пенза,

ул. Лермонтова, д. 3

Founding:

Publishing House

«Academy Of Natural History»

440026, Russia, Penza,

3 Lermontova str.

Адрес редакции

440026, Россия, г. Пенза,

ул. Лермонтова, д. 3

Тел. +7 (499) 704-1341

Факс +7 (8452) 477-677

e-mail: edition@rae.ru

Edition address

440026, Russia, Penza,

3 Lermontova str.

Tel. +7 (499) 704-1341

Fax +7 (8452) 477-677

e-mail: edition@rae.ru

Подписано в печать 15.06.2016

Формат 60х90 1/8

Типография ИД

Издательский дом

«Академия Естествознания»,

440026, Россия, г. Пенза,

ул. Лермонтова, д. 3

Signed in print 05.02.2016

Format 60x90 8.1

Typography

Publishing House

«Academy Of Natural History»

440026, Russia, Penza,

3 Lermontova str.

Технический редактор Кулакова Г.А.

Корректор Андреев А.М.

Тираж 1000 экз.

Заказ НО 2016/5

Журнал «НАУЧНОЕ ОБОЗРЕНИЕ» выходил с 1894 по 1903 год в издательстве П.П. Сойкина. Главным редактором журнала был Михаил Михайлович Филиппов. В журнале публиковались работы Ленина, Плеханова, Циолковского, Менделеева, Бехтерева, Лесгафта и др.

Journal «Scientific Review» published from 1894 to 1903. P.P. Soykin was the publisher. Mikhail Filippov was the Editor in Chief. The journal published works of Lenin, Plekhanov, Tsiolkovsky, Mendeleev, Bekhterev, Lesgaft etc.



М.М. Филиппов (M.M. Philippov)

**С 2014 года издание журнала возобновлено
Академией Естествознания**

**From 2014 edition of the journal resumed by
Academy of Natural History**

Главный редактор: М.Ю. Ледванов

Editor in Chief: M.Yu. Ledvanov

Редакционная коллегия (Editorial Board)

А.Н. Курзанов (A.N. Kurzanov)

Н.Ю. Стукова (N.Yu. Stukova)

М.Н. Бизенкова (M.N. Bizenkova)

Н.Е. Старчикова (N.E. Starchikova)

Т.В. Шнуровозова (T.V. Shnurovozova)

НАУЧНОЕ ОБОЗРЕНИЕ • ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

SCIENTIFIC REVIEW • TECHNICAL SCIENCES

www.science-education.ru

2016 г.



***В журнале представлены научные обзоры,
литературные обзоры диссертаций,
статьи проблемного и научно-практического
характера***

The issue contains scientific reviews, literary dissertation reviews,
problem and practical scientific articles

СОДЕРЖАНИЕ

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕВОДОРОДНЫХ ЖИДКОСТЕЙ И ПРИМЕНЕНИЕ ИХ В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ТОПЛИВ	
<i>Астапов В.Н.</i>	5
СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ АППАРАТАМИ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА	
<i>Бабанова И.С.</i>	28
АНАЛИЗ ПРИЧИН НИЗКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ КАРЬЕРНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ	
<i>Власов Ю.А., Спирин Е.Н., Ляпин А.Н., Ляпина О.В., Чечулин К.Н.</i>	37
АНАЛИЗ КЛАССИФИКАЦИЙ ПОСЕЛКОВ ВТОРЫХ ЖИЛИЩ	
<i>Зиятдинов З.З.</i>	45
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТАЛЛА ПРИ РАЗЛИВКИ В КРУПНЫЕ ИЗЛОЖНИЦЫ	
<i>Ибраев И.К., Ибраева О.Т.</i>	58
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – НОВАЯ БАЗА ПОСТРОЕНИЯ И РАЗВИТИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	
<i>Лубенцова Е.В., Петраков В.А.</i>	64
ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЛИЯНИЯ СЕЗОННЫХ УСЛОВИЙ НА НАДЕЖНОСТЬ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ПОДВЕСКИ АВТОБУСОВ	
<i>Мальшаков А.В.</i>	81
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЛИЯНИЯ СЕЗОННЫХ УСЛОВИЙ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ОТКАЗОВ АВТОБУСОВ KAROSA C-934	
<i>Мальшаков А.В., Терехов А.С.</i>	84
ОЦЕНКА ЗНАЧИМОСТИ ФАКТОРОВ ВЛИЯЮЩИХ НА НАДЕЖНОСТЬ ПНЕВМОПОДВЕСКИ АВТОБУСОВ БОЛЬШОГО КЛАССА KAROSA C-934	
<i>Мальшаков А.В.</i>	87
РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ ДИСЦИПЛИНЫ «МЕХАНИКА ГРУНТОВ»)	
<i>Петухов А.Г.</i>	90
ИННОВАЦИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ СУДОВ И СРЕДСТВ ОКЕАНОТЕХНИКИ	
<i>Рашковский А.С., Воленюк Л.С.</i>	92
СЕЙСМИЧЕСКИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ	
<i>Ярошевич М.И., Ингель Л.Х., Лысенко Д.А.</i>	103

CONTENTS

THE STATE-OF-THE-ART REVIEW OF ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF HYDROCARBONIC LIQUIDS AND THEIR APPLICATION IN INFORMATION AND MEASURING SYSTEMS FOR QUALITY CONTROL OF FUELS <i>Astapov V.N.</i>	5
STRUCTURAL AND PARAMETRIC SYNTHESIS OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF DEVICE OF AIR COOLING <i>Babanova I.S.</i>	28
ANALYSIS OF THE REASONS OF LOW OPERATIONAL RELIABILITY OF CAREER DUMP TRUCKS <i>Vlasov Yu.A., Spirin E.N., Lyapin A.N., Lyapina O.V., Chechulin K.N.</i>	37
THE CLASSIFICATION ANALYSIS OF SECOND HOMES SETTLEMENTS <i>Ziyatdinov Z.Z.</i>	45
MATHEMATICAL MODEL OF CHANGE OF TEMPERATURE OF METAL THE CASTING OF THE MOLD IN THE LARGEST <i>Ibraev I.K., Ibrayeva O.T.</i>	58
INTELLECTUAL TECHNOLOGIES – THE NEW BASE CONSTRUCTION AND SYSTEMS DEVELOPMENT AUTOMATION OF COMPLEX BIOTECHNOLOGICAL PROCESSES <i>Lubentsova E.V., Petrakov V.A.</i>	64
SIMULATION MODEL THE REGULARITIES OF THE INFLUENCE OF SEASONAL CONDITIONS ON THE RELIABILITY OF AIR SUSPENSION BUSES <i>Malshakov A.V.</i>	81
MODELING THE REGULARITIES OF THE INFLUENCE OF SEASONAL CONDITIONS ON THE FAILURE RATE OF KAROSA C-934 <i>Malshakov A.V., Terekhov A.S.</i>	84
ASSESSING SIGNIFICANCE OF FACTORS AFFECTING THE RELIABILITY OF THE AIR SUSPENSION OF BUSES OF A LARGE CLASS OF KAROSA C-934 <i>Malshakov A.V.</i>	87
DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF DISTANCE LEARNING SYSTEM IN EDUCATIONAL PROCESS THE CASE OF A DISCIPLINE «SOIL ENGINEERING» <i>Petukhov A.G.</i>	90
INNOVATIONS IN CONSTRUCTION OF SHIPS AND OCEAN TECHNOLOGY MEANS <i>Rashkovsky A.S., Voleniuk L.S.</i>	92
SEISMIC MANIFESTATIONS OF THE ATMOSPHERIC PROCESSES <i>Yaroshevich M.I., Ingel L.Kh., Lysenko D.A.</i>	103

УДК 631.053

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕВОДОРОДНЫХ ЖИДКОСТЕЙ И ПРИМЕНЕНИЕ ИХ В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ТОПЛИВ

Астапов В.Н.

*ФГБОУВПО «Самарский государственный технический университет»,
Самара, e-mail: asta-2009@mail.ru*

В статье приведен аналитический обзор электрофизических характеристик углеводородных жидкостей и рекомендации по применению их в информационно-измерительных системах для контроля качества топлив. Во введении показана актуальность разработки информационно-измерительных систем для контроля качества товарных бензинов в технологическом потоке в режиме реального времени. В результате анализа акустических и электродинамических характеристик углеводородных топлив получены качественные предпосылки для разработки приборов контроля качества товарных бензинов. Получены частотные зависимости для электропроводности и диэлектрической проницаемости бензинов, которые отражают отличающуюся для каждого бензина совокупность общих и частных признаков, отождествляющих состав нефти из которой сделан бензин и компонентный состав бензина. Данные исследования позволяют установить критерий принадлежности товарных бензинов к тому или иному типу и позволили выделить основные направления технической реализации данных методов в устройствах контроля качества бензинов.

Ключевые слова: электрофизические характеристики, углеводородные жидкости, информационно-измерительные системы, акустические характеристики, электродинамические характеристики, электропроводность, диэлектрическая проницаемость, компонентный состав бензина, контроль качества бензинов

THE STATE-OF-THE-ART REVIEW OF ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF HYDROCARBONIC LIQUIDS AND THEIR APPLICATION IN INFORMATION AND MEASURING SYSTEMS FOR QUALITY CONTROL OF FUELS

Astapov V.N.

Samara State Technical University, Samara, e-mail: asta-2009@mail.ru

In article the state-of-the-art review of electrophysical characteristics of hydrocarbonic liquids and the recommendation about their application is provided in information and measuring systems for quality control of fuels. In introduction relevance of development of information and measuring systems for quality control of commodity gasolines in a technological flow in real time is shown. In an analysis result of acoustic and electrodynamic characteristics of hydrocarbonic fuels high-quality prerequisites for development of devices of quality control of commodity gasolines are received. Frequency dependences for conductivity are received and dielectric permeability of gasolines which reflect the set of the general and private signs identifying composition of oil differing for each gasoline of which gasoline and component composition of gasoline is made. These researches allow to establish criterion of belonging of commodity gasolines to this or that type and have allowed to allocate the main directions of a technical implementation of these methods in control units of quality of gasolines.

Keywords: electrophysical characteristics, hydrocarbonic liquids, information and measuring systems, acoustic characteristics, electrodynamic characteristics, conductivity, dielectric permeability, component composition of gasoline, quality control of gasolines

Исходя из особенностей топливно-энергетического баланса страны, технологическая структура мощностей переработки нефти в рассматриваемый период формировалась без достаточного развития процессов, углубляющих переработку нефти и повышающих качество продукции. Мощность углубляющих переработку нефти вторичных процессов составляла 19% к мощности первичной переработки нефти. Существенно отстает от требований времени развитие процессов, обеспечивающих качество моторных топлив и других нефтепродуктов [5, 6].

Федеральная программа реконструкции и модернизации предприятий российской нефтеперерабатывающей промышленно-

сти, представляющая по существу сводные планы нефтяных компаний, предусматривает для углубления переработки нефти и повышения качества продукции создание и развитие ряда современных технологических процессов.

Во всех регионах и странах мира принимаются жесткие государственные законы, ограничивающие выбросы в атмосферу углеводородов, оксидов серы, азота и тяжелых металлов при использовании моторных и котельных топлив, а также в процессе технологической переработки нефти.

Изменение инфраструктуры, номенклатуры спроса и условий работы НПЗ вызывает необходимость создания в России новых

и модернизации действующих технологических систем без остаточной переработки нефти, и производства высококачественных экологически чистых нефтепродуктов.

Одним из главных требований таких систем является максимальная оснащённость объекта автоматизации высокоточной информационно-измерительной техникой и АСУ ТП.

Российские нефтеперерабатывающие предприятия, в большинстве своем, не отвечают этим требованиям. Устаревшие и неточные датчики и измерительные системы, слабая оснащённость объектов системами АСУ ТП, изношенная запорная арматура, приготовление части нефтепродуктов смешением в резервуарах, а не в потоке – все это не позволяет существующим системам эффективно решать поставленную перед ними задачу.

В этих условиях актуальна постановка и решение задач контроля качества нефтепродуктов, а также разработка автоматизированных ИИС на их основе, учитывающих специфику отечественных НПЗ, слабую оснащённость АСУ ТП и низкую точность измерительных приборов.

Процесс смешения нефтепродуктов является завершающим и наиболее ответственным этапом в формировании не только качества, но и себестоимости товарной продукции.

Учитывая высокую производительность современных нефтеперерабатывающих заводов, а также непосредственную зависимость потребительских свойств готового продукта от физико-химических характеристик смешиваемых компонент, важнейшую роль в системах управления промышленными станциями смешения товарных бензинов приобретают информационно-измерительные и управляющие системы (ИИиУС) для оценки детонационной стойкости, готового продукта и его компонентов. Точность и быстрдействие ИИиУС во многом определяют качество производимой продукции.

Как показывает мировой и отечественный опыт, перспективным направлением разработки и создания таких ИИС является использование электрофизических методов, основанных на принципах электродинамики, оптоэлектроники, спектрометрии и акустики. При этом чаще всего используются зависимости детонационной стойкости от диэлектрической проницаемости, спектра поглощения, а также избыточного давления в реакторах холодно пламенного окисления (РХПО).

Проблеме создания ИИиУС и датчиковой аппаратуры на основе указанных электрофизических явлений посвящены работы ряда отечественных ученых

В.С. Рудик, А.С. Уваров, Н.Е. Конюхов). Среди зарубежных авторов следует отметить труды М.Н. Александрова, Б.Н. Гордеева, Ю.Д. Жукова (Украина); М. Steven, W. Huntington, E.M. Goodger, A.P. Valvade. (США); E.R. Finske, W.C. Jonston (Великобритания).

Кроме того, существующие измерительные устройства и системы обладают рядом принципиальных недостатков, связанных с влиянием на точность измерения внешних эксплуатационных факторов, региональных особенностей исходного сырья, со сложностью их настройки и эксплуатации и невозможностью работы в потоке.

При создании ИИиУС для управления смешением важной проблемой является не только измерение октанового числа готового продукта, но и определение его компонентного состава, определяющего тип бензина в соответствии с действующими стандартами на углеводородное топливо (ГОСТ Р 51105-97). Существующие ИИиУС и системы обеспечения качества нефтепродуктов используют в своей основе линейные модели октанового числа и разработанные на их основе экспериментальные калибровочные характеристики. Однако такой подход не учитывает вариативность октанового числа и физико-химических характеристик смешиваемых компонент, что создает высокую вероятность ложной идентификации типа бензина, условия для применения в производстве не предусмотренных стандартами экологически опасных компонент, и снижает качество товарной продукции.

Указанные недостатки во многом связаны с отсутствием научных основ создания ИИиУС для оценки октанового числа, встроенных в технологический процесс компаундирования бензинов, отвечающих современным требованиям по функциональным возможностям, точности, быстрдействию и достоверности идентификации нефтепродуктов с учетом региональных особенностей исходного сырья и компонентного состава.

В связи с этим разработка, теоретическое обоснование и внедрение ИИС, позволяющих оценивать октановые числа углеводородных топлив в потоке, и идентифицировать их компонентный состав представляет собой актуальную научно-техническую проблему. Решение данной проблемы позволит нефтеперерабатывающим предприятиям страны оптимизировать процессы в системах управления компаундированием, исключить рекламации по качеству готовой продукции, а также повысить ее конкурентоспособность на мировом рынке нефтепродуктов.

Настоящий обзор научных работ посвящен вопросам построения и развития теории информационно-измерительных систем физико-химического состава и свойства вещества, а именно разработке электрофизических методов контроля качества и математического моделирования процесса получения товарных бензинов, для повышения эксплуатационных характеристик технических средств ИИС для управления технологическими процессами и создания адаптивной системы управления технологическим процессом непрерывного смешения (компаундирования) жидких нефтепродуктов. Для создания такой адаптивной системы необходима разработка информационно-измерительной системы (ИИС) для контроля октанового числа, для измерения плотности и вязкости [1] нефтепродуктов в потоке и других приборов контроля и управления, необходимых для внедрения системы в промышленную эксплуатацию.

Товарный бензин как объект контроля, анализ показателей качества

Требования, предъявляемые к автомобильным бензинам, основного продукта нефтеперерабатывающих заводов, достаточно полно сформулированы в [8].

Это четыре основных группы требований: требования связанные с работой двигателя, требования эксплуатации, требования, обусловленные необходимостью и возможностью массового производства и экологические требования.

Наиболее важными эксплуатационными характеристиками бензинов является его испаряемость, которая характеризуется фракционным составом, давлением насыщенных паров и детонационной стойкостью, выражаемой октановым числом. Исходя из экологических требований, необходимо контролировать содержание в бензинах непредельных и ароматических углеводородов, антидетонаторов, сернистых соединений.

Современные автомобильные бензины, как правило, представляют собой смеси компонентов, получаемых различными технологическими процессами. В бензинах в зависимости от углеводородного состава сырья и технологии получения может содержаться более 200 [8] индивидуальных углеводородов различного строения, содержание которых, а также их взаимодействие между собой и определяет свойства бензина.

Оценка качества компонентов и товарных бензинов при их получении на нефтеперерабатывающих заводах осуществляется стандартными лабораторными методами по показателям физико-химических свойств,

нормируемых соответствующими документами (ГОСТ, ТУ, СТП, условиями контрактов).

Особое значение при приготовлении качественных бензинов имеют показатели качества, характеризующие эксплуатационные свойства товарных бензинов (октановые числа (ОЧ) по моторному и исследовательскому методам (MON, RON), плотность, фракционный состав, содержание свинца или кислородосодержащих, содержание ароматических соединений и т.п.).

Сокращение повышения ОЧ над нормированным, сокращение содержания дорогостоящих добавок (МГБЭ, ТЭС), рациональное использование компонентов товарных бензинов при приготовлении, дает экономии в десятки миллионов долларов в год [18].

Во время компаундирования нужно контролировать соотношение компонентов смешения (концентрации), их качественные характеристики, а также получаемый в результате смешения товарный бензин. Чем быстрее будет получен результат, характеризующий свойство полученного в результате смешения бензина, а также качество потока компонента, тем быстрее может быть внесена поправка в приготовление бензина.

Одним из методов быстрого (on-line) получения результата, характеризующего свойство бензина, является использование анализатора качества на потоке. Применение автоматических анализаторов качества нефтепродуктов позволяет реализовать оперативный контроль технологическим процессом смешения [18].

Технико-экономический эффект от внедрения информационно-измерительных систем на основе автоматических анализаторов качества при компаундировании обуславливается следующими факторами:

- улучшением качества товарной продукции и предотвращением выпуска некондиционного продукта;
- сокращением расходов на лабораторный аналитический контроль;
- получением информации характеризующей качество в реальном масштабе времени и возможности использования этой информации в адаптивных системах управления.

Использование стандартных лабораторных методов применяемых в нефтепереработке (ГОСТ-8226-82, ГОСТ 522-86) [22, 23] позволяет получить результат ОЧ не ранее чем через 1–2 часа. В реальных условиях работы заводских лабораторий, как правило, 2–3 часа.

Наряду со стандартными методами определения октановых чисел в настоящее время получают широкое распространение экспресс-методы, основанные на измерении электрофизических параметров бензинов.

К физико-химическим показателям, от которых зависит испаряемость бензинов, относят давление насыщенных паров, фракционный состав, скрытую теплоту испарения, коэффициент диффузии паров, вязкость, поверхностное натяжение, теплоемкость, плотность. Из перечисленных показателей важнейшими, определяющими испаряемость бензинов, являются давление насыщенных паров и фракционный состав. По вязкости, поверхностному натяжению, скрытой теплоте испарения, коэффициенту диффузии паров, теплоемкости бензины разного состава сравнительно мало различаются между собой, и эти различия нивелируются конструктивными особенностями двигателей. Давление насыщенных паров и фракционный состав являются функциями состава бензина, и эти показатели могут существенно различаться для разных бензинов. Эти два параметра определяют пусковые свойства бензинов, их склонность к образованию паровых пробок, физическую стабильность. Давление насыщенных паров зависит от температуры и от соотношения паровой и жидкой фаз и уменьшается с уменьшением температуры и увеличением отношения паровой фазы к жидкой. В лабораторных условиях давление насыщенных паров определяют при температуре 37,8°C и соотношении паровой и жидкой фаз (3,8–4,2): 1 в «Бомбе Рейда» (ГОСТ 1756-52) или аппарате с механическим диспергированием типа «Вихрь» (ГОСТ 28781-90). Фракционный состав бензинов определяют перегонкой на специальном приборе, при этом отмечают температуру начала перегонки, температуру выпаривания 10, 50, 90 % и конца кипения, или объем выпаривания при 70, 100 и 180°C. Требования к фракционному составу и давлению насыщенных паров бензинов определяются конструкцией автомобильного двигателя и климатическими условиями его эксплуатации. С одной стороны, необходимо обеспечить запуск двигателя при низких температурах, с другой стороны – предотвратить нарушения в работе двигателя, связанные с образованием паровых пробок при высоких температурах. Пусковые свойства бензина зависят от содержания в нем легких фракций, которое может быть определено по давлению насыщенных паров и температуре перегонки 10 % или объему легких фракций, выкипающих при температуре до 70°C. Чем ниже температура окружающего воздуха, тем больше легких фракций требуется для запуска двигателя.

Пусковые свойства бензинов ухудшаются с понижением давления их насыщенных паров, причем при давлении 34 кПа

концентрация паров бензина в рабочей зоне настолько мала, что запуск двигателя становится невозможным. Поэтому ГОСТ Р 51105-97 на автобензины предусматривает ограничение не только верхнего, но и нижнего уровня давления насыщенных паров. Однако чрезмерное содержание низкокипящих фракций в составе бензинов может вызвать неполадки в работе прогретого двигателя, связанные с образованием паровых пробок в системе топливоподачи. Причиной образования паровых пробок в автомобильном двигателе является интенсивное испарение топлива вследствие его перегрева. В условиях жаркого климата это явление может иметь массовый характер. Образование паровых пробок зависит от испаряемости бензина, температуры и конструкции двигателя. Чем выше давление насыщенных паров бензина, ниже температуры начала кипения и перегонки 10 % и больше объем фракции, выкипающей при температуре до 70°C, тем больше его склонность к образованию паровых пробок.

От содержания в бензине легкокипящих фракций зависит его физическая стабильность, т.е. склонность к потерям от испарения. Наибольшие потери от испарения имеют бензины, содержащие в своем составе легкокипящие углеводороды: бутаны, изопентан.

От фракционного состава зависят такие показатели как скорость прогрева двигателя, его приемистость, износ цилиндропоршневой группы. Наиболее существенное влияние на скорость прогрева двигателя, его приемистость оказывает температура перегонки 50 % бензина. Температура выкипания 90 % бензина также влияет на эти характеристики, но в меньшей степени. Скорость прогрева двигателя, его приемистость зависят и от температуры окружающего воздуха. Чем ниже температура воздуха, тем ниже должна быть температура перегонки 50 % бензина для обеспечения быстрого прогрева и хорошей приемистости двигателя. При понижении температуры это влияние усиливается. Поэтому нормы на этот показатель также зависят от температурных условий эксплуатации и различаются по сезону и климатическим зонам. Для нормальной работы двигателя большое значение имеет полнота испарения топлива, которая характеризуется температурой перегонки 90 % бензина и температурой конца кипения. При неполном испарении бензина во впускной системе часть его может поступать в камеру сгорания в жидком виде, смывая масло со стенок цилиндров. Жидкая пленка через зазоры поршневых колец может проникать в картер, при этом происходит разжижение

масла. Это приводит к повышенным износам и отрицательно влияет на мощность и экономичность работы двигателя. Снижение температуры конца кипения бензинов может повысить их эксплуатационные свойства, однако это снижает ресурс бензинов. Как было указано выше, требования к испаряемости автомобильных бензинов в значительной мере зависят от температурных условий их применения. С учетом климатических особенностей нашей страны автомобильные бензины по фракционному составу и давлению насыщенных паров подразделяют на два вида: зимний и летний. По показателям испаряемости ГОСТ Р 51105-97 предусматривает пять классов бензинов [8]. Требования к фракционному составу и давлению насыщенных паров определены в зависимости от сезона и климатического района применения. Такая классификация в большей степени удовлетворяет требованиям эксплуатации двигателей в разных климатических условиях, и будет способствовать более экономичному и рациональному использованию топлив.

Детонационная стойкость характеризует способность автомобильных бензинов противостоять самовоспламенению при сжатии. Высокая детонационная стойкость топлив обеспечивает их нормальное сгорание на всех режимах эксплуатации двигателя. Процесс горения топлива в двигателе носит радикальный характер. При сжатии рабочей смеси температура, и давление повышаются и начинается окисление углеводородов, которое интенсифицируется после воспламенения смеси. Если углеводороды несгоревшей части топлива обладают недостаточной стойкостью к окислению, начинается интенсивное накапливание перекисных соединений, а затем их взрывной распад. При высокой концентрации перекисных соединений происходит тепловой взрыв, который вызывает самовоспламенение топлива. Самовоспламенение части рабочей смеси перед фронтом пламени приводит к взрывному горению оставшейся части топлива, к так называемому детонационному сгоранию. Детонация вызывает перегрев, повышенный износ или даже местные разрушения двигателя и сопровождается резким характерным звуком, падением мощности, увеличением дымности выхлопа. На возникновение детонации оказывает влияние состав применяемого бензина и конструктивные особенности двигателя.

Показателем детонационной стойкости автомобильных бензинов является октановое число, показывающее содержание изооктана (в % объемных) в смеси с н-гептаном, которая по детонационной

стойкости эквивалентна топливу, испытываемому в стандартных условиях. В лабораторных условиях октановое число автомобильных бензинов и их компонентов определяют на одноцилиндровых моторных установках УИТ-85 или УИТ-65. Склонность исследуемого топлива к детонации оценивается сравнением его с эталонным топливом, детонационная стойкость которого известна. Октановое число на установках определяется двумя методами: моторным (по ГОСТ 511-82) и исследовательским (по ГОСТ 8226-82). Методы отличаются условиями проведения испытаний. Испытания по моторному методу проводят при более напряженном режиме работы одноцилиндровой установки, чем по исследовательскому. Поэтому октановое число, определенное моторным методом, обычно ниже октанового числа, определенного исследовательским методом. Октановое число, полученное моторным методом в большей степени характеризует детонационную стойкость топлива при эксплуатации автомобиля в условиях повышенного теплового форсированного режима, октановое число, полученное исследовательским методом, больше характеризует бензин при работе на частичных нагрузках в условиях городской езды. Разницу между октановыми числами бензина, определенными двумя методами, называют чувствительностью бензина. Наибольшей чувствительностью (9–12 ед.) отличаются бензины каталитического крекинга и каталитического риформинга, содержащие непредельные и ароматические углеводороды. Менее чувствительны (1–2 ед.) к режиму работы двигателя алкилбензин и прямогонные бензины, состоящие из парафиновых и изопарафиновых углеводородов. Для автомобильных бензинов, за исключением А-76, определяют и нормируются октановые числа, определенные двумя методами. Требования к детонационной стойкости бензинов зависят от конструктивных особенностей двигателя, определяющим среди которых является степень сжатия. Так как увеличение степени сжатия позволяет повысить эксплуатационные показатели и экономичность работы двигателя, оно является определяющим в развитии автомобилестроения. Таким образом, прогресс в автомобилестроении приводит к постоянному повышению требований к детонационной стойкости применяемых бензинов.

Детонационная стойкость автомобильных бензинов определяется их углеводородным составом. Наибольшей детонационной стойкостью обладают ароматические углеводороды. Самая низкая детонационная стойкость у парафиновых углеводородов

нормального строения, причем она уменьшается с увеличением их молекулярной массы. Изопарафины и олефиновые углеводороды обладают более высокими антидетонационными свойствами по сравнению с нормальными парафинами. Увеличение степени разветвленности и снижение молекулярной массы повышает их детонационную стойкость. По детонационной стойкости нефтени превосходят парафиновые углеводороды, но уступают ароматическим углеводородам. Наибольшую чувствительность – разность между октановыми числами по исследовательскому и моторному методам – имеют олефиновые углеводороды. Чувствительность ароматических углеводородов несколько ниже. Для парафиновых углеводородов эта разница очень мала, а высокомолекулярные низкооктановые парафиновые углеводороды имеют отрицательную чувствительность.

Антидетонационные свойства бензинов, получаемых различными технологическими процессами, определяются входящими в их состав углеводородами. Самую низкую детонационную стойкость имеют бензины прямой перегонки, состоящие, в основном, из парафиновых углеводородов нормального строения, причем она снижается с повышением температуры конца кипения. Октановые числа, определяемые по моторному методу, прямогонных фракций, выкипающих до 180°C, обычно составляют 40–50 ед. Детонационная стойкость фракций с температурой начала кипения 85°C несколько выше – 65–70 ед. Исключение составляют прямогонные бензины, получаемые из нефтей нефтяного основания (сахалинские, азербайджанские и др.), их октановые числа достигают 71–73 ед. Однако ресурсы этих нефтей весьма ограничены.

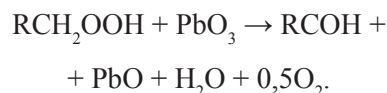
Для повышения октановых чисел прямогонных бензинов их подвергают каталитическому риформингу. Октановые числа бензинов каталитического риформинга зависят от жесткости режима процесса. При жестком режиме они достигают ОЧИ = 95–99 (исследовательский метод) и ОЧМ = 86–90 (моторный метод), при мягком режиме соответственно 83–85 и 74–79.

Бензины термических процессов (крекинга, коксования) содержат до 60 % олефиновых углеводородов и по детонационной стойкости превосходят прямогонные бензины: ОЧИ = 68–75, ОЧМ = 62–69. Бензины каталитического крекинга помимо олефиновых углеводородов содержат ароматические и изопарафиновые углеводороды. Их детонационная стойкость выше, чем бензинов, получаемых термическими процессами.

Для повышения октановых чисел товарных бензинов используют также специальные антидетонационные присадки и высокооктановые компоненты.

С точки зрения эксплуатационных свойств получаемых бензинов, технологический путь является более предпочтительным. Для строительства новых технологических установок с целью получения высокооктановых бензинов и компонентов требуются значительные капитальные затраты. Учитывая постоянно возрастающие требования к уровню детонационной стойкости товарных бензинов, размеры необходимых вложений также увеличиваются.

Самым дешевым и до недавнего времени наиболее распространенным способом повышения детонационной стойкости товарных бензинов было добавление к ним алкилсвинцовых антидетонаторов, в частности тетраэтил- или тетраметилсвинца в виде этиловой жидкости. Бензины, в которые добавлена этиловая жидкость, называют этилированными. При высоких температурах в камере сгорания тетраалкилсвинец разлагается с образованием алкильных радикалов и свинца, который далее окисляется с образованием диоксида свинца. Последний, вступает в реакцию с гидроперекисями, разрушая их с образованием малоактивных продуктов окисления и оксида свинца:



Оксид свинца подвергается окислению с образованием активного диоксида свинца, который вновь вступает в реакцию с гидроперекисями, прерывая радикальный процесс окисления и тем самым предотвращая детонацию. Тетраэтилсвинец (ТЭС) более распространен, чем тетраметилсвинец. Последний, более эффективен при применении в высокоароматизированных, высокооктановых бензинах. В России производится только тетраэтилсвинец. Алкилсвинцовые антидетонаторы в разной степени повышают октановые числа различных углеводородов. Способность бензинов к повышению детонационной стойкости при добавлении антидетонаторов называют приемистостью. Наибольшую приемистость к тетраэтилсвинцу имеют парафиновые углеводороды и содержащие их прямогонные бензины и алкилбензин. Меньшей приемистостью к ТЭС обладают ароматические и олефиновые углеводороды и содержащие их бензины каталитического риформинга и крекинга. Нефтяные углеводороды занимают промежуточное положение.

Алкилсвинцовые антидетонаторы так же, как и продукты их сгорания, высоко токсичны, поэтому в настоящее время четко наметилась тенденция к отказу от их применения при производстве автомобильных бензинов. В ряде стран применение этилированных бензинов запрещено законом. Помимо высокой токсичности применение этилированных бензинов препятствует широкому использованию на автомобилях катализаторов дожигания отработавших газов, так как продукты сгорания свинца отравляют катализатор.

В качестве альтернативы алкилсвинцовым антидетонаторам для повышения детонационной стойкости автомобильных бензинов в России допущены и используются при производстве бензинов органические соединения марганца, железа, ароматические амины. Широкое распространение в России и за рубежом при производстве высокооктановых бензинов получил метилтретбутиловый эфир (МТБЭ). МТБЭ имеет октановые числа смешения: 115–135 по исследовательскому методу и 98–110 по моторному. В настоящее время для повышения октанового числа рекомендованы высокооктановые оксигенаты МТБЭ и ДИПЭ.

Автомобильные бензины должны быть химически нейтральными и не вызывать коррозию металлов и емкостей, а продукты их сгорания – коррозию деталей двигателя. Коррозионная активность бензинов и продуктов их сгорания зависит от содержания общей и меркаптановой серы, кислотности, содержания водорастворимых кислот и щелочей, присутствия воды. Эти показатели нормируются в нормативно-технической документации на бензины. Бензин должен выдерживать испытание на медной пластинке. При квалификационных испытаниях автомобильных бензинов определяется также их коррозионная активность в условиях конденсации воды по ГОСТ 18597-73.

Эффективным средством защиты от коррозии топливной аппаратуры является добавление в бензины специальных антикоррозионных или многофункциональных присадок.

Автомобильные бензины должны изготавливаться в соответствии с требованиями действующего стандарта и по технологической документации, утвержденной в установленном порядке.

По физико-химическим и эксплуатационным показателям автомобильные бензины должны соответствовать нормам и требованиям, указанным в ГОСТ.

В автомобильный бензин, содержащий продукты термического и каталитического крекинга, коксования и пиролиза, для обеспечения нормы по показателю «индукцион-

ный период» при изготовлении допускается добавлять антиокислитель в следующем процентном отношении к указанным выше продуктам вторичных процессов: не более 0,10% антиокислителя ФЧ-16 или ионола, или не более 0,15% антиокислителя Агидол-12 [8].

Анализ акустических характеристик жидких углеводородных сред

В различных источниках разрознено были рассмотрены акустические характеристики жидких углеводородных сред и их взаимосвязь с электрофизическими параметрами. В результате такого анализа были получены качественные предпосылки для разработки приборов контроля качества углеводородных топлив, с использованием зависимостей акустических характеристик от плотности и вязкости среды. Однако для технической реализации данного метода требуется более глубокое исследование поведения ультразвука в жидких средах и особенно в растворах.

Скорость распространения звука однозначно связана с адиабатической сжимаемостью среды, в которой распространяется звук, уравнением

$$a = \sqrt{\frac{1}{\beta \rho}}, \quad (1)$$

где β – адиабатическая сжимаемость; ρ – плотность.

Это соотношение устанавливает связь между скоростью звука и некоторыми важными физико-химическими параметрами вещества.

Второй величиной, измеряемой при акустических исследованиях, является коэффициент поглощения звука [1].

Амплитуда плоской волны U_0 уменьшается после того, как волна пройдет путь x до величины U , определяемой по уравнению [11].

$$U = U_0 e^{-\alpha x}, \quad (2)$$

где α – коэффициент поглощения.

Учитывая поглощение акустической энергии, вызываемое вязкостью среды, найдем:

$$\alpha_1 = \frac{8\pi^2 \eta}{3\lambda^2 \rho a}, \quad (3)$$

где η – коэффициент вязкости; λ – длина волны; ρ – плотность; a – скорость звука.

Потери акустической энергии, вызываемые теплопроводностью, учитываются [11] коэффициентом поглощения a_2 , равным

$$a_2 = \frac{2\pi^2 K}{\lambda^2 \rho a c_p} \left(\frac{c_p}{c_v} \right) - 1, \quad (4)$$

где K – коэффициент теплопроводности.

Общий коэффициент поглощения α будет равен сумме коэффициентов поглощения α_1 и α_2 ,

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2. \quad (5)$$

Соотношение коэффициентов таково, что $\alpha_2 \approx 10\% \cdot \alpha_1$.

Потери акустической энергии α_3 , вызванные теплоизлучением, обычно не учитываются, так как они очень малы и составляют примерно $0,5\% \alpha_1$.

Введя второй коэффициент вязкости η' [11], общий коэффициент поглощения можно выразить вместо суммы $(\alpha_1 + \alpha_2)$ уравнением

$$\alpha = \frac{2\pi^2}{\lambda^2} \left\{ \frac{4}{3} \eta + \eta' + \left(\frac{c_p}{c_{vp}} - 1 \right) \frac{K}{c} \right\}. \quad (6)$$

Скорость звука в жидкости убывает с температурой почти линейно.

На рис. 1 приведены результаты исследования изменения скорости звука от изменения температуры в углеводородных жидкостях, находящихся под давлением насыщенного пара в интервале температур, начиная от комнатной температуры вплоть до критической.

Из данных графиков следует, что зависимость скорости звука от температуры сохраняется почти до критической температуры. Это справедливо для весьма разнообразных жидкостей, в том числе насыщенных углеводородов, ароматических углеводородов и спиртов.

Приведенные данные описываются уравнением

$$a = a_{40}(1 - \alpha \Delta t), \quad (7)$$

где a_{40} – скорость звука при 40°C ; Δt – разность температур и α – постоянная, значения которой приведены в табл. 1.

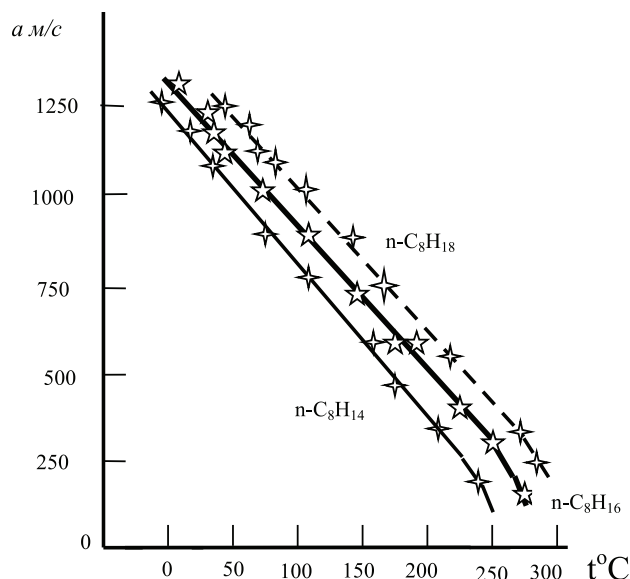


Рис. 1. Зависимость скорости звука от температуры в углеводородах

Таблица 1

Значения постоянной α

Жидкость	a_0 (40°C), м/с	α	Интервал температур ($^\circ\text{C}$)
<i>n</i> -гексан	1164	0,00380	20–250
<i>n</i> -гептан	1091	373	20–250
<i>n</i> -октан	1160	336	10–240
Толуол	1420	286	20–240
Четыреххлористый углерод	926	316	50–240
Метилацетат	928		
Этилацетат	946	496	90–185
Бутилацетат	1254	466	90–200
Метиловый спирт	1096	294	20–250
Этиловый спирт	1110	331	0–180
Пропилацетат	1160	346	20–160
Бензол	1228	362	40–240

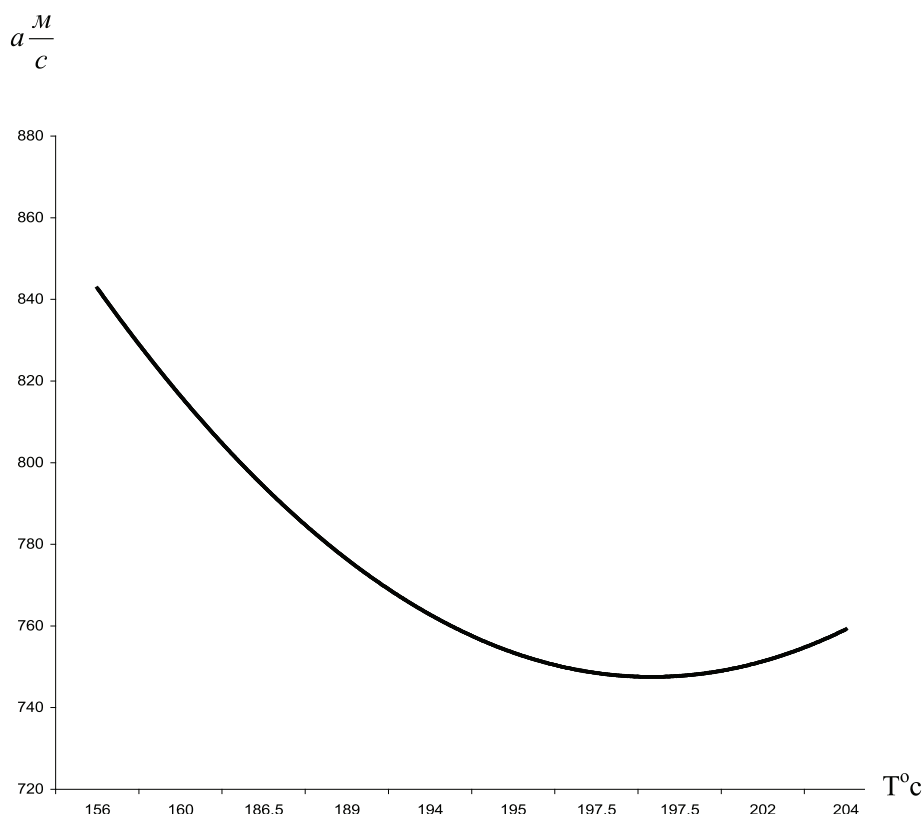


Рис. 2. Зависимость скорости звука от температуры в толуоле при постоянной плотности

В случае измерения скоростей звука в жидкостях, находящихся под давлением собственных паров, измеренные величины скоростей звука включают изменения, вызванные как непосредственно влиянием температуры, так и влиянием изменения плотности, также меняющейся с температурой. Поэтому важными являются измерения скоростей звука при разных температурах в условиях постоянной плотности исследуемой жидкости. Результаты подобных измерений для толуола приведены на рис. 2.

В этом случае обнаруживается закономерность [11], что с изменением температуры при неизменной плотности скорость звука первоначально уменьшается, достигает минимума и затем начинает возрастать. Было обнаружено, что простая линейная зависимость скорости звука в жидкости от температуры нарушается вблизи критической температуры и вблизи температуры затвердевания жидкости. Отступление от линейной зависимости вблизи температуры затвердевания было обнаружено в бензоле, нитробензоле, хлорбензоле, а также в ряде предельных углеводородов, и *n*-бутиловом спирте. Экспериментальные данные приведены в табл. 2.

Таблица 2

Скорость звука в толуоле при разных температурах и постоянной плотности $\rho = 0,7881 \text{ Г/см}^3$

$P, \text{атм.}$	$t, ^\circ\text{C}$	$a, \text{м/с}$
7,5	156	866,61
8	160	821,33
21	186,5	742,68
26	189	739,41
41	194	826,47
44,5	195	751,55
51,5	197,5	751,55
56	197,5	751,55
67	202	751,55
70,5	204	749,91

По измеренным значениям скорости звука в жидкостях определяется адиабатическая сжимаемость жидкостей $\beta_{\text{ад}}$ по уравнению

$$\beta_{\text{ад}} = \frac{1}{a^2 \rho}. \quad (8)$$

Зная адиабатическую сжимаемость и коэффициент термического расширения

$\alpha_{\text{тр}}$, можно определить изотермическую сжимаемость $\beta_{\text{из}}$

$$\beta_{\text{из}} = \beta_{\text{ад}} + \frac{T\alpha_{\text{тр}}}{\rho c_p}. \quad (9)$$

Определив коэффициент изотермической сжимаемости, можно вычислить не поддающуюся непосредственному экспериментальному определению теплоемкость жидкости при постоянном объеме C_V по уравнению

$$C_V = \frac{c_p}{a^2 \beta_{\text{из}} \rho}. \quad (10)$$

Определяемые на основании акустических измерений характеризующие вещества величины $\beta_{\text{ад}}$, $\beta_{\text{из}}$, C_V и $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ имеют большое значение для термодинамических расчетов и представляют большой интерес для физико-химических исследований. В частности аналитические зависимости термодинамических функций от свойств смешиваемых компонентов и независимых переменных: температуры, давления и числа молей использовались автором для разработки математической модели октанового числа товарного бензина [1]. Можно представить себе иное направление использования акустических измерений в целях физико-химических исследованиях, а именно просматривается новый способ определения октанового числа бензинов. Этому способствуют следующие рассуждения. Адиабатическая сжимаемость вещества $\beta_{\text{ад}}$, как известно из термодинамики, однозначно связана с внутренней энергией вещества U соотношением

$$\frac{1}{\beta_{\text{ад}}} = V_o \frac{\partial U}{\partial V^2}, \quad (11)$$

где V – объем.

Если принять в качестве рабочей гипотезы определение жидкого состояния, предложенное впервые Бриллюэном, согласно которому жидкость отличается от соответствующего твердого тела отсутствием модуля сдвига, то можно представить распространение плоской волны в жидкости происходящим как бы вдоль одномерного кристалла. В этом случае удастся получить выражение для скорости звука в виде функции от плотности жидкости и величин, определяющих силовое поле молекул [11].

Если принять, что внутренняя энергия жидкости является в основном потенциальной энергией взаимодействия молекул, и при подсчете потенциальной энергии ограничиться учетом взаимодействия мо-

лекулы только со своими ближайшими соседями, игнорируя взаимодействие с более отдаленными молекулами, то можно получить для скорости звука уравнение

$$a = \sqrt{\frac{\varphi''(r)}{r\rho}}, \quad (12)$$

где r – расстояние между молекулами; ρ – плотность жидкости; $\varphi''(r)$ – вторая производная от $\varphi(r)$ (потенциальной энергии взаимодействия двух соседних молекул, выраженной как функция расстояния между ними) по r .

Согласно правилу Рао [11], произведение молекулярного объема на корень третьей степени из скорости звука дает величину, не зависящую от температуры

$$a^{1/3} \frac{M}{\rho} = R. \quad (13)$$

Здесь M – молекулярный вес; ρ – плотность; a – скорость звука; R – молекулярная скорость звука (величина не зависящая от температуры).

Молекулярная скорость звука устанавливает общую связь в поведении скоростей звука для всех жидкостей. Было установлено, что величина R обладает аддитивными свойствами наподобие молекулярной рефракции, парахора, постоянной Ван-дер-Ваальса b и ряда других величин.

Зависимость величины R от молекулярного веса выражается уравнением

$$R = \alpha M + \beta, \quad (14)$$

где α и β – постоянные для данного гомологического ряда величины и M – молекулярный вес. Значения α и β для некоторых гомологических рядов приведены в табл. 3.

Описанные свойства молекулярной скорости звука делают эту величину ценной для целей физико-химических исследований. Пользуясь конститутивными свойствами R , можно применять акустические измерения для подтверждения предполагаемой структуры органических соединений.

Эмпирически установлено [11], что температура кипения вещества является линейной функцией логарифма R ,

$$T_{\text{кип}} = \alpha + \beta \lg R. \quad (15)$$

При этом в границах данного гомологического ряда величины α и β сохраняют постоянное значение. Отклонения наблюдаются, как видно из рис. 3, для ассоциированных жидкостей.

Данные отклонения от правила Рао используются для определения ассоциации жидкостей.

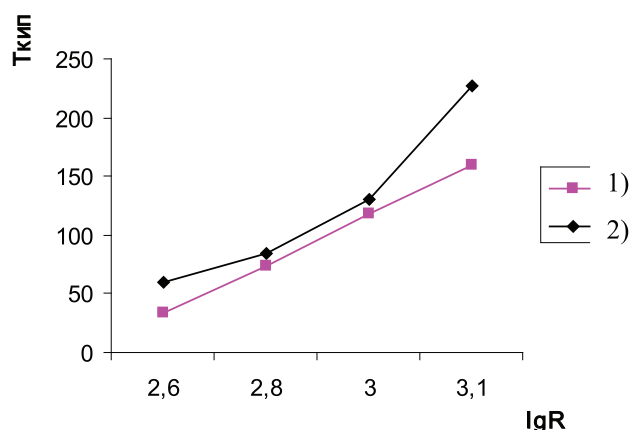


Рис. 3. Связь между температурой кипения и молекулярной скоростью:
1 – ароматические углеводороды; 2 – одноосновные спирты

Таблица 3

Постоянные для гомологического ряда

Гомологический ряд	α	β
Насыщенные углеводороды	13,97	+155
Ароматические углеводороды	14,02	-120
Кетоны	13,99	-48
Одноосновные спирты	14,00	-32

В качестве меры относительной ассоциации принято отношение

$$\frac{\sqrt[3]{a_0}}{\rho_0} \bigg/ \frac{\sqrt[3]{a_t}}{\rho_t} = R_{\text{отн}}, \quad (16)$$

где a_0 и ρ_0 – скорость звука и плотность при некоторой фиксированной температуре, например при 0°C , а a_t и ρ_t – те же величины соответственно при температуре опыта.

Определено, что для жидкостей, подчиняющихся закону соответственных состояний [11], квадрат скорости звука прямо пропорционален критической температуре и обратно пропорционален молекулярному весу

$$a^2 = \frac{T_k}{M} f(\theta), \quad (17)$$

Соотношение (17) позволяет объяснить некоторые эмпирически установленные закономерности. Было найдено, что произведение температурного коэффициента скорости звука $\frac{\Delta a}{\Delta T}$ на корень квадратный из молекулярного веса, представляет собою приблизительно постоянную величину

$$\frac{\Delta a}{\Delta T} M^{1/2} = 39,0 \text{ м/сг} \cdot \text{рад}. \quad (18)$$

Табл. 4 иллюстрирует сказанное.

Таблица 4

Эмпирически установленные закономерности

Вещество	$\frac{\Delta a}{\Delta T}$	$\frac{\Delta a}{\Delta T} M^{1/2}$
Гексан	4,37	41
Гептан	4,07	40,7
Толуол	4,06	38,9
Метилацетат	2,83	36,3
Этилацетат	4,6	39,6
Пропилацетат	4,4	41,3
Бутилацетат	3,68	39,7

Соотношение (18) следует из (17), переписав его в виде

$$a = f_1(\theta) \sqrt{\frac{T_k}{M}}, \quad (19)$$

продифференцировав по θ и приняв для небольших сравнительно изменений температуры, что функция $f_1(\theta)$ линейно зависит от θ , получим:

$$M^{1/2} \frac{da}{dT} = \text{const} \sqrt{T_k}. \quad (20)$$

Как мы видим, применение закона соответственных состояний позволило не только теоретически получить найденную эмпирически закономерность, но и установить границы ее применимости.

Из табл. 5 можно убедиться, что молекулярная скорость звука сохраняет постоянство в широком интервале температур вплоть до температур, близких к точке перехода жидкости в твердое состояние.

Введя обобщенные термодинамические функции, позволившие учесть молекулярные взаимодействия на больших расстояниях и их влияние на распространение звука, В. Владимирский [11] пришел к выводу о наличии дисперсии, обусловленной молекулярными взаимодействиями, отличительной чертой которой является то, что скорость звука может, как возрастать с возрастанием частоты колебаний, так и убывать с ростом частоты. Последнее имеет большое значение, поскольку, отрицательная дисперсия экспериментально была обнаружена рядом исследователей.

Таблица 5
Молекулярная скорость звука

Жидкость	R	Интервал температур (К)	Отклонение R от средней величины (%)
Бензол	977	279–348	0,9
Гексан	1359	200–301	0,3
Гептан	1549	210–291	0,4
Октан	1736	217–294	0,3
Метил-ацетат	842	218–296	0,6
Пропил-ацетат	1227	213–295	0,5
Бутиловый спирт	996	223–294	0,5

Автором [1] было предложено использовать данные о поглощении звука в жидкостях для классификации жидкостей, учитывающей их физико-химические особенности.

Также интересно будет рассмотреть данное предложение для идентификации товарных бензинов по их составу для проведения калибровки октанометров.

Измерения скоростей звука в жидкостях можно использовать как для определения

отношения теплоемкостей $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$, так и для определения постоянных, в каком либо уравнении состояния. Используя обычные термодинамические соотношения между адиабатической и изотермической сжимаемостью, можно показать, что

$$\gamma = 1 + \frac{T\alpha^2 a^2}{c_p J}, \quad (21)$$

где T – абсолютная температура; α – коэффициент объемного термического расширения; a – скорость звука; J – механический эквивалент теплоты; c_p – теплоемкость при постоянном давлении. Таким образом, зная скорость звука a и T , α и c_p , можно определить γ .

Зная скорость звука при двух температурах, T_1 и T_2 , и считая, что в этом интервале температур постоянные уравнения Ван-дер-Ваальса не изменяются, их можно определить, если известны значения коэффициента расширения α и теплоемкости при постоянном давлении c_p .

Данное заключение теоретически подтверждает способ определения октанового числа, предложенный творческим коллективом Рязанской государственной сельскохозяйственной академии им. проф. П.А. Костычева. В данном способе в качестве информационных параметров используют значения скоростей распространения ультразвуковой волны в бензинах при двух различных фиксированных температурах, а октановое число (ОЧ) определяют по формуле:

$$Q_{\text{ли}} = 40 \left[\frac{(V_1 - V_2)}{100} + \frac{2000}{V_2} \right],$$

где $Q_{\text{ли}}$ – октановое число бензина, определенному исследовательским методом; V_1 – скорость распространения ультразвука в бензине при температуре $t_1 = 20^\circ\text{C}$, м/с; V_2 – скорость распространения ультразвука в бензине при температуре $t_1 = 40^\circ\text{C}$, м/с. Некоторые данные о скоростях ультразвука в жидкостях приведены в табл. 6, 7 и 8.

Молекулярная скорость звука в растворах различных веществ оказывается также не зависящей от температуры [11]. Таким образом, соотношение между скоростью звука в жидкости и плотностью последней не является свойством только индивидуальных жидкостей, но может быть применено и к растворам. То есть молекулярная скорость в растворе является аддитивной функцией состава раствора. Скорости звука некоторых смесей представлены в табл. 9.

Таблица 6
Скорость звука
в насыщенных углеводородах

Жидкость	R	Интервал температур (К)	Отклонение R от средней величины (%)
Бензол	977	279–348	0,9
Гексан	1359	200–301	0,3
Гептан	1549	210–291	0,4
Октан	1736	217–294	0,3
Метил-ацетат	842	218–296	0,6
Пропил-ацетат	1227	213–295	0,5
Бутиловый спирт	996	223–294	0,5

Таблица 7

Плотность некоторых жидкостей, скорость звука в них
и температурные коэффициенты скоростей звука

Жидкость	Химическая формула	$T, ^\circ\text{C}$	Скорость звука $a, \text{ м/с}$	Плотность $\rho, \text{ г/см}^3$	$\frac{\Delta a}{a} \cdot 10^3$
Ацетон	CH_3COCH_3	20	1190	0,791	3,8
Бензол	C_6H_6	20	1324	0,879	4,657
Изобутиловый спирт	$\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$	20	1206	0,8059	2,65
<i>n</i> -гексан	C_6H_{14}	20	1116	0,660	
<i>n</i> -гептан	C_7H_{16}	20	1154	0,684	
Гексанол	$\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}$	20	1318	0,822	
Метаксилол	$\text{C}_6\text{H}_4(\text{CH}_3)_2$	20	1357	0,8657	
Диоксан	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$	25	1376	1,034	
Метиловый спирт	CH_3OH	20	1123	0,7914	2,9
Октан	C_8H_{18}	20	1192	0,702	
Пентан (изо)	C_5H_{12}	20	992	0,62	4,8
Пентаизобутилен	$(\text{C}_4\text{H}_8)_5$	20	1434	0,981	
Толуол	C_7H_8	20	1237	0,866	3,2
Триизобутилен	$(\text{C}_4\text{H}_8)_3$	20	1206	0,7579	
Тетраизобутилен	$(\text{C}_4\text{H}_8)_4$	20	1281	0,7907	
Циклогексан	C_6H_{12}	20	1278	0,778	
Этилен-гликоль	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$	25	1658	1,113	
<i>n</i> -пентан	C_5H_{12}	20	1020	0,626	
Циклогексанол	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}$	25	1454	0,962	
Циклогексанон	$\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}$	25	1423	0,948	

Таблица 8

Скорость звука и плотности в ряду 1-олефинов для трех температур

Вещество	Химическая формула	Скорость звука, м/с			Плотность, г/см ³		
		10 °C	20 °C	30 °C	10 °C	20 °C	30 °C
Гептилен	C_7H_{14}	1189	1128	1082	0,7069	0,6995	0,6910
Октилен	C_8H_{16}	1229	1184	1146	0,7238	0,7183	0,7100
Нонилен	C_9H_{18}	1258	1218	1179	0,7411	0,7330	0,7252
Децилен	$\text{C}_{10}\text{H}_{20}$	1290	1250	1214	0,7510	0,7435	0,7359
Ундецилен	$\text{C}_{11}\text{H}_{22}$	1315	1275	1235	0,7594	0,7523	0,7447
Тридецилен	$\text{C}_{13}\text{H}_{26}$	1353	1313	1276	0,7739	0,7670	0,7596
Пентадецилен	$\text{C}_{15}\text{H}_{30}$	1390	1351	1313	0,7867	0,7800	0,7731

Таблица 9

Значения a_o и α для смесей с различным содержанием бензола и толуола

Содержание $\text{C}_6\text{H}_6, \%$	$a_o, \text{ м/с}$	α	Содержание C_7H_8	$a_o, \text{ м/с}$	α
20	950	$4035 \cdot 10^{-6}$	20	952	$3860 \cdot 10^{-6}$
25	1010	$4290 \cdot 10^{-6}$	25	1020	$3554 \cdot 10^{-6}$
50	1080	$4166 \cdot 10^{-6}$	50	1090	$3364 \cdot 10^{-6}$
80	1104	$3801 \cdot 10^{-6}$	80	1160	$2874 \cdot 10^{-6}$

Скорость звука в смесях $C_6H_6 - CCl_4$ и $C_7H_8 - CCl_4$ различного состава.

$$a = a_0(1 - \alpha\Delta t),$$

где a_0 – скорость звука при $30^\circ C$.

С точки зрения физико-химического исследования жидких систем большой интерес представляют акустические свойства бинарных смесей, обладающих ограниченной растворимостью. Для таких систем существует определенная температура, называемая критической температурой растворения, выше которой компоненты системы смешиваются во всех отношениях.

Рассеяние звука в системах частично смешивающихся жидкостей было исследовано Ата Бердыевым. На рис. 4 приводятся результаты измерения коэффициента поглощения звука в смеси метиловый спирт – гексан при различных температурах. Для сравнения на том же рисунке изображено изменение с температурой коэффициента поглощения звука в чистом метиловом спирте и гексане. Как явствует из графика, вблизи критической точки растворения коэффициент поглощения звука аномально возрастает, так, что измерения поглощения звука непосредственно в критической области делаются невозможными.

Для октанометрии большой интерес представляет влияние на коэффициент по-

глощения звука в данном веществе малых добавок посторонних веществ. Как показывают измерения, добавка постороннего вещества в количестве, составляющем доли процента, заметно уменьшает поглощение звука. Особенно удивительно в этом явлении то обстоятельство, что добавляемое вещество может обладать коэффициентом поглощения $\frac{\alpha}{v^2} \cdot 10^{17} = 819$ большим, чем-то,

к которому оно добавляется, и все же коэффициент поглощения звука в смеси с небольшой добавкой примеси будет заметно меньше, чем в чистом веществе. Подобное влияние добавки наблюдается лишь при малых концентрациях добавляемого вещества. Для бензола при $20^\circ C$, а для толуола $\frac{\alpha}{v^2} \cdot 10^{17} = 77$, однако, как видно из рис. 5, добавка приблизительно 0,625 % бензола к толуолу снижает коэффициент поглощения звука в последнем на 12–13 %.

По мере увеличения концентрации бензола в смеси коэффициент поглощения ультразвука возрастает и делается большим, чем в чистом толуоле.

На основании данного эффекта можно идентифицировать бензины с присадками, повышающими октановое число, объем которых не превышает 0,25–0,5 %.

$$\frac{\alpha}{v^2} 10^{17}$$

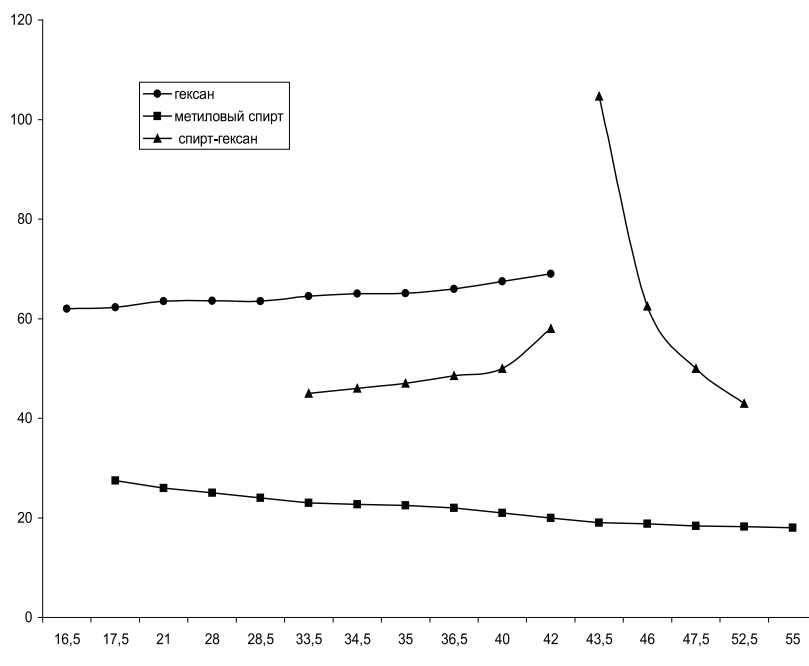


Рис. 4. Поглощение звука в смеси метиловый спирт – гексан

$T, ^\circ C$

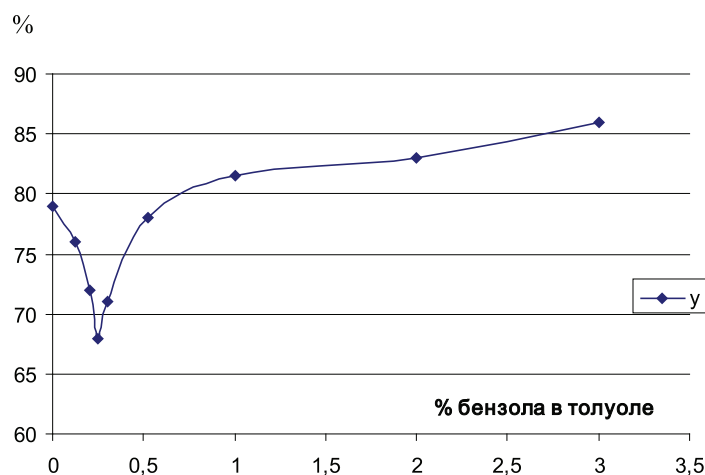


Рис. 5. Влияние малых добавок бензола на поглощение звука в толуоле

Анализ электродинамических характеристик углеводородных топлив

Электродинамические свойства материалов и сред определяются диэлектрической (ϵ) и магнитной (μ) проницаемостью, а также удельной электрической проводимостью (σ). Названные параметры зависят от частоты, определяют чувствительность датчиков, а также скорость распространения электромагнитных волн, их затухание, волновое сопротивление, коэффициент преломления, глубину проникновения. Отдельные электрические параметры топлив и их взаимосвязь довольно подробно рассмотрены в монографии [1].

В общем случае проводимость и диэлектрическая проницаемость веществ на

различных частотах связаны формулами Крамерса-Кронига [7]

$$\epsilon(\omega) = 1 + 8 \int_0^{\infty} \frac{\sigma(x)}{x^2 - \omega^2} dx; \quad (22)$$

$$\sigma(\omega) = \sigma(0) - \frac{\omega^2}{2\pi^2} \int_0^{\infty} \frac{\epsilon(x) - 1}{x^2 - \omega^2} dx, \quad (23)$$

где x — формальный параметр интегрирования, который в функциях $\sigma(x)$ и $\epsilon(x)$ нужно принимать как частоту. Из интеграла берется его главное значение. Подставляя в (22) формулу

$$\sigma(\omega) = \frac{\sigma(0)\omega_0^2}{\omega^2 + \omega_0^2},$$

и заменяя ω на x , получим аналитическую зависимость диэлектрической проницаемости от частоты [1]

$$\epsilon(\omega) = 1 + 8 \int_0^{\infty} \frac{\sigma(0)\omega_0^2}{(x^2 - \omega^2)(x^2 + \omega_0^2)} dx = 1 + \frac{4\pi\sigma(0)\omega_0}{\omega^2 + \omega_0^2}. \quad (24)$$

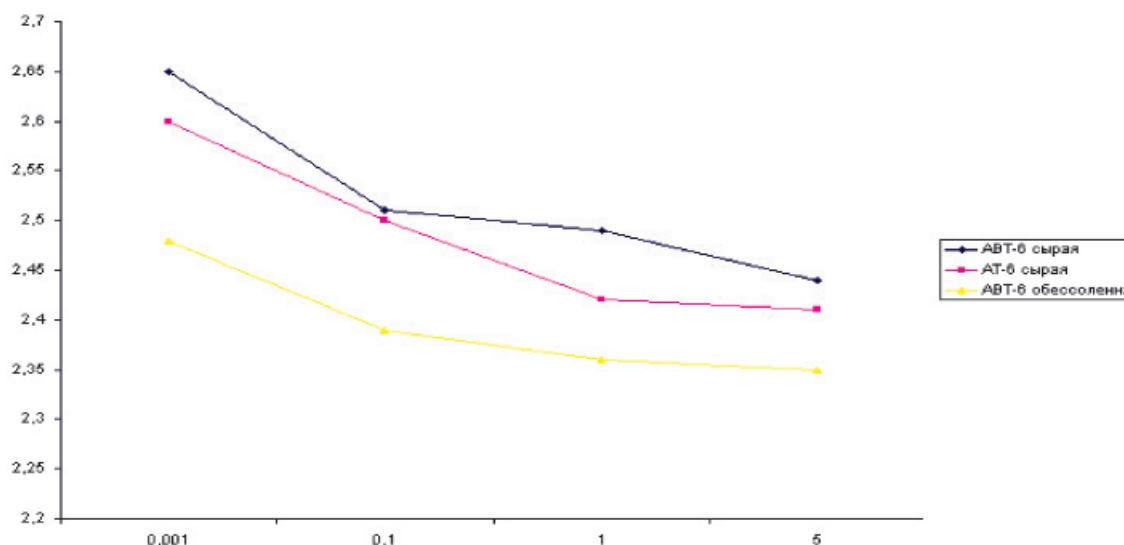


Рис. 6. Зависимости диэлектрической проницаемости нефти от частоты при $t = 20^\circ\text{C}$

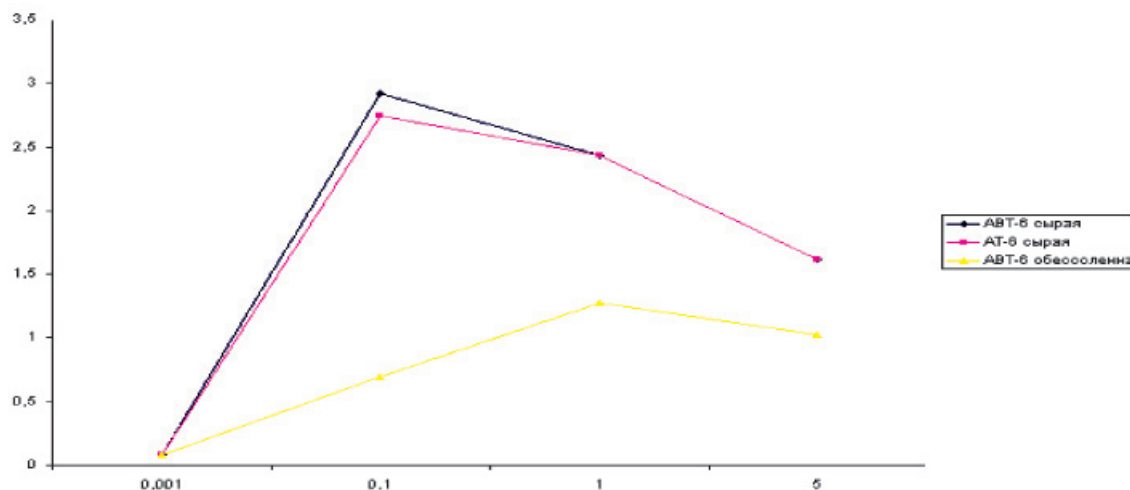


Рис. 7. Зависимость активной удельной электропроводности от частоты при $t = 20^\circ\text{C}$

Анализ нефтепродуктов, проведенный автором, подтверждает соответствие выражений (23), (24) экспериментальным данным.

Данные опытов, проведенные с использованием измерительного комплекса «ТАНГЕНС-2М» с погрешностью не более 2% в комплекте с приборами Е7-12 и Е7-14, это зависимости диэлектрической проницаемости и электропроводности, различных нефтепродуктов от частоты синусоидального тока приведены на рис. 6 и 7.

Для понимания механизма электропроводности и поляризации в нефтепродуктах при учете влияющих факторов рассмотрим представления о полной удельной электропроводности, вытекающие из уравнений состояния, характеризующих накопление (распределение) и рассеяние энергии в веществе [20].

Принципиально полная удельная электропроводность $\hat{\sigma}$ любого вещества в синусоидальном электрическом поле данной частоты может быть представлена [20]:

$$\hat{\sigma} = \chi_0 + \varepsilon \cdot \omega \cdot \cos \varphi \cdot \operatorname{tg} \varphi + j \varepsilon \cdot \omega \cdot \cos \varphi,$$

где $\chi_0 + \varepsilon \cdot \omega \cdot \cos \varphi \cdot \operatorname{tg} \varphi$ — активная часть; $j \varepsilon \cdot \omega \cdot \cos \varphi$ — реактивная часть; χ_0 — проводимость, обусловленная движением в электрическом поле «свободных» ионов; $\varepsilon \cdot \omega \cdot \cos \varphi \cdot \operatorname{tg} \varphi$ — проводимость, обусловленная колебаниями атомов и молекул (дипольных ассоциатов) раствора в переменном электрическом поле; ε — значение диэлектрической проницаемости; φ — угол диэлектрических потерь, характеризующий диэлектрические потери энергии в среде и возникающий за счет поляризации атомов и молекул раствора в электрическом поле.

Общий тангенс угла диэлектрических потерь:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\chi_0 + \varepsilon \cdot \omega \cdot \cos \varphi \operatorname{tg} \varphi}{\varepsilon \cdot \omega \cdot \cos \varphi}.$$

Для плохо проводящих электрический ток жидкостей

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\chi_0}{\varepsilon \cdot \omega}.$$

В этой связи изучение совокупных признаков: электропроводности, тангенса угла потерь и диэлектрической проницаемости в зависимости от частоты электромагнитных колебаний с коррекцией на температуру, является целесообразным, так как изменение электропроводности и тангенса угла потерь, в квазистационарной части частотного спектра, связано с составом продукта [20].

При выполнении работы изучались зависимости электропроводности товарных бензинов разного типа от частоты синусоидального тока, пропускаемого через датчик с бензином (рис. 8 и 9).

Данные опытов для бензинов АИ-92 и АИ-95 приведены табл. 10 и 11. Где $\varepsilon_{10.е.}$ и $\varepsilon_{20.е.}$ — комплексная величина, в относительных единицах характеризующая диэлектрическую проницаемость образца бензина в датчике октанометра:

$$\delta = \operatorname{отношение} \frac{\varepsilon_{f2}}{\varepsilon_{f1}}.$$

Иными словами, полученные частотные зависимости для электропроводности и диэлектрической проницаемости бензинов отражают отличающуюся для каждого бензина совокупность общих и частных признаков, отождествляющих состав нефти из которой сделан бензин и компонентный состав бензина. В целом различия совокупных признаков связаны с различием компонентного состава бензинов, что в определенной мере можно связать с удельной теплотой сгорания бензинов и в целом с идентификацией бензинов.

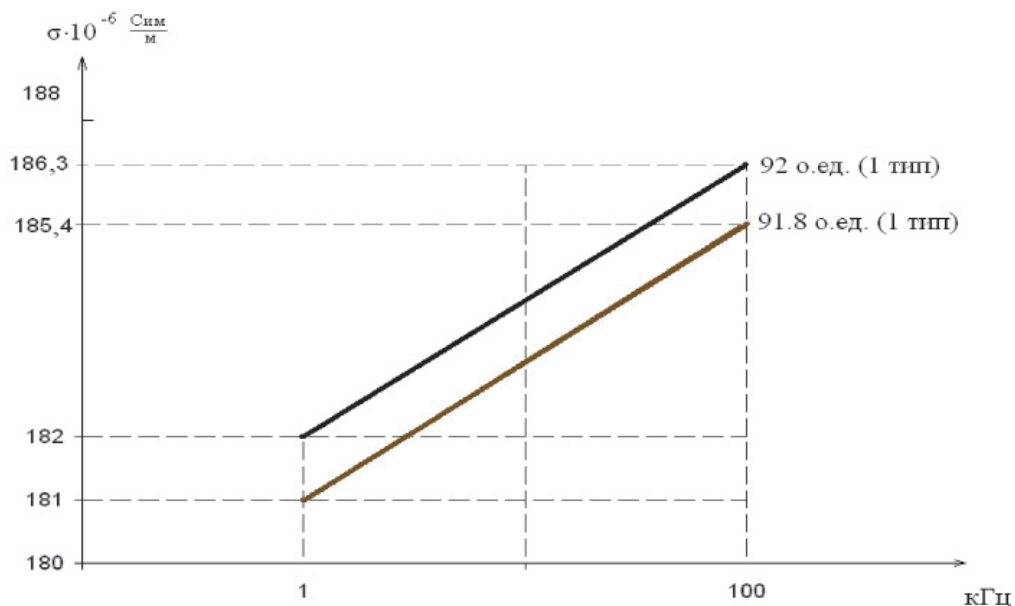


Рис. 8. Зависимость электропроводности одностипного бензина АИ-92 от частоты

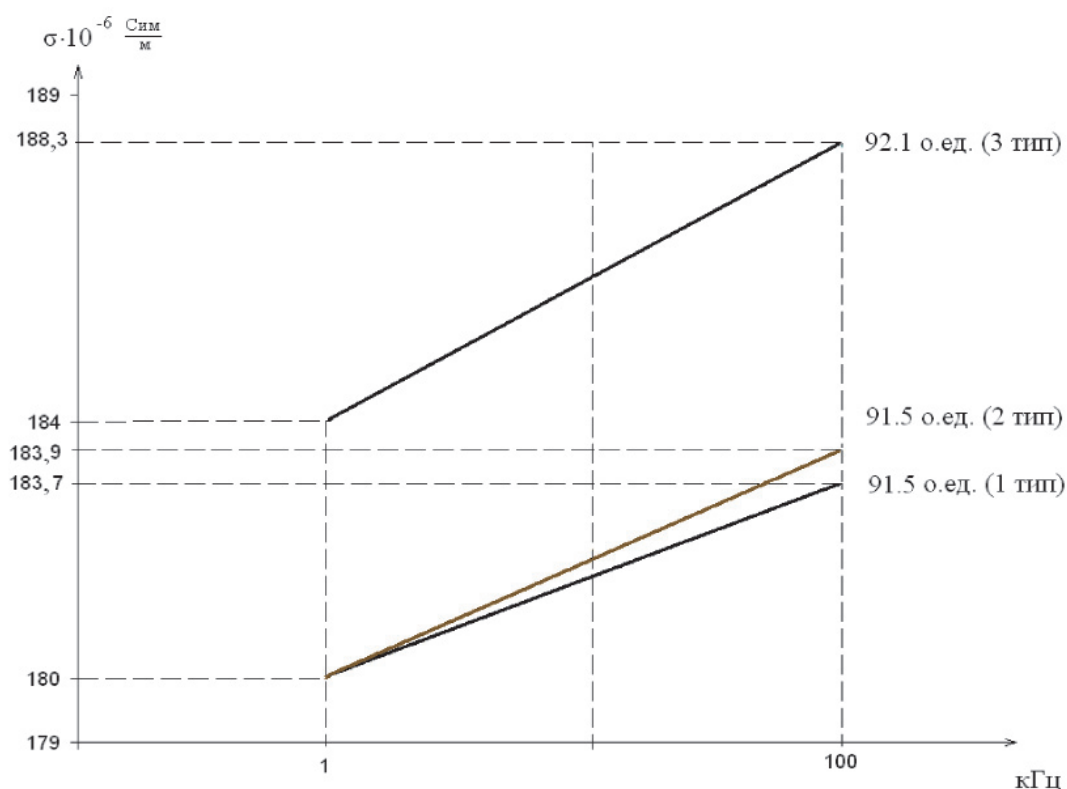


Рис. 9. Зависимость электропроводности бензинов разного типа АИ-92 от частоты

Данные исследования позволяют установить критерий принадлежности товарных бензинов к тому или иному типу. На основании полученных данных в качестве основного фактора идентификации бензинов целесообразно использовать наиболее чувствительный фак-

тор, каким можно считать наблюдаемое для каждого типа товарного бензина различие электропроводностей на низких и высоких частотах. При этом бензины различаются как по уровню электропроводности, так и по приращению на единицу частоты.

Таблица 10

Экспериментальные данные диэлектрической проницаемости бензина АИ-92 при различных частотах и их отношения.

Бензин	АИ-92									
Номер образца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f_1 = 10 \text{ кГц}$ (ϵ_1)	1863	1854	1837	1883	1837	1842	1859	1837	1839	1853
$f_2 = 1 \text{ кГц}$ (ϵ_2)	182	181	180	184	180	180	182	180	180	181
$\delta = \frac{\epsilon_{20.с.}}{\epsilon_{10.с.}}$	$0,9769 \cdot 10^{-1}$	$0,9762 \cdot 10^{-1}$	$0,9798 \cdot 10^{-1}$	$0,9771 \cdot 10^{-1}$	$0,9798 \cdot 10^{-1}$	$0,9772 \cdot 10^{-1}$	$0,979 \cdot 10^{-1}$	$0,9798 \cdot 10^{-1}$	$0,9787 \cdot 10^{-1}$	$0,9767 \cdot 10^{-1}$

Таблица 11

Экспериментальные данные диэлектрической проницаемости бензина АИ-95 при различных частотах и их отношения.

Бензин	АИ-95									
Номер образца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f_1 = 10 \text{ кГц}$ (ϵ_1)	1866	1867	1921	1903	1924	1910	1887	1881	1884	1866
$f_2 = 1 \text{ кГц}$ (ϵ_2)	184	184	189	187	189	188	186	185	186	184
$\delta = \frac{\epsilon_{20.с.}}{\epsilon_{10.с.}}$	$0,986 \cdot 10^{-1}$	$0,9855 \cdot 10^{-1}$	$0,9838 \cdot 10^{-1}$	$0,9826 \cdot 10^{-1}$	$0,9823 \cdot 10^{-1}$	$0,9842 \cdot 10^{-1}$	$0,9856 \cdot 10^{-1}$	$0,9835 \cdot 10^{-1}$	$0,9872 \cdot 10^{-1}$	$0,986 \cdot 10^{-1}$

Углеводородная среда обладает довольно низкой электрической проводимостью. Удельная электрическая проводимость σ нефтепродуктов возрастает с повышением пределов их выкипания в процессе перегонки нефти и для рассматриваемых видов топлив находится в пределах $10^{-17} \dots 10^{-16} [\text{Ом}^{-1}\text{м}^{-1}]$.

В целях предотвращения скопления статического электричества в бензобаках, емкостях на бензозаправочных станциях и нефтебазах при перекачках в бензин добавляют специальные присадки, которые увеличивают его электрическую проводимость. Поэтому проводимость готовых товарных автомобильных бензинов, измеренная на частотах 100–1000 Гц при температуре 20°C составляет $(3\text{--}10) \cdot 10^{-16} [\text{Ом}^{-1}\text{м}^{-1}]$. Удельная электрическая проводимость углеводородных топлив своеобразно зависит от температуры [1].

Значительное изменение электрической проводимости от температуры связано с тем, что нефтепродукты не представляют по своему составу гомогенный диэлектрик. С изменением температуры степень диссоциации составляющих компонентов изменяется.

С ростом температуры диэлектрическая проницаемость жидких нефтепродуктов уменьшается, но своеобразно зависит от температуры, что иллюстрируется экспериментальными данными, проведенными автором и представленными графиками на рис. 10.

Чистые насыщенные углеводороды практически не электропроводны. Очень малая проводимость насыщенных углеводородов наблюдается лишь в связи с микроконцентрацией полярных загрязнений.

Ненасыщенные углеводороды, даже при условии абсолютной чистоты имеют небольшую проводимость, в связи с наличием подвижных π – электронов.

При практическом исследовании реальных бензинов было установлено, что они обладают существенной удельной активной проводимостью. Ее обычная величина находится в пределах 5–100 нСим/м, а у некачественных бензинов может достигать до 1000 нСим/м и более. С учетом этого точное измерение диэлектрической проницаемости стандартными методами, становится невозможным – все они приводят к завышению значения емкости a , следовательно и октанового числа.

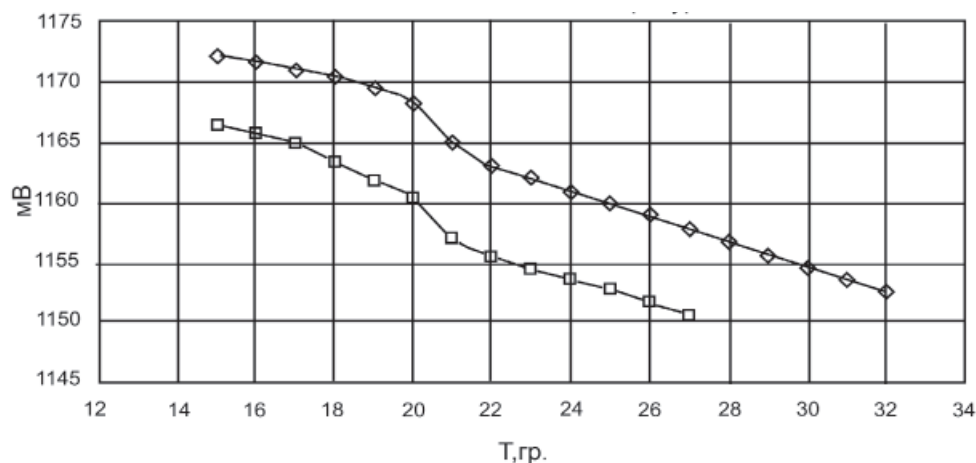


Рис. 10. Зависимости диэлектрической проницаемости бензинов АИ-92 и АИ-95 от температуры. Диэлектрическая проницаемость представлена в условных единицах, мВ

Следовательно, при измерении октанового числа бензина необходимо вводить компенсацию активной проводимости бензина в пределах 0–500 нСим/м.

В идеале для качественного бензина электропроводность не более 10 нСим/м, допускается до 100 нСим/м, но качественный бензин уже не назовешь, свыше, явный брак [194]. Зимой лучше браковать до 30 нСим/м.

Для измерения электропроводности воспользуемся датчиком октанометра АС-98, разработанного автором по патенту [2] и стабилизированный источник напряжения постоянного тока. Емкость датчика в воздухе и активная проводимость датчика при указанных параметрах:

$S = 0,01336 \text{ м}^2$ – площадь пластин датчика;

$d = 0,00175 \text{ м}$ – расстояние между пластинами;

$\epsilon_0 = 8,87 \cdot 10^{-12} \text{ пФ/м}$;

$\sigma = 100 \text{ нСим/м}$ – удельная активная электропроводимость бензина;

Составит

$$C_{\text{д.возд}} = \epsilon_0 \frac{S}{d} = 8,87 \cdot 10^{-12} \frac{0,01336}{0,00175} = 67 \text{ пФ}$$

и

$$G_{\text{д}} = \sigma \frac{S}{d} = 100 \cdot \frac{0,01336}{0,00175} = 763,4 \text{ нСим.}$$

Что соответствует активному сопротивлению датчика наполненного бензином 1,3 МОм.

Для измерения электропроводимости с генератора постоянного напряжения, через датчик пропускаем импульс постоянного тока и на выходе схемы усиления измеряем напряжение, величина которого будет

пропорциональна активной проводимости бензина $G_{\text{б}}$.

Результаты исследований показали что, скорость ультразвука в бензине, представляющего собой смесь углеводородных жидкостей, поглощение интенсивности звука при прохождении его через бензин, соотношения диэлектрических проницаемостей δ и удельная электропроводимость при двух различных частотах синусоидального сигнала бензина, являются важными факторами в идентификации бензинов. Данные рефизические характеристики используются также при проведении калибровки октанометров и измерении октанового числа любого не заявленного бензина, и в разработке приборов для измерения плотности и вязкости углеводородных топлив.

Физические основы оптико-акустического метода контроля качества углеводородных топлив

Основными показателями качества бензинов является фракционный состав, давление насыщенных паров, плотность и детонационная стойкость.

Главным показателем качества бензина является детонационная стойкость. Количественным показателем детонационной стойкости является октановое число. Для определения октанового числа бензинов в последнее десятилетие распространение получил метод ближней инфракрасной спектроскопии. Этот метод позволяет определять концентрации искоемых компонентов, а также комплексные характеристики смеси углеводородов, в частности октановое число. В основе работы любого спектрального анализатора лежит процесс разложения светового излучения по длинам

волн, способ решения этой задачи определяет устройство и схемотехника прибора. Наиболее перспективное направление имеет оптико-акустический метод.

Оптико-акустический эффект лежит в основе метода оптико-акустической спектроскопии и по данному методу ведутся большие работы по разработке приборов контроля количественного и качественного анализа газовых смесей [4, 15].

С позиций квантово-механической теории [12] поглощение излучения представляет собой переход энергии излучения в энергию молекулы, причем при поглощении одного фотона с энергией $h\nu$ энергия молекулы возрастает с некоторого исходного значения E_1 до некоторого конечного E_2 .

Таким образом, первичным эффектом в среде под действием резонансного лазерного излучения является заселение верхних уровней резонансного перехода за счет поглощения фотонов с энергией:

$$h\nu = E_2 - E_1, \quad (25)$$

где E_2 , E_1 – энергия верхнего и нижнего уровней перехода, участвующего в поглощении (рис. 11);

Вторичным эффектом в среде является релаксация возбуждения, как излучательная, так и безизлучательная. Излучательная релаксация приводит к флуоресценции среды, безизлучательная – к нагреву среды или стенок измерительной ячейки.

Методы лазерной спектроскопии легко классифицировать по эффектам, возникающим при взаимодействии лазерного излучения с анализируемой средой.

Наиболее широко используют три основные группы методов лазерной спектроскопии [4, 15]; абсорбционные, излучательные, калориметрические.

К калориметрическим методам относятся оптико-акустический, оптико-термический, оптико-рефракционный и другие методы [10, 13]. Калориметрические методы основаны на последовательности достаточно сложных процессов, сопровождающих взаимодействие лазерного излучения с исследуемой средой.

Наибольшее применение среди калориметрических методов вследствие своей простоты и высокой чувствительности получил оптико-акустический метод [4, 15].

Оптико-акустический эффект лежит в основе метода оптико-акустической спектроскопии, которая начала развиваться на основе некогерентных источников излучения еще до изобретения лазеров и применяется для количественного и качественного анализа газовых смесей. С позиций квантово-механической теории согласно закону сохранения энергии (25) данный эффект будет проявляться и в углеводородных средах [3].

Когда оптическое излучение резонансно колебательно-вращательному переходу в исследуемом молекулярном веществе, процесс преобразования энергии излучения в электрический сигнал состоит из следующих последовательных этапов: возбуждение молекул вещества; безизлучательная релаксация возбужденных молекул; нагрев вещества; генерация импульса давления; вынужденные колебания мембраны микрофона; генерация электрического сигнала.

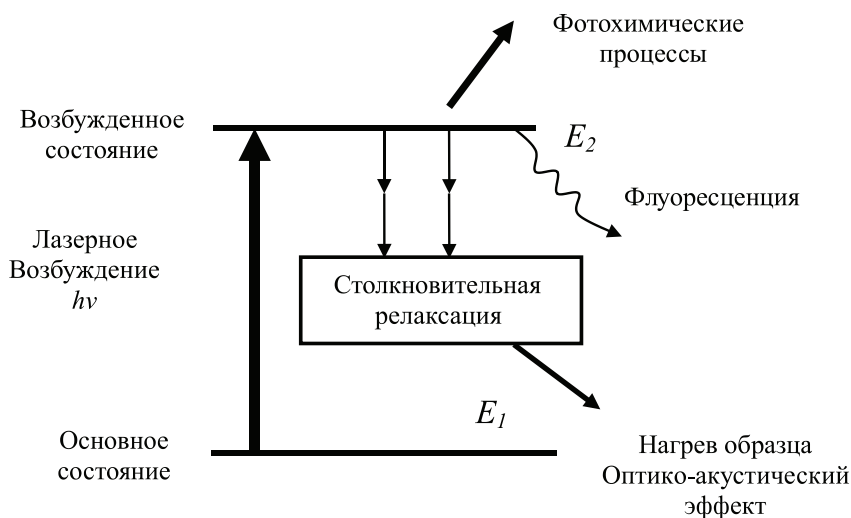


Рис. 11. Основные каналы преобразования поглощенной энергии при облучении образца резонансным лазерным излучением: h – постоянная Планка; ν – частота излучения [90]

Первичным процессом, определяющим преобразованием энергии лазерного излучения в электрический сигнал, является изменение населенности резонансных (с лазерным излучением) энергетических уровней в молекулах (электронных, колебательно-вращательных, вращательных – в зависимости от области спектра).

Колебательно-возбужденные молекулы релаксируют со всех вращательных уровней в основное состояние со скоростью, определяемой наличием трех каналов релаксации – излучательного (радиационная релаксация с вероятностью w_R), безизлучательного за счет столкновений в объеме (гомогенная релаксация – вращательная и колебательно-поступательная с вероятностями соответственно w_r и w_{vT}) и безизлучательного за счет релаксации возбуждения на стенке оптико-акустической ячейки (гетерогенная релаксация w_d). Лишь часть колебательно-возбужденных молекул, определяемая вероятностью колебательно-вращательной релаксации, релаксирует с выделением тепла в объеме углеводородной среды, что вызывает генерацию импульса давления в ячейке оптико-акустического детектора (ОА-детектора). Точное решение задачи генерации акустического сигнала описывается системой двух уравнений – для отклонений температуры и давления в ячейке от их равновесных значений [4].

Импульс давления в ячейке ОА-детектора приводит к изменению положения мембраны микрофона и затем к генерации электрического сигнала, снимаемого с ОА-детектора

В основе измерения октанового числа бензинов лежит поглощение ИК-излучения в области 660–2600 нм в среде углеводородного топлива. Хорошая корреляция между поглощением и октановым числом имеется в области 896, 932 и 1164 нм для исследовательского октанового числа и, 930, 940 и 1012 нм для моторного октанового числа [13].

По данным, приведенным в [17] рассчитаны длины волн полос поглощения, определенных по спектрам углеводородов в средней инфракрасной области для основных углеводородных фракций, входящих в состав бензина. Среди колебательных переходов молекулы наиболее вероятными являются переходы с основного уровня на фундаментальные. Поэтому поглощение излучения на фундаментальных частотах имеет значительную интенсивность, и для получения спектров в средней ИК области используют пробы с длинной кюветы (ячейки) порядка 0,01–0,1 мм. Интенсивность поглощения в обертоновых и комбинационных полосах значительно меньше, причем быстро падает с ростом волнового числа,

поэтому для спектрального анализа бензинов в ближней ИК – области необходимо применять кюветы (ячейки) с длиной от 10 до 100 мм.

Метод оптико-акустического измерения заключается в следующем. Анализируемое топливо (бензин) прокачивается через кювету оптико-акустической ячейки под небольшим давлением и при ее наполнении входной и выходной клапаны герметично закрываются. Модулированное излучение лазера пропускается через заполненную анализируемым топливом ячейку. При совпадении линии излучения лазера с полосой поглощения детектируемых молекул компоненты бензина, последние поглощают часть мощности лазерного излучения, бензин нагревается и создает повышение давления, которое и представляет собой оптико-акустический сигнал, несущий информацию о концентрации определенной компоненты. Затем оптико-акустический сигнал преобразуется в электрический сигнал с помощью микрофона, помещенного в оптико-акустическую ячейку или ОА-детектор (ОАД).

Рассмотрим физические процессы, происходящие при формировании сигнала в ОАД [10]. Модулированное по частоте монохроматическое лазерное излучение проходит через ячейку ОА-детектора с прозрачными окнами, заполненную поглощающим излучение бензином.

В результате поглощения бензин нагревается и создает в ячейке колебания давления на частоте модуляции источника. В случае, когда выполняется закон поглощения Бугера – Ламберта, поглощенная мощность $P_{\text{погл}}$ в ячейке с топливом равна

$$P_{\text{погл}} = P_0[1 - \exp(-k_\lambda L)], \quad (26)$$

где P_0 – мощность излучения на входе в ячейку (мощность, излучаемая лазерным источником); L – длина кюветы (ячейки); k_λ – показатель поглощения на длине волны λ ;

$$k_\lambda = \sigma_n(\lambda) N, \quad (27)$$

где σ_n – сечение поглощения бензина (в расчете на одну молекулу); N – концентрация поглощающих молекул.

Когда длина акустической волны в анализируемой среде больше внутренних размеров ОА-ячейки, амплитуда A колебаний давления пропорциональна средней по объему V ячейки поглощенной мощности $P_{\text{погл}}$

$$A = (\tilde{k} P_{\text{погл}}) / V = \tilde{k} P_0 [1 - \exp(-k_\lambda L)] / V, \quad (28)$$

где $\tilde{k}$ – коэффициент пропорциональности, определяемый экспериментально.

При слабом поглощении, ($k_\lambda \ll 1$), которое имеет место в обертоновых и комбина-

ционных полосах углеводородных топлив, формула (28) примет вид

$$A = \tilde{k} P_0 k_\lambda / \pi r^2 = k' k_\lambda P_0, \quad (29)$$

где $k' = \tilde{k} / \pi r^2$; πr^2 – поперечное сечение кюветы ОА-ячейки.

Колебания давления, с помощью помещенного в ячейку микрофона, преобразуются в электрический сигнал U :

$$U = k P_0 k_\lambda, \quad (30)$$

где $k = k' k''$, где k'' – чувствительность микрофона, а k – чувствительность оптико-акустического детектора.

Для определения показателя поглощения на определенной длине волны спектрального анализа углеводородного топлива по значениям амплитуды U_1 электрического сигнала, снимаемого с микрофона, необходима информация о мощности лазерного излучения P_0 . Так как мощность лазерного источника нестабильна. Поэтому для исключения влияния флуктуаций излучения на точность измерения необходимо или стабилизировать параметры лазера, или, что значительно проще, использовать второй опорный канал для регистрации мощности излучения U_2 с последующей нормировкой на нее ОА-сигнала (U_1/U_2), с помощью цифровой техники. Таким образом, получаем спектр на заданных длинах волн для исследуемого бензина.

Результаты экспериментальных исследований, выполненных как с помощью гидрофонов и пьезодатчиков, так и оптическими методами [10] в широком диапазоне плотностей энергии лазерного излучения, соответствующих разным механизмам взаимодействия, свидетельствуют о неплохом качественном и количественном соответствии измеренной амплитуды и формы акустических импульсов предсказаниям теории.

Для слабо поглощающих жидкостей, к которым можно отнести и углеводородные топлива, при сравнительно низких плотностях поглощенной энергии, когда нагрев приповерхностного слоя не достигает температуры испарения, основным механизмом возбуждения звука является оптоакустический (или тепловой) механизм, при котором генерация звука происходит за счет термоупругих напряжений, вызванных неоднородным нагревом жидкости. Однако возможен диэлектрический пробой в объеме жидкости, если интенсивность лазерного излучения при его фокусировке превысит некоторую пороговую величину (порог пробоя).

Однако при использовании на практике акустических и ударных волн, возникаю-

щих при взаимодействии лазерного излучения с жидкостями, необходимо учитывать не только параметры генерируемых волн, но эффективность преобразования лазерной энергии в акустическую. Под эффективностью преобразования по [14] понимают отношение энергии E_{ac} , переносимой импульсной акустической (или ударной) волной, к энергии лазерного излучения, падающего на поверхность жидкости,

$$\eta = \frac{E_{ac}}{E_L}, \quad (31)$$

где $E_{ac} = \int_S \epsilon_{ac} dS$ и ϵ_{ac} – плотность акустической энергии, протекающей через волновой фронт; $S = \pi r^2$ – поверхность волнового фронта.

В свою очередь ϵ_{ac} может рассчитана [150] по формуле

$$\epsilon_{ac} = \frac{1}{\rho_0 c_0} \int_{-\infty}^{+\infty} [\hat{P}(t)]^2 dt, \quad (32)$$

где ρ_0 – исходная плотность среды; c_0 – скорость звука в ней; $\hat{P}$ – превышение давления в акустическом импульсе над исходным давлением $\hat{P}_0$.

С учетом (32) запишем (31) в виде

$$\eta = \frac{1}{\rho_0 c_0 E_L} \int_S \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} [\hat{P}(t)]^2 dt \right\} dS, \quad (33)$$

Это соотношение можно использовать для расчета эффективности при различных механизмах преобразования световой энергии в акустическую при условии, что временной профиль акустического импульса известен на всей поверхности волнового фронта.

Расчетная формула (33) для расчета эффективности преобразования энергии η при взаимодействии лазерного излучения с углеводородным топливом, после преобразования имеет вид

$$\eta \approx 2,71 \cdot 10^{-5} \cdot \epsilon_L \text{ Дж/см}^2,$$

где $\epsilon_L \approx 1,5 \text{ Дж/см}^2$ – плотность энергии CO_2 лазера.

Тогда эффективность преобразования $\eta \approx 4,065 \cdot 10^{-5}$.

Анализ спектральных характеристик и нахождение искомого контролируемого параметра, а именно октанового числа бензина, выполняется при помощи методов математического моделирования с предварительной калибровкой анализатора по наборам эталонных проб [1].

Выводы

В процессе проведенного анализа акустических характеристик жидких углеводородных сред и их взаимосвязи с электрофизическими параметрами, получены качественные предпосылки для разработки приборов контроля качества углеводородных топлив, с использованием зависимостей акустических характеристик от плотности и вязкости среды.

Анализ электродинамических характеристик углеводородных топлив показал, что, полученные частотные зависимости для электропроводности и диэлектрической проницаемости бензинов отражают отличающуюся для каждого бензина совокупность общих и частных признаков, отождествляющих состав нефти из которой сделан бензин и компонентный состав бензина.

Исследованы физические основы оптико-акустического метода контроля качества углеводородных топлив.

Результаты анализа позволили выделить основные направления технической реализации данных методов в устройствах контроля качества бензинов:

- 1) разработка ИИС для контроля качества и идентификации бензина на основе акустических характеристик;
- 2) разработка ИИС для контроля качества бензинов на основе электродинамических характеристик;
- 3) разработка ИИС для контроля качества и идентификации бензинов на основе лазерного оптико-акустического эффекта.

Полученные результаты могут служить для проведения исследования и разработки методов идентификации и измерения октановых чисел бензинов, и ИИиУС для адаптивной системы управления смешением товарных бензинов.

Список литературы

1. Астапов В.Н. Методологические и схемотехнические решения в системах контроля и управления на нефтеперерабатывающем заводе – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2006. – С. 286.
2. Астапов В.Н. Устройство для измерения октанового числа бензина // Патент № 2207557 РФ. – Бюл. № 18, 2003.
3. Астапов В.Н. Физические основы оптико-акустического метода контроля качества углеводородных топлив // Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики: научные труды

VII международной научно-практической конференции // Приборостроение. Московская государственная академия приборостроения и информатики. – М.: МГАПИ, 2005. – С. 19–23.

4. Антонов В.С., Беков Г.И., Большов и др. Лазерная аналитическая спектроскопия. – М.: Наука, 1986.

5. Ахметов С.А., Ишмияров М.Х., Вережкин А.П., Докучаев Е.С. Малышев Ю.М. Технология, экономика и автоматизация переработки нефти и газа / под. ред. С.А. Ахметова. – М.: Химия, 2005. – С. 574–670.

6. Бузановский В.А. Варианты построения информационно-измерительных систем физико-химического состава и свойств веществ. НПО «Химавтоматика» // Контрольно измерительные приборы и системы. – 2009. – № 9.

7. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. – М.: Наука, 1967.

8. Гуреев А.А., Азев В.С. Автомобильные бензины. Свойства и применение. – М.: 1996.

9. Жаров В.П., Летохов В.С. Лазерная оптико-акустическая спектроскопия. – М.: Наука, 1984.

10. Козинцев В.И., Белов М.Л. и др. Лазерный оптико-акустический анализ многокомпонентных газовых смесей. – М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003.

11. Кудрявцев Б.Б. Применение ультразвуковых методов в практике физико-химических исследований. – М.: Гос.издательство технико-теоретической литературы. – 1952. – 323 с.

12. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Том IV. Квантовая электродинамика. – М.: Наука, 1982.

13. Ланг А. Измерение важнейших параметров бензина с помощью анализатора в ближней ИК – области спектра // Нефтегазовые технологии. – 1994. – № 9, № 10.

14. Островская Г.В. Эффективность преобразования световой энергии в акустическую при взаимодействии импульсного лазерного излучения с жидкой средой // Журнал физической физики. – 2002. – Т. 72, Вып. 10. – С. 95–100 с.

15. Пономарев Ю.П. и др. Лазерная оптико-акустическая спектроскопия межмолекулярных взаимодействий в газах. – Томск: МГП «РАСКО», 2000.

16. Рудик В.С., Уваров А.С., Белкин В.И. Использование автоматических промышленных анализаторов состава и свойств нефтепродуктов в АСУ ТП смешения бензинов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 1978. – № 4. – С. 32–36.

17. Свердлова О.В. Электронные спектры в органической химии. – Л.: Химия, 1985.

18. Современные системы компаундирования моторных топлив // ЦНИИТЕНЕФТЕХИМ. – 1997.

19. Туманов В. Октанометр // Схемотехника. – 2003. – № 9. – С. 2–5.

20. Усиков С.В. Электрометрия жидкостей. – Л.: Химия, 1974.

21. Яворский Б.М., Детлав А.А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1974.

22. ГОСТ 8226-82 Топливо моторное. Исследовательский метод определения октанового числа.

23. ГОСТ 511-86 Топливо моторное. Моторный метод определения октанового числа.

УДК 621.31

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ АППАРАТАМИ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА

Бабанова И.С.*Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»,
Санкт-Петербург, e-mail: irina_babanova@mail.ru*

В статье показано исследование системы автоматического управления аппаратами воздушного охлаждения газа за счет применения структурно-параметрического анализа и синтеза. Составлена структурная и функциональная схема системы автоматического управления АВО газа на основе работы искусственной нейронной сети. Выявлены критерии структурно-параметрической оптимизации. Проанализированы различные модели построения прогноза нейронных сетей с учетом статистических показателей. Представлена функция прогнозирования температуры стабилизации температуры газа с использованием искусственной нейронной сети. Для решения задачи прогнозирования температуры на выходе из АВО газа использовалась искусственная нейронная сеть (типа многослойный персептрон с функцией активации гиперболический тангенс), позволяющая выполнять прогноз с точностью, не превышающей 1,5 %. Исследование качества переходных процессов в системы проводилось путем компьютерного моделирования в среде Matlab Simulink.

Ключевые слова: аппарат воздушного охлаждения газа, процесс охлаждения газа, критерии структурно-параметрической оптимизации, искусственная нейронная сеть

STRUCTURAL AND PARAMETRIC SYNTHESIS OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF DEVICE OF AIR COOLING

Babanova I.S.*National Mineral Resources University, Saint-Petersburg, e-mail: irina_babanova@mail.ru*

The article shows the study of the system of automatic control of the device of air cooling through the use of structural and parametric analysis and synthesis. Structural and functional scheme was composed for automatic control devices of air cooling of gas based on artificial neural network. The criteria identified of the structural-parametric optimization. various models was analyzed for forecasting of neural networks with consideration statistical indicators. Prediction of temperature stabilization of the gas temperature using artificial neural network is presented. To solve the problem of predicting the temperature at the outlet of the device of air cooling of gas used artificial neural network (multilayer type perceptron with activation function of hyperbolic tangent), allowing to perform the forecast with accuracy, not exceeding 1,5 %. Study of the quality of transient processes in system was carried out by computer simulation in Matlab Simulink.

Keywords: device of air cooling, process gas cooling, criteria of structural-parametric optimization, artificial neural network

В настоящее время в газовой промышленности проблеме реализации потенциала энергосбережения и неразрывно связанной с ней достижения высокого уровня энергоэффективности уделяется особое внимание [1]. ПАО «Газпром» разрабатывает стратегию развития, согласно которой определен ряд ключевых аспектов, подлежащих принятию к рассмотрению, намечен основной перечень приоритетных научно-технических проблем на 2011–2020 г. [2, 3]. Одним из ключевых направлений энергосбережения для газотранспортной системы является повышение энергетической эффективности производственных процессов работы парка ГПА на основе реализации экономически обоснованных энергосберегающих мероприятий, а также экономии производства и сокращение издержек на топливно-энергетическую составляющую в себестоимости продукции [4].

На основе статистики энергопотребления основного и вспомогательного оборудования на КС установлено, что около 80 % установленной мощности составляет газотурбинный привод, более половины энергопотребления приходится на АВО газа. АВО газа широко применяют как на дожимных КС газовых промыслов, так и на КС магистральных газопроводов с целью охлаждения природного газа.

Для устранения температурных напряжений, возникающих из-за температурных перепадов в процессе сжатия, осуществляется процесс охлаждения газа АВО. Экономичность работы магистрального газопровода определяется температурным режимом работы. Процесс охлаждения сопровождается уменьшением средней температуры газа, что приводит к уменьшению гидравлического сопротивления газопровода, следствие которого является, с одной стороны, повышение его пропускной

способности при постоянных затратах энергии, с другой стороны – при неизменной производительности оборудования уменьшение затрат энергии. Возникает проблема регулирования параметров АВО. Способ охлаждения газа за счет изменения количества работающих вентиляторов является энергозатратным. Применение в схеме охлаждения преобразователей частоты приводит к значительной экономии электроэнергии [5].

В России среди производителей систем автоматического управления (САУ) АВО газа можно выделить такие предприятия: ОАО «Завод Промавтоматика» (г. Екатеринбург), инженерная компания Прософт-Системс (г. Екатеринбург), объединение БИНАР (г. Саров Нижегородской обл.), ОАО «Чебоксарский Электроаппаратный Завод» ОАО «Борхиммаш», ООО «Прибор» (г. Смоленск). САУ АВО газа указанных производителей схожи по своей структуре, главной целью которых является поддержание заданной температуры газа в выходном коллекторе парка АВО для повышения безопасности эксплуатации и улучшения экономических показателей работы АВО. Регулирование на выходе из АВО осуществляется по по минимальной температуре стенок теплообменных труб, по температуре воздуха под пучками труб или по нескольким контурам одновременно. Для этого используются следующие способы регулирования: изменение частоты вращения вентиляторов, изменение степени открытия жалюзи, ступенчатое регулирование [6].

Эти системы обеспечивают плавный запуск электродвигателей вентиляторов АВО газа и могут работать в автоматическом, дистанционном и ручном режимах. В результате частых прямых пусков электродвигателей не всегда достигается стабилизация температуры газа с требуемой точностью. Повышение точности стабилизации температуры газа ограничивается техническими возможностями средств реализации дискретных систем автоматического регулирования приводит к увеличению затрат электроэнергии и снижает ресурс электродвигателей.

Цель – исследование системы автоматического управления АВО газа за счет применения структурно-параметрического анализа и синтеза.

Решение задачи найдем на основе представления всего технологического процесса охлаждения продукта АВО газа в виде структурированной системы, показанной на рис. 1. Основными оптимизируемыми параметрами является температура газа после АВО на выходе i -й КС.

Учитывались входные переменные: X_1 – расход газа; X_2 – входное давление; X_3 – температура газа на входе; X_4 – температура воздуха.

Промежуточные переменные: X_5 – температура газа на выходе; X_6 – минимальная температура стенки, X_7 – минимальная температура стенки.

Переменные управления:

- 7) d_1 – режим обдува;
- 8) d_2 – подача метанола;
- 9) d_3 – конструктивные изменения.

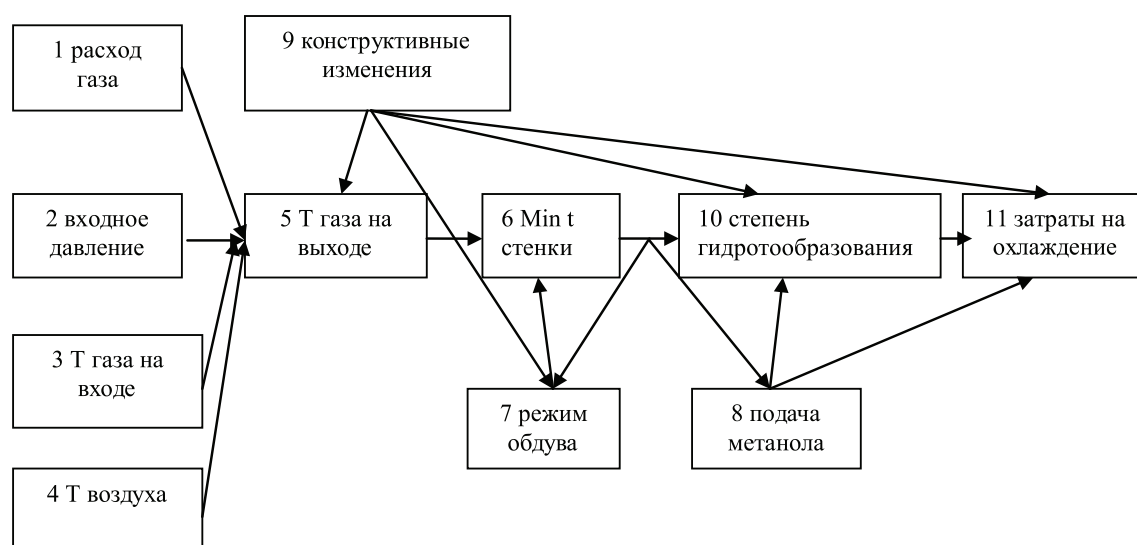


Рис. 1. Структура системы технологического процесса охлаждения природного газа

Выходные переменные:

10) Y_1 – степень гидратообразования;

11) Y_2 – затраты на охлаждение газа, X_5 – температура газа на выходе (является как промежуточной, так и выходной переменной).

Процесс синтеза САУ АВО газа распадается на следующие этапы: задание целевой функции, создание математической модели и выбор алгоритма синтеза [7].

Задачи исследования:

1. Проанализировать структурную схему охлаждения природного газа.

2. Выявить основные параметры и факторы, влияющие на разработку системы стабилизации температуры газа.

3. Разработать математическую модель стабилизации температуры газа на выходе из АВО с применением искусственной нейронной сети (ИНС).

4. Выполнить структурно-параметрический анализ и синтез алгоритмов управления температурой АВО газа, позволяющей

обосновать рациональные параметры количества расхода электроэнергии на процесс компримирования газа.

Математическое моделирование АВО газа – синтез модели (абстрактная модель) и ее анализ, включающий компьютерный многопараметрический расчет АВО, а также этапы моделирования вентилятора и исследование его режимов работы с последующим снятием реальных характеристик АВО и корректировке методики расчета.

Структура системы моделирования АВО газа

Структура системы моделирования АВО газа представлена на рис. 2. В ходе исследования учитывались следующие данные:

1. Свойства и функции АВО газа на КС магистрального газопровода.

2. Аэродинамические и тепловые процессы.

3. Функциональные модели.

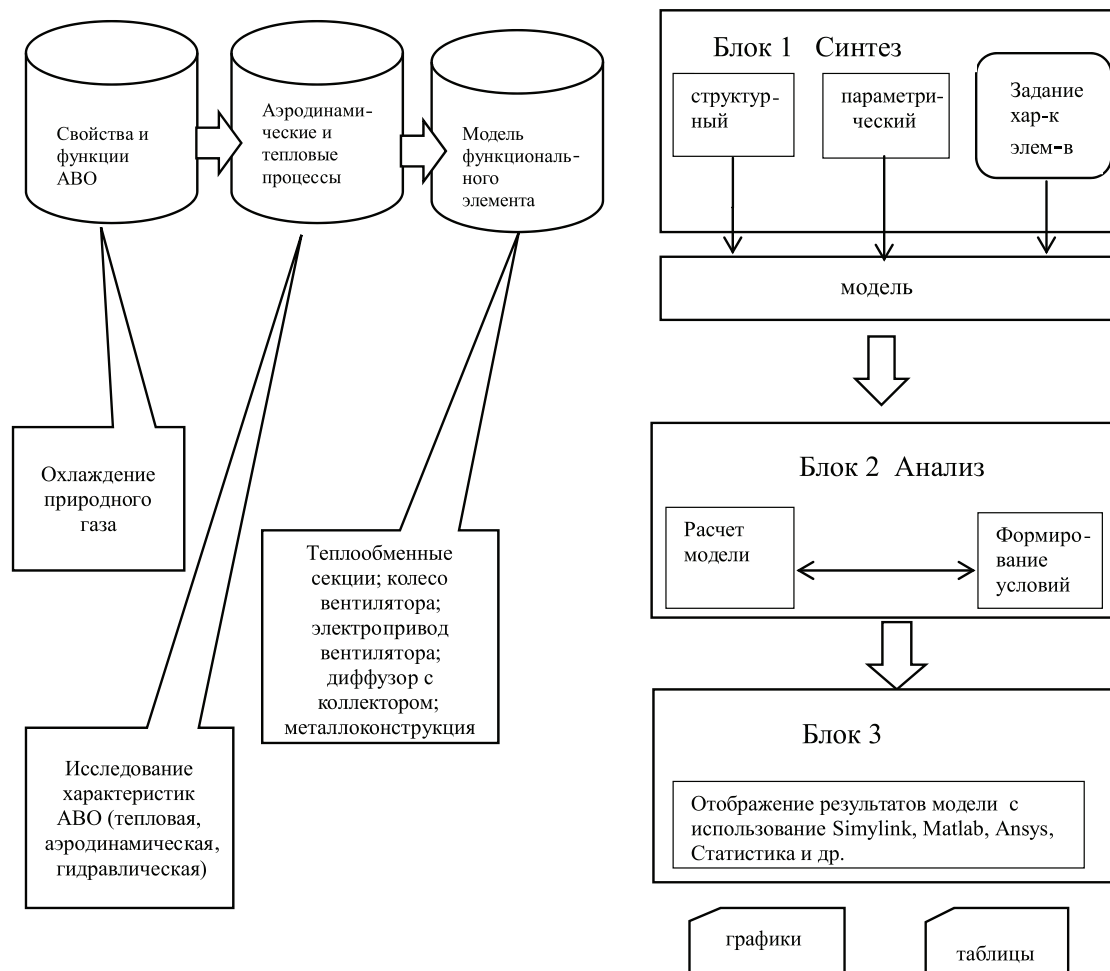


Рис. 2. Структурная система моделирования АВО газа

Характеристики АВО могут представлены стендами для исследования аэродинамических испытаний малых вентиляторов; внешней теплоотдачи поверхностей различной геометрии; для натурных испытаний по определению гидравлического сопротивления; натурный вентиляторный ресурсный и др.

На основе базы данных по АВО для КС магистрального газопровода в блоке 1 рассматривалась задача синтеза структурной модели установки, а также информационные потоки между функциональными элементами. В этом блоке осуществлялась дальнейшая параметризация с заданием значений параметров для АВО газа и характеристик элементов. В блоке 2 производился расчет модели и формирование условий для дальнейшего анализа. В блоке 3 с учетом условий анализа отображаются результаты исследования (графики переходного процесса, отображение полученных результатов моделирования системы в виде графиков и таблиц).

Основу описания работы АВО газа составляют уравнения: теплового баланса, теплопередачи и аэродинамики. Факторы, влияющие на тепловую производительность АВО: конструктивные особенности АВО газа, степень загрязнения поверхности теплообмена, режим транспорта газа (учет количества агрегатов ГПА, степень компримирования газа), температура и массовый расход воздуха.

Структурно-параметрический синтез и анализ

На данном этапе решались задачи для САУ АВО газа, показанные в табл. 1.

Структурный синтез схемы

Структурный синтез – процесс создания алгоритмической модели, определяющий набор элементов, из которых состоит составная модель АВО газа, способов их взаимодействия. Выделим функциональные узлы, определяющие рабочий процесс АВО газа.

Функциональная схема автоматизации представляет собой основной проектный документ, который определяет структуру и уровень автоматизации технологического процесса проектируемого объекта. На рис. 3 представлена функциональная схема автоматизации АВО газа, где ТЕ – датчик температуры, РЕ – датчик расхода газа, РД – датчик давления газа, ЧП – частотный преобразователь.

При поступлении газа на установку охлаждения газа через клапан (1) снимаются показания с датчиков расхода (4), давления (5), температуры (6). Показание с датчика температуры (6) сравнивается с заданным значением температуры. Полученная разность сигналов подается на вход регулятора, который с помощью управляющего сигнала задает частоту и напряжение на выходе преобразователей частоты. После чего выходной сигнал идет на электродвигатели (11, 12). Электродвигатели (11, 12) включают первую пару вентиляторов. Затем показание с датчика температуры (8) сравнивается с заданной температурой, если же они равны, то нет никакой необходимости активировать электродвигатели (13, 14, 15, 16). В противном случае разность сигналов отправляется на регулятор. После получения сигнала с регулятора частотный преобразователь переключается на электродвигатели (13, 14), которые включают

Таблица 1

Структурно-параметрический синтез и анализ

Задачи	Анализ	Комбинированные задачи	Синтез
Структура	Структурный анализ (особенность моделируемого объекта с учетом критерия минимума затрат электроэнергии)	Структурный анализ и синтез (детализация схемы управления, включение блока стабилизации температуры газа)	Структурный синтез схемы (анализ функциональной схемы, рассмотрение системы стабилизации температуры газа)
	Структурно-параметрический анализ (постановка задачи структурно-параметрической оптимизации)	Структурно-параметрический анализ и синтез алгоритмов управления системы стабилизации температуры АВО газа	Структурно-параметрический синтез (учет условия охлаждения природного газа по температуре). Прогнозирование температуры на выходе из АВО газа
Параметры	Параметрический анализ (одновариантный либо многовариантный параметрический анализ)	Параметрический анализ и синтез (параметрические исследования схемы системы стабилизации температуры газа)	Параметрический синтез (учет параметров и факторов-влияния на процесс охлаждения природного газа)

вторую пару вентиляторов. Первая пара вентиляторов автоматически подключается на прямую сеть и продолжают работать в заданном режиме. Далее показание с датчика температуры (8) сравнивается с заданным значением. Если значения совпадают, следовательно двух пар вентиляторов достаточно для получения желаемого результата. Если же значения не совпадают то регулятор аналогичным образом будет изменять частоту до тех пор пока выходная температура не будет равна заданному значению. Датчик давления (7) регистрирует давление газа на выходе. В процессе эксплуатации газопровода при высоком давлении открывается клапан свечи (2), сопровождающийся отводом газа в атмосферу при аварийных ситуациях. После чего снимаются показания с датчика температуры (9). Далее после выходного клапана (3) регистрируется расход газа (10).

Функциональная схема автоматического регулирования температурного режима системы воздушного охлаждения газа приведена на рис. 4.

Функциональная схема состоит из частотного преобразователя (ЧП), электрического привода (ЭД), вентилятора, процесса теплообмена между воздухом и охлаждаемым продуктом. Входной координатой ЧП является подаваемое на него напряжение ($U_{\text{вход}}$), выходной координатой преобразователя является напряжение, подаваемое на двигатель ($U_{\text{упр}}$) и частота вращения (n). Выходной координатой двигателя является частота вращения ω . Двигатель механически связан с вентилятором, поэтому входной координатой вентилятора является частота вращения ω , а выходной координатой – расход воздуха Q . Он в свою очередь охлаждает газо-сырьевой продукт и который является

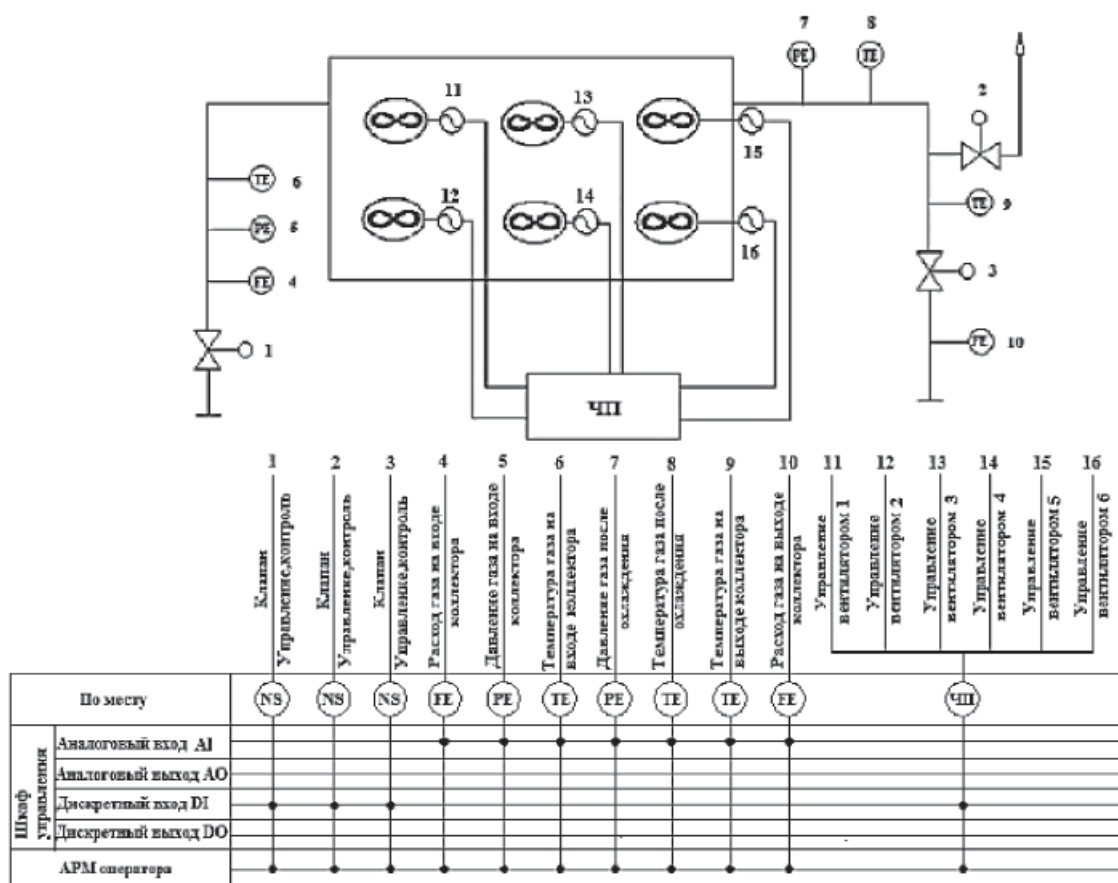


Рис. 3. Функциональная схема автоматизации

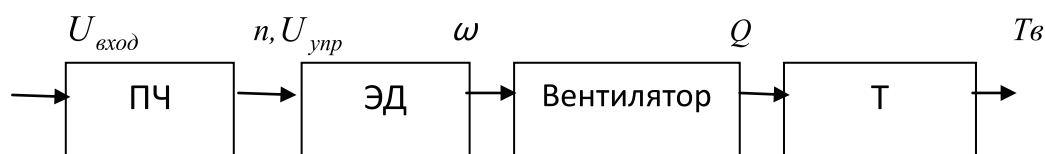


Рис. 4. Функциональная схема САУ температурного режима системы

входным сигналом для блока процесса теплообмена T , выходной координатой которого является температура $T_{\text{вых}}$. Далее определялись передаточные функции отдельных звеньев как отношение выходной величины к входной (в операторной форме) при нулевых начальных условиях.

Структурный синтез и анализ

На следующем этапе на основе функциональной схемы, принципиальной составлялась и детализировалась структурная схема модели. Вводилась информационная система управления (ИСУ) на основе работы ИНС, позволяющей прогнозировать температуру на выходе из АВО газа с учетом базы данных (массовый расход воздуха $Q_{\text{г}}$, температура охлаждающего воздуха $T_{\text{н}}$, температура газа на входе $T_{\text{вх}}$, количество включенных вентиляторов n).

На основе исследований была схема дополнена блоками [8], отвечающими за прогноз температуры на выходе из АВО. Интеллектуальная система стабилизации температуры газа с регулируемым приводом вентиляторов на основе использования аппарата ИНС представлена функциональной схемой [9].

Система прогнозирования представлена входными данными, блоком ИНС (тип нейронной сети, алгоритм обучения, функция активации), выходным блоком. Функция прогнозирования стабилизации температуры газа может быть представлена как

$$P = F(t, \Delta t, n, k, T(t), T(t - \Delta t), \dots, X_i(t), X_i(t - n\Delta t)). \quad (1)$$

для максимально вероятных неизвестных значений t в будущий момент времени, на интервал упреждения длиной $t + k\Delta t$, с учетом известных прошлых значений (данные). Величина прогноза температуры должна соответствовать заданному доверительному интервалу прогнозирования δ с заданной вероятностью. Здесь t – текущий момент времени, k – тип прогноза; Δt – интервал времени между измерениями; n – число интервалов в прошлое, k – число интервалов в будущее, m – количество измеряемых характеристик; X_i при $i = 1, \dots, m$ – измеряемые характеристики, входящие в перечень ретроспективных влияющих факторов ($Q_{\text{г}}$ – массовый расход воздуха; $T_{\text{вх}}$ – начальная температура газа; $T_{\text{н}}$ – температура охлаждающего воздуха; $f_{\text{нб}}$ – частота напряжения на статорных обмотках электродвигателей; r – статус дня с учетом режима работы КС и др).

Структурный анализ

Задача сводилась к рассмотрению структурного отображения, определяющего особенности моделируемого объекта. В качестве примера ставилась задача представления процесса охлаждения природного газа АВО газа в математической модели с учетом блока автоматического регулирования температуры газа, а также с учетом блока прогнозирования параметров (кратко- и среднесрочное прогнозирование). Для этого в схему был введен блок ИУС с использованием ИНС. Исследование переходных процессов в системе стабилизации температуры газа была произведено в среде MATLAB Simulink.

Структурно-параметрический синтез

В научно-технической литературе опубликовано достаточно много методик и алгоритмов расчета режимов АВО, современные системы САУ не адаптированы для решения задачи прогнозирования как энергопотребления АВО газа, так и разработки системы автоматического управления системы стабилизации температурой газа.

Оптимальную среднегодовую температуру охлаждения газа необходимо принимать на $10\text{--}15^\circ\text{C}$ выше расчетной среднегодовой температуры наружного воздуха. Расчетную температуру наружного воздуха на входе в АВО в данный рассматриваемый период (год, квартал, месяц) следует вычислять по формуле:

$$T_{\text{в}} = T_{\text{а}} + \delta T_{\text{а}}, \quad (2)$$

где $T_{\text{а}}$ – средняя температура наружного воздуха в рассматриваемый период, определяемая по данным главы СНиП 2.01.01-82; $\delta T_{\text{а}}$ – поправка на изменчивость климатических данных, $T_{\text{а}}$ следует принимать равной 2°C .

Предусматривается аварийная остановка компрессорной станции при повышении температуры газа на выходе АВО газа выше 70°C . При повышении температуры газа на выходе АВО до $+45^\circ\text{C}$ предусматривается предупредительный сигнал и автоматическое включение вентиляторов АВО, находящихся в резерве. Однако, возникает вопрос разработки алгоритмов прогнозирования выходной температуры из АВО газа и дальнейшей стабилизации температуры газа за счет частотного регулирования, позволяющей оптимизировать затраты на совершение газотранспортной работы. На данном этапе рассматривалась функциональная схема АВО. Защита от образования гидратов в теплообменных секциях осуществляется при достаточно низких температурах окружающего воздуха и приближении

температуры теплообменных секций к температуре гидратообразования.

Структурно-параметрический анализ

Задача структурно-параметрической оптимизации – определение оптимальной структуры и параметров управляющего устройства для математической модели АВО газа.

Вектор управления представляет функцию:

$$U = f\{x_1, x_2, \dots, x_i\}, \quad (3)$$

где U – вектор управляющих воздействий; X – вектор состояния.

Цель управления задается в виде некоторого допустимого значения функционала I (целевая функция или критерий оптимизации):

$$I = F\{x, f, u, y, g, t\}, \quad (4)$$

где f – вектор возмущающих воздействий, y – вектор выходных координат; g – вектор задающих воздействий.

Вектор оптимального управления U_0 – это вектор управления, обеспечивающий экстремум I . Задача оптимизации представляет собой выработку вектора задающих воздействий $g = \{g_1, g_2, \dots\}$, процесс преобразования задающих воздействия в управляющие $g(t) \rightarrow u(t)$.

Рассмотрим такие критерии оптимизации (минимум затрат электроэнергии и критерий обеспечения заданной точности).

В общем виде минимум потерь можно определить как

$$I = \sum_{i=1}^n S_i \int_0^T x_i(t) dt \longrightarrow \min, \quad (5)$$

где $x_i(t)$ – переменная технологического процесса; S_i – стоимость потерь от неустойчивости i -й переменной.

Во многих случаях качество работы САУ АВО можно оценить несколькими критериями. Тогда формируется один векторный критерий или используют один показатель качества, а на остальные накладывают ограничения.

Векторный критерий оптимизации можно представить:

$$I = \{I_1, I_2, \dots\}^T, \quad (6)$$

От векторного критерия переходят к обобщенному скалярному:

$$I = \sum_{i=1}^k c_i I_i, \quad (7)$$

где c_i – коэффициент, показывающий вклад частного критерия в общий скалярный $\sum c_i = 1$.

Оптимизация охлаждения газа на компрессорной станции заключается во включении вентиляторов АВО в количестве,

обеспечивающем минимальные затраты на транспортировку газа. Затраты на транспортировку газа складываются из двух составляющих: затраты электроэнергии на привод вентиляторов АВО; затраты топливного газа ГТУ для привода нагнетателей природного газа.

Стоимость электроэнергии $C_{эл}$, руб./ч, необходимой для работы вентиляторов АВО, определяется суммарной мощностью работающих вентиляторов и стоимостью электроэнергии:

$$C_{эл} = \Pi_{эл} N_{эл}, \text{ руб./ч}, \quad (8)$$

где $N_{эл}$ – суммарная мощность включенных вентиляторов, кВт; $\Pi_{эл}$ – цена 1 кВтч электроэнергии.

Стоимость газа, израсходованного ГТУ,

$$C_{газ} = \Pi_{газ} \frac{G_{топ}}{1000}, \text{ руб./ч}, \quad (9)$$

где $\Pi_{газ}$ – цена газа, руб./тыс.; $G_{топ}$ – расход топливного газа, $\text{м}^3/\text{ч}$.

Затраты на транспортировку газа определяются факторами: объемная производительность газопровода; давление за ЦБН; температура грунта; температура окружающего воздуха.

Критерий обеспечения заданной точности должен быть выполнен с учетом выполнения $T_n < T_r$ и анализом оценки точности и качества переходного процесса. Для этого необходимо произвести оценку по критериям максимального быстродействия, максимальной точности, улучшенного критерия оптимизации, оптимизации расхода энергии на управление).

Максимальное быстродействие определяется по формуле:

$$I = \int_{t_0}^{t_k} dt = t_k - t_0 \longrightarrow \min. \quad (10)$$

Максимальная точность:

$$I = \int_{t_0}^{t_k} \varepsilon^2(t) dt \longrightarrow \min, \quad (11)$$

Улучшенный критерий оптимизации:

$$I = \int_{t_0}^{t_k} \left[\varepsilon^2(t) + \sum_{i=1}^n \lambda_i^2 (\varepsilon^{(i)})^2 \right] dt \longrightarrow \min, \quad (12)$$

где λ – коэффициент, ограничивающий скорость переходного процесса, т.е. величину перерегулирования.

При возникновении случайных воздействий в качестве критерия оптимизации можно рассмотреть среднее значение квадрата ошибки:

$$I = \overline{\varepsilon^2} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \varepsilon^2(t) dt \longrightarrow \min. \quad (13)$$

Критерий оптимизации расхода энергии на управление можно представить:

$$I = \int_{t_0}^{t_k} U(t) I(t) dt \longrightarrow \min. \quad (14)$$

При воздействии на объект управления возмущений, в качестве критерия принят функционал, характеризующий взаимную корреляцию между выходом и возмущением:

$$I = \int_{t_0}^{t_k} y(\tau) f(\tau) d\tau \longrightarrow \min. \quad (15)$$

Из формул, приведенных выше, следует, что критерий оптимизации зависит от режима работы объекта (в условиях КС) и от целей оптимизации, которые необходимо достичь. В общей виде задача оптимизации управления АВО газа можно представить как минимизируемый функционал в виде:

$$I = G_k [X_k, U(t_k), f_k] + \int_{t_0}^{t_k} F(X, U, f, t) dt \longrightarrow \min, \quad (16)$$

где G_k – функция, характеризующая качество в конечный момент времени, т.е. в установившемся состоянии – после завершения переходного процесса.

$$\int_{t_0}^{t_k} F(X, U, f, t) dt, \quad (17)$$

где F – характеризует качество работы объекта при анализе переходных процессов.

Для САУ АВО газа одновременно присутствуют различные типы данных, то есть задача в общем случае относится к смешанным задачам математического программирования [10, 11, 12].

Одним из способов структурно-параметрического моделирования является применение теории нечеткой логики, методов ИНС к описанию сложных систем. САУ АВО газа можно представить в виде нечеткой сети или использования для прогнозирования построение ИНС. Взаимодействия между элементами системы представляются в виде нечетких правил или отыскания архитектуры ИНС с точностью прогнозирования 1–2%, которая задается исследователем.

Параметрический синтез

При параметрическом синтезе задаются параметры и характеристики элементов модели, учитываются дополнительные факторы. Для построения прогнозирования температуры использовались данные: температура газа на входе в АВО (К); температура газа на выходе в АВО (К); давление

газа на входе в АВО (Мпа); давление газа на выходе в АВО (МПа); удельная теплоемкость воздуха (кДж/кг·К); массовый расход воздуха (кг/с); температура воздуха (К).

Перечень дополнительных параметров уточняется при проектировании АВО газа. К таким параметрам можно отнести, коэффициенты, учитывающие конструктивные особенности АВО газа; степень загрязнения поверхности теплообмена; коэффициент теплопередачи АВО; поверхность теплопередачи; режим транспорта газа (учет количества агрегатов ГПА, степень компримирования газа); температурные напоры на входе и выходе АВО; частота вращения ЭД; плотность природного газа и воздуха при стандартных условиях; поправочный коэффициент, учитывающий перекрестных ход теплоносителей; температура и массовый расход воздуха; режим работы КС; прогноз (кратко- или долгосрочный) и др. Дополнительно проводился регрессионный анализ (анализ чувствительности к входным переменным), позволяющий выделить ключевые переменные, влияющие на прогнозирование температуры на выходе из АВО газа.

Параметрический синтез и анализ

Исследования структурной схемы управления АВО газа, дальнейший синтез характеристик элементов с учетом выходных параметров и внешним условиям воздействия. Решение задачи стабилизации температуры газа с применением информационной управляющей системы требует учета заданных условий. После выполнения расчета переходного процесса анализируются выходные параметры модели.

Исследование влияния на среднюю ошибку отклонения прогнозирования температуры на выходе из АВО газа при изменении архитектуры ИНС, типа, функции активации показало преимущество использования ИНС архитектуры MLP. Сравнительный анализ различных архитектур ИНС по основным статистическим критериям показан в табл. 2.

Параметрический анализ

На данном этапе необходимо выполнить одновариантный либо многовариантный параметрический анализ для объекта исследования. Например, параметрический анализ работы АВО газа (разное количество включенных вентиляторов), время переходного процесса, исследование переходного процесса для различных вариантов использования регуляторов. Типовой задачей параметрического анализа является выбор регулятора, расчет переходных процессов для системы САУ, оценка значимости факторов, влияющих на разработку системы стабилизации температуры АВО газа.

Таблица 2

Сравнительный анализ

Архитектура сети	Отношение ст. откл.	Корреляция Спирмена	Производительность обучения	Контрольная производительность	Примечание
RBF 10-24-1	0,283344	0,959119	0,952275	0,927166	плохо экстраполирует данные большое время обучения
Линейная 10-1-1	0,145633	0,989776	0,962275	0,927166	прогноз редко бывает линейной зависимостью
MLP 10-8-1	0,148087	0,989178	0,964504	0,936889	требует «тонкой» настройки, выбор окна прогнозирования

Выводы

Для исследования системы автоматического управления АВО газа использовался структурно-параметрический синтез, позволяющий исследовать качество переходного процесса, обосновать критерии оптимизации для работы АВО газа. Факторы, влияющие на систему стабилизации температуры АВО газа, позволили поставить и решить задачу прогнозирования температуры на выходе из АВО газа с применением ИНС. Средняя относительная ошибка отклонения прогноза от фактической температуры на выходе из АВО газа составила 1,5%, тип ИНС – MLP, с функцией активации гиперболический тангенс. Применение аппарата искусственных нейронных сетей к задаче прогнозирования температуры на выходе из АВО газа позволит диспетчерам оптимизировать затраты на охлаждение компримированного газа, а также предвидеть превышение температуры выше допустимой нормы и исключить аварийную остановку КС, тем самым снизить затраты на работу газотранспортной системы.

Список литературы

1. Постановление Правления ОАО «Газпром» «О перспективах разработки и внедрения газо- и энергосберегающих технологий и их влиянии на оптимизацию топливно-энергетического баланса РФ» (утв. от 22.01.2009 г. № 3).
2. Энергетическая стратегия России на период до 2030 г. (утв. Распоряжением Правительства РФ от 13.11.2009 г. № 1715-р).

3. Приказ ОАО «Газпром» от 09.10.2000 г. № 77 «Об организации работ по энергосбережению в ОАО «Газпром».

4. Концепция энергосбережения и повышения энергетической эффективности в ОАО «Газпром» на период 2011–2020 гг. (утв. Постановлением Правления ОАО «Газпром» от 08.12.2010 г. № 364).

5. СТО Газпром 2-1.20-601-2011. Документы нормативные для проектирования, строительства и эксплуатации объектов ОАО «Газпром». Методика расчета эффекта энергосбережения топливно-энергетических ресурсов, расходуемых на собственные технологические нужды магистрального транспорта газа.

6. Щербинин С.В. Информационно-измерительная и управляющая система аппаратов воздушного охлаждения газа: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2004. – 32 с.

7. Горюнов А.И. Метод структурного и параметрического синтеза и анализа энергоустановок / А.И. Горюнов, Р.Р. Ямалиев, Д.А. Ахмедзянов // Молодой ученый. – 2011. – № 2, Т. 1. – С. 16–19.

8. Аршакян И.И. Выбор схемы управления электродвигателями вентиляторов в системе стабилизации температуры компримированного газа // Проблемы электроэнергетики: сб. науч.тр. – Саратов: Саратов.гос.техн.ун-т, 2007. – С. 49 – 61.

9. Бабанова И.С. Применение искусственной нейронной сети для прогнозирования температуры на выходе из аппарата воздушного охлаждения газа для компрессорной станции магистрального газопровода // International research journal. – 2016. – Vol. 2 (45). – available at: <http://research-journal.org>.

10. Рапопорт Э.Я. Анализ и синтез автоматического управления с распределёнными параметрами: учебн. пособие. – М.: Высш. шк., 2005. – С. 292

11. Ворончак В.И. Структурно-параметрическое моделирование технологических процессов подготовки газа // Сб. науч. тр. – Пенза: Пенз. гос. ун-т, 2005. – С. 16–19.

12. Рапопорт Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределёнными параметрами: учебн. пособие. – М.: Высш. шк., 2003. – С. 299.

УДК 629.353

АНАЛИЗ ПРИЧИН НИЗКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ КАРЬЕРНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ

Власов Ю.А., Спирин Е.Н., Ляпин А.Н., Ляпина О.В., Чечулин К.Н.

*ФГБОУ ВПО «Томский государственный архитектурно-строительный университет»,
Томск, e-mail: yury2006@yandex.ru*

Выполнен анализ номенклатуры карьерных автосамосвалов работающих в горнодобывающей отрасли. Установлено, что условия открытых горных разработок значительно снижают эксплуатационную надежность агрегатов автосамосвалов оборудованных замкнутыми системами смазки. Показано, что существующая система технического обслуживания и ремонта не позволяет повысить коэффициент технической готовности карьерного автопарка. Статистика отказов по отдельным агрегатам показывает, что наиболее критическими являются агрегаты, которые оборудованы замкнутыми системами смазки. Значит диагностика агрегатов автосамосвалов по параметрам работающего масла способна выявлять неисправности на ранних стадиях, что в значительной степени будет приводить к снижению затрат на техническое обслуживание и сокращению простоев автомобилей в ремонте.

Ключевые слова: карьерный автосамосвал, техническое обслуживание, ремонт, эксплуатация, отказ

ANALYSIS OF THE REASONS OF LOW OPERATIONAL RELIABILITY OF CAREER DUMP TRUCKS

Vlasov Yu.A., Spirin E.N., Lyapin A.N., Lyapina O.V., Chechulin K.N.

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, e-mail: yury2006@yandex.ru

The authors performed an analysis of the range of career dump trucks working in the mining industry. It is established that the conditions of open-pit mining significantly reduces the operational reliability of units of dump trucks equipped with closed lubrication systems. It is shown that the existing system of technical maintenance and repair does not allow to increase the ratio of technical readiness car fleet. Statistics of failures on individual aggregates shows that the most critical are the units that are equipped with closed lubrication systems. Means diagnostics units of dump trucks on the parameters of working oil is able to detect faults at early stages. This will lead to lower maintenance costs and reduce downtime of vehicles in repair.

Keywords: dump truck, maintenance, repair, operation, failure

Основным видом транспортных средств, в условиях открытых разработок месторождений полезных ископаемых, являются карьерные автосамосвалы (КАС). В России, главным образом, эксплуатируются автосамосвалы ПО «БелАЗ», которые также поставляются на рынки ближнего и дальнего зарубежья. За более чем полувековую историю автозаводом было разработано более 400 модификаций и выпущено свыше 120 тысяч единиц карьерных самосвалов грузоподъемностью от 27 до 360 тонн. В последние десятилетия в России появились самосвалы нового поколения грузоподъемностью 55–60, 90, 160, 240 и 320–360 т, оптимально соответствующие потребностям горнодобывающей промышленности [1–7].

Расширяя номенклатуру выпускаемой продукции, ПО «БелАЗ» постоянно ведет работу по повышению надежности серийно выпускаемых узлов и агрегатов, уделяет большое внимание созданию бортовых систем управления безопасностью и получения информации о параметрах работы узлов и систем, обеспечивает комфортные условия для водителей.

В 70–80 годы 20 века самосвалы БелАЗ-7548 грузоподъемностью 42 тонны являлись основным технологически транспортом в карьерах и крупных строительных сооружениях. Однако с ухудшением горнотехнических условий открытых горных разработок, связанных с увеличением глубины и пространственных размеров карьеров, спрос на самосвалы такой грузоподъемности снизился. Приоритеты для карьеров большой мощности, с позиции увеличения производительности по горной массе, были отданы самосвалам большой и особо большой грузоподъемности с электромеханическими трансмиссиями (ЭМТ) [8, 9, 10, 11].

Тем не менее, «ниша» в классе грузоподъемности самосвалов до 75 тонн не опустела. На смену пришли 45-тонные БелАЗ-7547 и 55–60-тонные БелАЗ-7555. Такие самосвалы, оснащенные гидромеханическими трансмиссиями (ГМТ), сегодня используются в карьерах при добыче полезных ископаемых не только малой и средней мощности, но и большой, где глубина может превышать более 200 м.

В настоящее время все карьерные автосамосвалы БелАЗ в классах грузоподъемности до 75 т оснащены ГМТ, которые имеют более высокую эффективность механической силовой передачи, по сравнению с ЭМТ, и что делает возможным эксплуатацию самосвалов на затяжных и повышенных уклонах без перегрева узлов трансмиссии. Однако основным недостатком ГМТ является более низкий ресурс до капитального ремонта основных узлов и возрастание общих издержек за период эксплуатации самосвалов [8, 12].

Зарубежные автопроизводители карьерного автотранспорта (Caterpillar, Haulpak, Perlini, O&K, Terex и др.), аналогично производителям БелАЗ, оснащают самосвалы грузоподъемностью до 65 т ГМТ примерно с одинаковыми характеристиками [13–18]. В последние 15–20 лет практически все фирмы-производители вели активные работы по переоборудованию 90–218-тонных самосвалов гидромеханическими трансмиссиями, что свидетельствует о перспективности использования ГМТ в приводах карьерного автотранспорта.

Белорусский автозавод уже длительное время ведет проектные работы по созданию самосвалов с ГМТ грузоподъемностью более 90 т. Но отсутствие необходимого опыта не позволяет запустить в производство автомобили с данным типом трансмиссий, которые будут предназначены, в первую очередь, для горнодобывающей отрасли России и стран СНГ [18].

Например, в России более 40 % добываемого угля сосредоточено в Кузбассе [19]. В связи с более низкой рентабельностью подземных работ и вынужденным закрытием ряда шахт, возрастает значение открытого способа добычи угля [20, 21]. При этом около 50 % угля Кузбасса добывается открытым способом, где в разработках принимают участие около 20 акционерных обществ и компаний.

Для осуществления транспортного процесса на предприятиях Кузбасса сделана ставка на использование самосвалов с ГМТ марок БелАЗ-7540 (540) грузоподъемностью 30 (27) т, БелАЗ-7548 (548) – 42 (40) т, БелАЗ-7547 – 45 т, БелАЗ-7555 – 55–60 т. Выбор БелАЗов с ГМТ обосновывается во многом тем, что такие автосамосвалы эксплуатируются длительное время и хорошо изучены [22–24]. В работе [18] проводится анализ эксплуатационных показателей самосвалов с ГМТ в сравнении с ЭМТ, где показана равнозначность влияния технических характеристик привода на эксплуатационные показатели самосвалов с ЭМТ и ГМТ.

Самосвалы БелАЗ, как транспорт рабочей зоны карьера, в наибольшей степени подвержены воздействию усложняющихся с глубиной горнотехнических условий разработки [1, 12]. Производство вскрышных работ, в таком случае, зависит от грузоподъемности самосвалов, которые, в свою очередь, ограничиваются мощностью двигателя, несущей способностью шин и типом применяемых трансмиссий. Увеличение объемов вскрышных работ снижает производительность карьерного автотранспорта, самосвалы испытывают повышенные нагрузки, и это негативно сказывается на надежности их силовых агрегатов [25–27].

Совершенствуя производственные процессы при разработке открытых месторождений полезных ископаемых, за счет передовых технологий и комплексной механизации [28, 29], карьерному автотранспорту отводится первостепенная роль в грузоперевозках. Однако, высокая стоимость автосамосвалов, их зависимость от качества дорог и климатических условий, а также значительная трудоемкость технического обслуживания и ремонта (ТО и Р), существенно ограничивают рост производительности КАС на предприятиях горнодобывающей отрасли.

Например, на рынке карьерной техники, в зависимости от возраста и модификации, автосамосвал БелАЗ-7555 может стоить 9 млн руб. [30]. Таким образом, даже БелАЗ не очень большой производственной мощности весьма дорог и потеря его работоспособности отразится миллионными затратами.

Проведение ТО и Р автосамосвалов является важным и необходимым производственным процессом в технологических процессах открытых горных работ [28, 29]. Затраты на проведение ТО и Р автомобиля составляют 35–38 % от затрат на перевозки. По данным [31], трудовые затраты на ТО и Р автосамосвала составляют 86,8 %, на капитальный ремонт – 8,5 %, а на производство автомобиля – всего 4,7 %. Следовательно, вопрос снижения затрат на ТО и ремонт КАС является актуальным.

Постановка проблемы. В настоящее время в России эксплуатация КАС регламентируется системой ТО и Р, которая отражена в нормативных документах: «Положение о техническом обслуживании и ремонте подвижного состава автомобильного транспорта» [32] и «Положение о техническом обслуживании и ремонте автомобилей БелАЗ грузоподъемностью 75 т и более (временное)» [33]. Данные документы были разработаны более 25 лет назад, и до настоящего времени не пересматривались. Следует отметить, что за прошедший период времени

существенно обновился парк отечественных автомобилей, стали более совершенны технологические процессы ТО и Р, и предлагаются рациональные цикловые графики периодичности технического обслуживания [31, 34, 35].

Исследования, которые были выполнены в ОАО ХК «Якутуголь» в конце 90-х годов прошлого века, показали [36], что даже полное соблюдение существующей системы ТО и Р, согласно [32, 33], не дало желаемого результата по поддержанию КАС в технически исправном состоянии. Коэффициент технической готовности (КТГ) с возрастом автомобилей по маркам постоянно снижался, и находился в пределах 0,45–0,65, что, на наш взгляд, является недопустимо низким. При этом наибольшее число отказов приходилось на двигатели, узлы и агрегаты гидромеханической трансмиссии и гидравлической системы.

Подобная ситуация наблюдалась в автотранспортном управлении ОАО Разрез «Шестаки», входящего в группу предприятий ЗАО «Стройсервис» Кузбасса. Нашими исследованиями было установлено, что простои автосамосвалов БелАЗ, связанные с неисправностями двигателя, составляют 29% в общем балансе простоев, агрегатов трансмиссии – 17%, гидравлических систем – 8%, проведением ТО – 6%. Большое количество простоев связано с ремонтом и заменой шин – 14%, а 24% составляют долю простоев остальных неисправностей (тормозной системы, ходовой части, электрооборудования, рамы, оперения, кабины и грузовой платформы). Также установлено, что 27% простоев связано с устранением постепенных (износных) отказов.

Основными причинами постепенных отказов агрегатов, являются абразивные и коррозионно-механические изнашивания, которые характерны для агрегатов, оборудованных замкнутыми системами смазки [37–39]: двигатели внутреннего сгорания (ДВС), гидромеханические передачи (ГМП), коробки переключения передач (КПП), редукторы ведущих мостов (РВМ), редукторы мотор-колес (РМК), гидравлические системы (ГС).

Исследования отказов механических передач КАС [38, 40], в условиях угольного разреза АО «Вахрушевуголь» Кузбасса, установили, что зубчатые колеса работают при высоких нагрузках, относительно небольших скоростях и при значительных изменениях крутящего момента. Поэтому, преобладающими являются постепенные отказы (до 80% от количества всех отказов): износ шлицев торсионного вала, фланцев и шестерен, усталостное нормальное или интенсивное выкрашивание рабочей поверхности зуба, износ сепараторов подшипников сателлитов, ослабление креплений деталей, износ и повреждение манжет.

Одновременно в автосамосвалах БелАЗ имеют место и внезапные отказы, 20% которых, возникают при сочетании неблагоприятных факторов. К таким отказам относятся повреждения корпуса редуктора, откол зубьев шестерен и срез шлицев торсионного вала. Эти отказы связаны с повышением усталостной прочности металла и ростом концентраций механических примесей в масле.

Так планетарные РМК автосамосвалов БелАЗ грузоподъемностью свыше 75 т, с электромеханической трансмиссией, имеют ряд «критических» деталей: солнечные шестерни 1-го и 2-го ряда, сателлиты, подшипники сателлитов, торсионные валы и сапуны. При этом эксплуатационный ресурс подшипников РМК ниже нормативного в 1,3–1,5 раза.

Наиболее характерными отказами РМК в эксплуатации является утечка масла через уплотнения и соединения. Доля таких отказов у автосамосвалов БелАЗ-7519 и их модификаций составляет 36,7%, у – БелАЗ-75211 (Бачатский угольный разрез ОАО «УК Кузбассразрезуголь») – до 55%. Достаточно частыми являются случаи разрыва уплотнительной прокладки под крышкой смотрового окна и наружной крышки, неработоспособное состояние или отсутствие сапуна, и как следствие, накопление в масле РМК твердых частиц продуктов износа деталей и загрязнений. При этом величина утечек может достигать от 10% и более на 1000 км пробега, а содержание кремния в масле – 0,086%. При удовлетворительном техническом состоянии герметичности РМК содержание кремния в работающем масле находится в пределах 0,032%.

Статистика отказов РМК автосамосвалов БелАЗ75211 показала: износ торсионного вала и шестерен, выкрашивание поверхности и облом зубьев составили 2%; износ подшипников сателлитов – 2%; износ сальников, подтекание масла, вследствие нарушения герметичности – 4,5%; неремонтопригодные РМК (например, трещины корпусных деталей) – 3%. Доля отказов РМК в общем балансе неисправностей автосамосвала составила 11,5%.

Данные исследования были проведены в условиях эксплуатации КАС на угольных карьерах Кузбасса в 90-е годы [38]. Однако спустя десятилетия ситуация существенно не изменилась по причине отсутствия надлежащего контроля и ТО. Исследования [41] на предприятиях ОАО «УК Кузбассразрезуголь» позволили выполнить ранжирование причин и оценить удельный вес отказов автосамосвалов в условиях эксплуатации (табл. 1 и 2).

Таблица 1

Причины и удельный вес отказов в работе автосамосвалов на предприятиях ОАО «УК Кузбассразрезуголь» [41]

Причина	Кедровский		Моховский		Бачатский		Калтанский	
	моточас	%	моточас	%	моточас	%	моточас	%
ДВС	7986,2	11,38	1623,3	12,65	19265,6	24,91	9165,0	26,58
Электропривод	10032,4	14,29	0,0	0,00	13998,3	18,10	2896,0	8,39
Рулевое управление	856,1	1,22	356,6	2,78	2489,0	3,22	359,0	1,04
Тормозная система	2165,6	3,08	523,1	4,07	2389,1	3,09	679,0	1,97
Шиномонтажные работы	15798,0	22,51	1165,3	9,08	8698,0	11,24	2157,0	6,25
Сварочные работы	7234,3	10,31	800,2	6,24	4111,1	5,31	3548,4	10,30
РМК	18286,7	26,05	5855,7	45,63	23100,8	29,86	10977,4	31,83
Прочие трансмиссии	7837,2	11,16	2509,6	19,55	3300,4	4,27	4704,6	13,64
Итого	70196,5	100	12833,8	100	77352,3	100	34486,4	100

Таблица 2

Причины простоев автосамосвалов на предприятиях ОАО «УК Кузбассразрезуголь» [41]

Рейтинг по отказам	Кедровский	Моховский	Бачатский	Калтанский
1	РМК	РМК	РМК	РМК
2	Шиномонтажные работы	Прочие трансмиссии	ДВС	ДВС
3	Электропривод	ДВС	Электропривод	Прочие трансмиссии
4	ДВС	Шиномонтажные работы	Шиномонтажные работы	Сварочные работы
5	Прочие трансмиссии	Сварочные работы	Сварочные работы	Электропривод

Подобная ситуация наблюдается и у КАС с гидромеханической трансмиссией. В работе [37] указывается, что причиной выхода из строя ГМП автосамосвалов БелАЗ грузоподъемностью до 75 т, является ухудшение качества ТО, что снижало среднюю наработку на отказ до 38,2 тыс. км. При этом отмечалось, что ремонт нередко выполнялся запасными частями низкого качества без надлежащего технического контроля. Как следствие – увеличение темпов изнашивания дисков фрикционов, повышенное загрязнение рабочих жидкостей, возникновение абразивного износа сопрягаемых поверхностей, утечки, рост температуры и перегрев агрегата.

Выход из строя фрикционов ГМП связан с постепенными отказами, которые вызваны предельным износом (47,2%) и спеканием дисков (12,1%), низким качеством масла, отложениями продуктов износа в бустере фрикционов (11,9%) и полостях золотников (7,2%), утечками масла из корпуса (10,3%) и перетеканием масла внутри ГМП (33,8%).

Низкий уровень технического состояния ГМП отмечается в работе [37]. Характерными неисправностями ГМП, приводящими к отказам, являются негерметичность конструкции (32,2%), дефекты масляных

насосов (28,0%), износ дисков двойного фрикциона (21,0%), износ вилки заднего хода (18,8%).

Характерными причинами преждевременных отказов редукторов главных передач (РГП) автомобилей КраЗ-256Б являются эксплуатационные факторы, влияющие на износ деталей. В автообъединении «Томскстройтранс» в условиях Западной Сибири доля отказов РГП постепенного износного характера составила 48,1%, облом зубьев сателлитов и полуосевых шестерен – 23,1%, прочие отказы – 28,8%.

Анализ отказов коробок переключения передач автомобилей МАЗ и КраЗ показал, что их доля в общем балансе составляет 12,3 и 13,5% соответственно [38]. При этом поверхности зубьев шестерен, сепараторов подшипников, шеек валов и других деталей имеют структурные и геометрические изменения форм по причине износа.

Авторы работы [42] показывают, что износ не только снижает нагружающую способность на узлы и детали механических передач, работающих в масле, но и приводит к внезапным отказам. Подшипники КПП, редуктора среднего моста (РСМ) и РВМ главным образом выходят из строя по причине износа. Шестерни КПП имеют износ

в 34 % случаев, облом зубьев – 45,3 %, усталостное поверхностное выкрашивание – 20 %, прочие – 0,7 %. Отказы деталей РСМ распределяются следующим образом: износ полуосей – 43,6 %, облом полуоси – 54,2 %, прочие – 2,2 %; износ шестерен – 14,4 %, облом зубьев – 63,2 %, прочие – 22,4 %. Отказы деталей РЗМ распределяются следующим образом: износ полуоси – 36 %, облом полуоси – 60 %, прочие – 4 %; износ шестерен – 2,8 % усталостное поверхностное выкрашивание – 13,4 %, облом зубьев – 74,5 %, прочие (сколы, срывы, смятия) – 9,3 %.

Автор работы [37] показывает, что доля отказов 2–3 «критических» деталей КПП и РВМ составляет более 50 % от всех отказов данных агрегатов, а затраты на их устранение составляют 75...80 % от общей суммы затрат.

Анализ надёжности гидравлических элементов автомобилей показал [43, 44], что наряду с выходом из строя быстроизнашивающихся деталей, таких как резиновые уплотнения валов и штоков, постоянно находящихся в движении, имеет место выход из строя самих гидравлических узлов и механизмов, а также элементов гидроавтоматики.

Наиболее распространенными агрегатами гидравлических систем КАС являются насосы, силовые гидравлические цилиндры и гидромоторы. Наибольшее число неисправностей агрегатов гидравлических систем связано с нарушением работоспособности прецизионных пар и элементов уплотнения [45]. При этом преобладающее количество неисправностей происходит вследствие неисправной работы регулирующих и распределительных устройств, а также плунжерных и поршневых пар.

Например, периодическое нарушение подачи масла насосом является следствием заедания клапанов системы регулирования. Неправильное функционирование исполнительного механизма следящего гидродвижения вызывается возрастанием трения в распределительном устройстве. Поломка узлов насосов и разрушение гидромоторов нередко являются следствием заклинивания плунжерных или поршневых пар ротора.

Существенное влияние на надежность гидроагрегатов оказывают физико-химические свойства рабочих жидкостей, которые создают антифрикционную среду для работы деталей. Особое влияние на работоспособность пар трения оказывает загрязненность масел нерастворимыми твердыми частицами.

В гидравлических системах, несмотря на наличие фильтров, находятся продукты атмосферного загрязнения и элементы износа, размеры которых соизмеримы с зазорами сопрягаемых деталей или щелевых уплотнений [46, 47].

Твердость частиц абразивного загрязнения значительно превышает твердость материала, из которого изготавливают детали. Движущиеся частицы с рабочей жидкостью в гидросистеме попадают в зазоры между рабочими поверхностями сопрягаемых деталей, что вызывает увеличение сил трения и, как следствие, повышенный износ или заклинивание деталей. Концентрация загрязнений в жидкости неравномерна [45, 48], число частиц малого размера значительно превышает число частиц крупного размера. Существующая норма степени загрязненности рабочей жидкости 0,005 % по массе [49] является малообоснованной. Она не устанавливает предельного допустимого загрязнения ни по размеру, ни по характеру частиц.

Гидросистема КАС с технической точки зрения характеризуется комплектом узлов и агрегатов, имеющих общую замкнутую систему смазки. Поэтому гидравлическое масло является источником и носителем информации о техническом состоянии гидросистемы. Для эффективного использования такой информации необходимо владеть информацией об эксплуатационной надежности гидросистемы и ее отказах.

Как правило, гидросистема включает комплекс механизмов управления. Например, гидросистема автосамосвалов БелАЗ объединяет тормозную систему, гидроусилитель руля и подъемный механизм платформы. Доли отказов гидросистем автосамосвалов БелАЗ-7555, согласно наблюдениям [40, 50], распределяются следующим образом: подъемный механизм платформы – 61 %; автомат разгрузки насоса – 31 %; механизм тормозной системы – 4 %; механизм гидроусилителя руля – 4 %.

Двигатели автомобилей являются наиболее изученными силовыми энергетическими агрегатами [51, 52]. Совершенствование технологий изготовления ДВС, использование новых видов обработки, улучшение свойств смазочных масел и их очистки влекут за собой снижение износа деталей. Такая тенденция развития характерна для двигателестроителей и производителей смазочных материалов. Тем не менее, эти мероприятия не могут всецело избавить ДВС от внешних и внутренних эксплуатационных факторов. В работах [51, 52] отмечается, что основными деталями, подвергающимися износу, являются детали цилиндропоршневой группы. Преобладающими видами износа являются: абразивный, при схватывании, коррозионно-механический. Данные виды износа, как правило, являются стимуляторами других видов износа, которые могут протекать одновременно. Однако, несмотря

на многочисленные работы по улучшению условий производства и эксплуатации, до сих пор основными деталями, характеризующими интенсивность износа ДВС, являются пары трения: кольцо – гильза; шейка вала – вкладыш (подшипник скольжения); поршневой палец – втулка верхней головки шатуна; кулачок распределительного вала – тарелка толкателя. Об этом свидетельствуют отказы ДВС в условиях эксплуатации [50].

Эксплуатация КАС происходит в условиях повышенной запыленности. Частицы дорожной пыли, попадая в работающее масло, приводят к повышенному абразивному изнашиванию деталей. Низкая температура ДВС при эксплуатации в зимнее время приводит к интенсивному нагарообразованию и закоксовыванию поршневых колец, это приводит к ускоренному «старению» масла и повышенному износу. Использование масла повышенной вязкости вызывает масляное «голодание» при запуске двигателя. Это дополнительный расход моторесурса ДВС, а длительная работа двигателя на холостом ходу также снижает его долговечность. Все перечисленные факторы приводят к относительно невысокому ресурсу силовых установок [53].

Проведенные авторами исследования автомобилей БелАЗ в условиях ОАО разрез «Шестаки» (г. Гурьевск, Кемеровская обл.) позволили проанализировать статистику отказов (табл. 3) и выявить агрегаты (и системы) наиболее «слабые» в эксплуатации.

гаты, имеющие замкнутые системы смазки, и отказы которых составляют значительную долю в общем балансе отказов КАС – от 38 до 48%, то информацию об их технических состояниях можно получить на базе информации, источником и носителем которой является смазочное масло. Для этого на базе информации, полученной от работающего масла, следует выявить самый ненадежный элемент системы и назначить комплекс мер по ТО и Р, который позволит управлять техническим состоянием автомобиля.

Проведенные кафедрой «Автомобили и тракторы» Томского государственного архитектурно-строительного университета, с участием авторов, в автопредприятиях горнодобывающей отрасли Кузбасса внедрения служб контроля и управления надежностью агрегатов автомобилей по параметрам работающего масла (ПРМ) [37–40, 50] показали, что для диагностики агрегатов КАС и контроля качества работающих масел необходимым и достаточным будет комплекс параметров, который будет включать определение: негорючих механических примесей, температура вспышки масла, наличия воды, наличия водорастворимых кислот и щелочей, концентраций загрязняющих компонентов и элементов присадки, выявляемых эмиссионным спектральным анализом масла (ЭСАМ). При этом диагностика по ПРМ способна выявлять комплекс неисправностей КАС.

Таблица 3

Статистика отказов КАС в ОАО разрез «Шестаки», %

Наименование агрегата	БелАЗ-7548		БелАЗ-7555	
	2005 г.	2006 г.	2005 г.	2006 г.
ДВС	29,3	26,3	8,0	10,5
Электрооборудование	6,3	6,6	4,1	3,0
ГМП	7,9	12,4	11,4	24,0
РЗМ	3,0	2,6	7,0	6,7
Шиномонтажные работы	15,9	12,4	20,7	13,5
Гидросистема	6,7	8,5	12,6	15,9
Ходовая часть	19,4	17,5	25,5	18,0
Прочие	11,5	13,7	10,7	8,4
Итого:	100	100	100	100

Решение проблемы. Карьерный автосамосвал можно представить как сложную техническую систему, силовые или энергетические агрегаты которой нерезервируются. Это значит, что выход из строя любого агрегата системы приведет к отказу автомобиля в целом. Если говорить, что элементами такой системы являются агре-

1. *Повышенные и аварийные износы отдельных деталей и узлов.* Данные виды неисправностей определяются ЭСАМ, преимуществом которого является способность раннего обнаружения начала повышенного или аварийного износа.

2. *Неисправности топливной аппаратуры.* Эти неисправности связаны с ухудшением

технического состояния топливной аппаратуры или с нарушением герметичности топливопроводов и топливных насосов, находящихся внутри агрегата. В первом случае это приводит к неполному сгоранию топлива двигателя, во втором – к утечкам топлива в масляную систему двигателя. В обоих случаях увеличиваются топливные фракции в работающем масле, вследствие чего происходит снижение его вязкости и температуры вспышки.

3. *Утечки охлаждающей жидкости в масляную систему.* Данный вид неисправности связан с нарушением герметичности системы охлаждения двигателя. Установить эту неисправность можно путем непосредственного определения содержания охлаждающей жидкости в работающем масле.

4. *Неисправности системы очистки масла.* Такие неисправности приводят к повышенному загрязнению работающего масла механическими примесями, и диагностика этих неисправностей осуществляется по показателям, которые характеризуют его загрязнение.

5. *Неисправности системы очистки воздуха.* Эти неисправности могут быть вызваны нарушением технического состояния воздушного фильтра и нарушением герметичности воздухопроводящих патрубков. В обоих случаях это приводит к значительному повышению содержания кремния в работающем масле. Данный вид неисправности целесообразно определять ЭСАМ.

6. *Нарушение работы системы вентиляции картера.* Эта неисправность косвенно проявляется через показатели работающего масла, которые характеризуются процессами окисления и загрязнения масла топливными фракциями.

Кроме того, ПРМ позволяют также обнаруживать и ряд других неисправностей, специфичных для конкретных моделей двигателей или агрегатов автомобилей.

Вывод

Проблеме снижения эксплуатационной надежности КАС следует противопоставлять мероприятия эффективного использования агрегатов и смазочного масла, базируемых на методах их оценки и контроля. Такие методы должны вскрывать механизмы сложных физико-химических процессов, протекающих в системе «агрегат – масло», и позволять задолго до наступления отказов определять и устранять причины их возникновения.

Список литературы

1. Бахтурин Ю.А. Современные тенденции развития карьерного транспорта // Горный Информационно-Аналитический Бюллетень. – 2009. – № 7.
2. Егоров А.Н. Карьерный самосвалы БелАЗ // Горная промышленность. – 2001. – № 6.
3. Карьерные самосвалы / Холдинг «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ». – 2013. – URL: <http://www.belaz.by/catalog/products/dumptrucks> (дата обращения 14.08.2013).
4. Карьерные самосвалы мировых производителей / Обзор по материалам «Мировая Горная Промышленность» // Горная промышленность. – 2007. – № 3.
5. Крох В.М. Карьерные самосвалы БелАЗ: Перспективы развития конструкции и сервиса // Горная промышленность. – 2003. – № 4.
6. Мариев П.Л., Анистратов К.Ю. «БелАЗ» и современные тенденции развития карьерного автотранспорта // Горная промышленность. – 2001. – № 6.
7. Потапов М.Г. Направления развития карьерного транспорта // Горная промышленность. – 2002. – № 6.
8. Егоров А.Н. Карьерные самосвалы БелАЗ с гидромеханической трансмиссией // Горная промышленность. – 2002. – № 6.
9. Егоров А.Н., Бигель Н.В. Карьерные самосвалы с электромеханической трансмиссией переменного тока // Горный журнал. – 2013. – № 1.
10. Мариев П.Л., Егоров А.Н. Новые самосвалы БелАЗ грузоподъемностью 200 тонн на разрезах Кузбасса // Горная промышленность. – 1999. – № 6.
11. Смоляков В.И. Большегрузные самосвалы БелАЗ в ОАО ХК «Кузбассразрезуголь» // Горная промышленность. – 2002. – № 6.
12. Карьерный автотранспорт: состояние и перспективы / П.Л. Мариев, А.А. Кулешов, А.Е. Егоров, И.В. Зырянов. – СПб.: Наука, 2004. – 429 с.
13. Внедорожные грузовики. Карьерные самосвалы // Cat. 2014. – URL: <http://www.cat.com> (дата обращения: 05.02.2014).
14. Горнодобывающая промышленность. Грузовики на электрическом шасси // Haulpak electrical. – 2013. – URL: <http://www.haulpak.com> (дата обращения: 05.02.2014).
15. Карьерные самосвалы // Liebherr. – 2013. – URL: <http://www.liebherr.com> (дата обращения: 05.02.2014).
16. Карьерные самосвалы // Terex Construction. – 2014. – URL: <http://www.terex.com> (дата обращения: 05.02.2014).
17. Самосвалы // Perlini. – 2013. – URL: <http://perlini.ru> (дата обращения: 05.02.2014).
18. Суздальцев Р.Е. Обоснование рациональных эксплуатационных характеристик привода карьерных автосамосвалов с гидромеханической трансмиссией: дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 1999. – 136 с.
19. Буянкин А.В. Комплексная оценка и прогнозирование показателей качества эксплуатации карьерных автосамосвалов: дис. ... канд. техн. наук. – Кемерово, 2004. – 305 с.
20. Ждамиров В.М. Проблемы открытого способа добычи угля и пути их решения в Российской Федерации // Уголь. – 1992. – № 10.
21. Кузнецов В.И. Развитие открытой добычи угля в Кузбассе // Проблемы открытой добычи угля в Кузбассе: сб. трудов. – Кемерово: Родник, 1990. – С. 5–9.
22. Автомобильный транспорт на карьерах. Конструкции, эксплуатация, расчет / В.С. Квагинидзе, Г.И. Козовой, Ф.А. Чакветадзе, Ю.А. Антонов, В.Б. Корецкий. – М.: Горная книга, 2012. – 408 с.
23. Циперфин И.М., Казарез А.Н. Техническое обслуживание и ремонт автосамосвалов БелАЗ. – М.: Высш. шк., 1982. – 304 с.

24. Циперфин И.М., Штейн В.Д. Эксплуатация карьерных автосамосвалов. – М.: Высш. шк., 1987. – 320 с.
25. Анистратов К.Ю. Техническое обслуживание карьерной техники: современный уровень и перспективы // Горная промышленность. – 2007. – № 3.
26. Проблемы карьерного транспорта // Горная промышленность. – 1995. – № 3.
27. Стребков П.М. Проблемы сервисного обслуживания в горной индустрии на современном этапе // Горная промышленность. – 2007. – № 5.
28. Ржевский В.В. Открытые горные работы: Производственные процессы. – М.: ЛИБРОКОМ, 2013. – 512 с.
29. Ржевский В.В. Открытые горные работы: Технология и комплексная механизация. – М.: ЛИБРОКОМ, 2014. – 552 с.
30. Продажа спецтехники БелАЗ б/у и новой // Экскаватор.ру. – 2014. – URL: <http://exkavator.ru>. (дата обращения: 08.02.2014).
31. Меджидов М.А. Совершенствование методов технического обслуживания и ремонта карьерных автосамосвалов: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2009. – 136 с.
32. Положение о техническом обслуживании и ремонте подвижного состава автомобильного транспорта / Мин авто транс РСФСР. – М.: Транспорт, 1986. – 72 с.
33. Положение о техническом обслуживании и ремонте автомобилей БелАЗ грузоподъемностью 75 т и более (временное). – М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1985. – 78 с.
34. Беликов А.А. Разработка оптимальной стратегии технического обслуживания и ремонта пневмоколесных машин на основе оценки их текущего технического состояния: дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2000. – 161 с.
35. Корнеев С.В. Методология совершенствования системы технического обслуживания дорожных, строительных и подъемно-транспортных машин: дис. ... д-ра техн. наук. – Омск, 2003. – 299 с.
36. Квагинидзе В.С. Диагностика, техническое обслуживание и ремонт карьерного горно-транспортного оборудования в условиях низких температур: дис. ... д-ра техн. наук. – Кемерово, 2003. – 310 с.
37. Аметов В.А. Повышение надежности агрегатов трансмиссии автомобилей в условиях автотранспортных предприятий: дис. ...канд. техн. наук. – Томск, 1987. – 158 с.
38. Власов Ю.А. Повышение долговечности редукторов мотор-колес землеройно-транспортных машин: дис. ...канд. техн. наук. – Томск, 1998. – 170 с.
39. Тищенко Н.Т. Исследование износа машин и механизмов методом спектрального анализа масла: дис. ...канд. техн. наук. – Томск, 1975. – 180 с.
40. Спирин Е.Н. Повышение эксплуатационной надежности строительных и дорожных машин путем модифицирования смазочных материалов: дис. ...канд. техн. наук. – Томск, 2006. – 130 с.
41. Хорешок А.А. Метод комплексного диагностирования редукторов мотор-колес карьерных автосамосвалов в условиях предприятий ОАО «УК Кузбассразрезуголь» / А.А. Хорешок, А.В. Кудреватых // Горная промышленность. – 2010. – № 5(93) – С. 60–64.
42. Сафонов В.А. Надежность сопряжений агрегатов трансмиссии автомобилей КрАЗ-256Б / В.А. Сафонов, Н.К. Федин, А.Ф. Гусев // Научн. сб.: Повышение эффективности использования автомобильного транспорта. – Саратов: Саратов. политехн. ин-т, 1978. – Вып. 3. – С. 62–64.
43. Власов Ю.А. Диагностирование гидросистем по параметрам работающего масла / Ю.А. Власов, Ю.С. Саркисов, Н.Т. Тищенко, О.В. Пономарева, А.И. Тузовский // Проблемы эксплуатации и обслуживания транспортно-технологических машин: материалы Международной научно-технической конференции. – Тюмень, 2009. – С. 93–97.
44. Розентуль А.П. Совершенствование системы технического обслуживания гидравлических буровых станков при низких температурах: дис. ... канд. техн. наук. – Нерюнгри, 2004. – 169 с.
45. Лозовский В.Н. Надежность гидравлических агрегатов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.
46. Беляев А.Е. Выбор параметров рабочей жидкости для диагностирования гидросистемы карьерных автомобилей / А.Е. Беляев, Ю.А. Власов, В.А. Аметов // Диагностика автомобилей: 3-я Всесоюзная научно-техническая конференция. – Улан-Удэ: РИО ВСТИ, 1989. – С. 83–84.
47. Удлер Э.И. Фильтрация нефтепродуктов. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1988. – 216 с.
48. Икрамов У.А. Расчетные методы оценки абразивного износа. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
49. Матвеев А.С. Влияние загрязненности масел на работу гидроагрегатов. – М.: Россельхозиздат, 1976. – 48 с.
50. Власов Ю.А. Методология диагностики агрегатов автомобилей электрофизическими методами контроля параметров работающего масла: дис. ... д-ра техн. наук. – Томск, 2015. – 368 с.
51. Венцель С.В. Применение смазочных масел в двигателях внутреннего сгорания. – М.: Химия, 1970. – 240 с.
52. Григорьев М.А. Очистка топлива в двигателях внутреннего сгорания. – М.: Машиностроение, 1991. – 208 с.
53. Двигатели внутреннего сгорания. Конструирование и расчет на прочность поршневых и комбинированных двигателей / под ред. А.С. Орлина и М.Г. Круглова. – М.: Машиностроение, 1984. – 383 с.

УДК 728.84

АНАЛИЗ КЛАССИФИКАЦИЙ ПОСЕЛКОВ ВТОРЫХ ЖИЛИЩ

Зиятдинов З.З.

*ГОУ ВПО «Пензенский государственный университет строительства и архитектуры»,
Пенза, e-mail: z.uf@yandex.ru*

Приведены данные по количеству вторых жилищ в мире и показаны масштабы территориальной экспансии второго жилища в России. Отмечена необходимость классификаций для выявления и систематизации общих тенденций развития второго жилища. Даны определения терминов «второе жилище» и «поселок вторых жилищ». Существующие классификации отечественных авторов разработаны по разным основаниям, без учета организационно-правовых форм, без анализа зарубежного опыта. Приведен аналитический обзор ряда классификаций, предложенных рядом отечественных и зарубежных ученых, и указаны требования для построения градостроительной классификации поселков вторых жилищ.

Ключевые слова: второе жилище, дачи, садовые участки, летние дома, дачные поселки, садоводческие товарищества

THE CLASSIFICATION ANALYSIS OF SECOND HOMES SETTLEMENTS

Ziyatdinov Z.Z.

Penza State University of Architecture and Construction, Penza, e-mail: z.uf@yandex.ru

The data on number of second homes in the world and shows the extent of the territorial expansion of the second dwelling in Russia. Noted the need for classifications to identify and summarize General trends in the development of second homes. Given the definitions of the terms «second home» and «the village of second homes». The existing classification developed by Russian authors on various grounds, without regard to legal forms, without analysis of foreign experience. An analytical review of the classifications proposed by a number of domestic and foreign authors, and specified requirements for building urban classification of settlements of second homes.

Keywords: second home, cottages, gardens, summer houses, holiday villages, gardening companies

В последние десятилетия в развитых странах мира отмечается интенсивное увеличение объемов строительства загородных домов для отдыха, называемых градостроителями вторые жилища. По данным Всемирной по состоянию на 2010 год день общее число вторых жилищ составляет 420 млн единиц, площадь занимаемой ими территории равна 42 млн га или 420 тыс. кв. км, что составляет 0,282 % от территории суши земли и превышает площади территорий таких отдельно взятых государств, как Германия, Великобритания, Норвегия, Италия и т.д., – всего 134 страны. Численность вторых жилищ постоянно возрастает, темпы их распространения в развитых странах опережают темпы роста населения [13, с. 5]. Развитие второго жилища становится транснациональным явлением: жители многих стран приобретают вторые дома за рубежом, что особенно усилилось после принятия в 1995 г. Шенгенского соглашения об отмене паспортно-визового контроля на границах государств Евросоюза. В ряде регионов число принадлежащих иностранцам вторых жилищ составляет до 60–80 % от суммарного числа первых и вторых жилищ и в 2–4 раза превышает число первых жилищ коренных жителей (рис. 1), что коренным образом меняет функциональное наполнение регионов и такие их

планировочные характеристики, как численность и плотность сети поселений, протяженность транспортных и инженерных коммуникаций и т.д. Начиная с 90-х годов 20 века заметным становится приобретение второго жилища в виде квартиры в крупном городе жителями малых городов и сельских поселений [4, с. 10; 5, с. 27].

В России количество дачных и садовых домов и используемых для отдыха реконструированных и вновь возведенных домов и квартир в сельских и городских поселениях в настоящее время составляет 27,3 миллионов единиц. Более 60 % населения страны обладают вторыми жилищами (рис. 2).

Суммарная территория, занимаемая вторыми жилищами, включая занимаемая общего пользования, равна 4,8 млн га, что превышает площадь Московской области и по отдельности площади таких областей, как Ярославская, Брянская, Пензенская, Тульская, Орловская и т.д. – всего 30 областей [4, с. 1].

Второе жилище как массовое явление, постоянно увеличивающее свою долю в общем балансе землепользования, в объемах потребляемых материальных ресурсов не может не отражать существенных тенденций современного градостроительства и потому требует соответствующих научных исследований [5, с. 2; 6, с. 3].



Рис. 1. Швейцария. Красным выделены кантоны с долей вторых жилищ от 20 до 95% от совокупного числа первых и вторых жилищ. Источник: [15]



Рис. 2. Массивы садоводческих товариществ в Ленинградской области.
Источник: www.obltar.ru Видно, что массивы могут занимать территории размером 10×3 км

При изучении проблем экспансии второго жилища одной из первоочередных задач является разработка градостроительной классификации поселков вторых жилищ, которая необходима для обобщения и систематизации их основных типов и выявления существенных тенденций их распространения. Методология научного познания трактует классификацию как системообразующий элемент исследования, который определяет, какие типы объектов и явлений изучают, в чем их различия и по каким критериям они могут группироваться. С помощью классификации происходит идентификация объектов: определение их места в системе, составление описаний объекта, исследование сходств и различий объектов. Классификация демонстрирует структурные взаимосвязи между кластерами в системе изучаемых объектов, границы между множеством и подмножествами рассматриваемых единиц и иерархические отношения между ними по существенным критериям, в качестве которых принимаются классификационные основания (признаки, показатели, характеристики).

Дефиниции

Разработка классификации потребовала введения в понятийный аппарат настоящего исследования таких терминов как «второе жилище» и «поселок вторых жилищ». Термин «второе жилище» представлен в развернутом и кратком видах.

Развернутое определение: второе жилище – это жилая единица (ячейка) (в виде односемейного дома или квартиры в многоквартирном доме), которая расположена (за пределами обычной среды проживания) в городском или сельском поселении или вне поселения и принадлежит наряду с основным жилищем (в виде дома или квартиры в городе или сельском поселении) на правах частичной или полной собственности или аренды одной и той же семье (или нескольким семьям, у каждой из которых имеется основное жилище) и используется членами семьи (или семей) временно, в течение года менее продолжительно, чем основное жилище.

Краткое определение: второе жилище – все жилые ячейки в собственности одной семьи, не являющиеся ее первым, основным, жилищем. Первое жилище – место проживания семьи более половины дней в течение года и место регистрации ее постоянного проживания.

Поселок вторых жилищ – это поселок, большинство жилых единиц которого является вторыми жилищами.

Классификации поселков вторых жилищ

На сегодняшний день в международной специальной литературе отсутствует общепринятая типология поселков второго жилища. Отдельные классификации разрабатывались на основе различных признаков, с учетом целей и задач конкретных исследований. Юристы классифицировали вторые жилища по правовым аспектам (отношения собственности, формы организации, уровень преступности); экономисты – по стоимостным характеристикам, уровню доходов и экономической эффективности; историки – по периодам возникновения и этапам развития второго жилища; социологи – по демографическим половозрастным показателям и социальной принадлежности владельцев вторых жилищ; архитекторы – по объемно-планировочной организации, и т.д. В существующих классификациях учтены не все имеющиеся виды и формы второго жилища и не отражены градостроительные характеристики поселков вторых жилищ в их взаимосвязанном развитии с градостроительными системами различных уровней [1, с. 45].

Рассмотрим классификации поселков вторых жилищ в хронологической последовательности их разработки.

Исследователь С.С. Шестопалов классифицирует поселки вторых жилищ по «условиям возникновения» в качестве признака, которым «...во многом определяется планировочная структура поселка» (табл. 1) [12, с. 4].

В табл. 1 в качестве классификационных оснований указаны исторические и экономико-правовые характеристики. Не учтены современные тенденции развития второго жилища: рост численности принадлежащих россиянам вторых жилищ, расположенных за рубежом; появление таких типов второго жилища, как квартира или односемейный дом в городе, отдельно расположенные резиденции, замки, дворцы, современные (возведенные после распада СССР) охраняемые дачные поселки с коттеджной застройкой. В составе дачных местностей не указаны «на основе малых городов». Общее название поселений «дачные поселки» представляется юридически некорректным, так как количество дачных участков составляет менее 2% от численности садовых участков.

С.С. Шестопалов приводит определение: «1. Дачный пригород: а) дачная застройка в пределах городской черты;...» [12, с. 2]. Однако пригород – это территория априори вне границ города, и дачные участки в пределах городской черты не могут быть пригородом.

Таблица 1

Поселки вторых жилищ по С.С. Шестопалову

Дачные поселения	
дачные местности (по типам поселений, на базе которых возникли)	дачные поселки (по периоду возникновения и организационно-правовой форме)
● на основе бывших деревень	● дачные поселки досоветского времени
● на основе бывших усадеб	● дачно-строительные кооперативы
● на основе рабочих и пристанционных поселков	● ведомственные дачи ● государственные дачи
	● садоводческие товарищества

Примечание. В таблице текст, выделенный курсивом, введен нами (Зиятдинов 3.3.).

Таблица 2

Распределение вторых жилищ по территориям разных типов

Поселения и территория расположения вторых жилищ	Доля вторых жилищ в общем объеме жилого фонда на данной территории, %		Темпы роста доли вторых жилищ за 30-летний период, раз*
	1970 год	2000 год	
Крупные высокоурбанизированные города	1,3	8,2	6,31
Крупные среднеурбанизированные города	1,2	6,5	5,42
Ближние пригороды крупных городов	3,1	7,3	2,35
Дальние пригороды крупных городов	7,1	8,4	1,18
Средние города	2,3	9,0	3,91
Ближние и дальние пригороды средних городов	5,6	9,2	1,64
Малые города	8,8	16,6	1,89
поселки вдоль межселенных магистралей	7,8	10,2	1,31
Поселки, удаленные от межселенных магистралей	8,0	12,4	1,55
Полу-аграрные и аграрные поселки	12,8	14,4	1,125
Туристические и курортные поселки	44,5	54,2	1,22
Поселения с неопределенной функциональной структурой	5,7	Нет данных	—

Примечания:

1. Выделенный курсивом и фоном текст добавлен нами (3.3. Зиятдинов).
2. Показатель темпов роста измеряется в «разах» и получается делением доли вторых жилищ в 1970 году (показатели второго столбца таблицы) на их долю в 2000 году (показатели в третьем столбце таблицы).
3. Перевод текста в данной таблице с немецкого на русский выполнен нами (3.3. Зиятдинов).

В докладе Федеральной службы пространственного развития Швейцарии (Bundesamt für Raumentwicklung) приведена типология вторых жилищ по территориям их расположения [16, с. 5] (табл. 7).

Классификация в табл. 2 имеет градостроительный характер, так как основанием для классификации являются территории расположения вторых жилищ.

На основе вступившего в силу 15.04.1998 г. Федерального закона № 66-ФЗ «О садоводческих, огороднических и дачных некоммерческих объединениях граждан» нами (3.3. Зиятдинов) составлена классификационная таблица (табл. 3). В законе даны четкие определения орга-

низационно-правовых форм некоммерческих объединений и показаны их отличия друг от друга. В настоящее время доля садоводческих товариществ, партнерств и кооперативов составляет около 80 % от общей доли вторых жилищ в Российской Федерации, а доля дачных объединений – менее 2 %. Оставшаяся доля, около 18 %, приходится на реконструированные и вновь возведенные односемейные дома с приусадебными участками в селах и коттеджных поселках, используемые в качестве второго жилища квартиры в городах и сельских поселениях, а также на загородные резиденции, усадьбы, замки, дома-скиты и т.д.

Таблица 3

Классификация поселков вторых жилищ
по предписываемому назначению по закону № 66-ФЗ от 15.04.1998

Организационно-правовая форма			Вид, принадлежность и источник имущества, ответственность по обязательствам
Некоммерческое	товарищество	Садоводческое (СНТ)	1. имущество общего пользования 1.1. <u>совместная собственность членов</u> создается за счет целевых членских взносов 1.2. <u>собственность товарищества</u> как юридического лица создается за счет (расходуемых согласно уставу) средств специально созданного (по решению общего собрания) фонда из вступительных и членских взносов, доходов от хозяйственной деятельности, предоставленных средств и прочих поступлений 2. члены не отвечают по обязательствам товарищества и наоборот
		Дачное (ДНТ)	
	партнерство	Садоводческое (СНП)	1. имущество общего пользования создается за счет целевых членских взносов и является <u>собственностью партнерства</u> как юридического лица 2. члены не отвечают по обязательствам партнерства и наоборот
		Дачное (ДНП)	
Потребительский кооператив	Садоводческий (СПК)		1. имущество общего пользования, создается за счет объединения паевых взносов, и является <u>собственностью кооператива</u> как юридического лица. Часть имущества может выделяться в неделимый фонд. 2. члены несут субсидиарную ответственность по обязательствам кооператива
	Дачный (ДПК)		

Примечания:

1. Настоящая таблица составлена нами (З.З. Зиятдинов) по описаниям в № 66-ФЗ от 15.04.1998.
2. Некоммерческое объединение – некоммерческая организация, учрежденная гражданами на добровольных началах для решения общих социально-хозяйственных задач [№ 66-ФЗ от 15.04.1998].

Таблица 4

Классификация закрытых (охраняемых) комплексов и поселков

Жилые комплексы и поселки вторых жилищ	Geschlossene Apartmentanlagen закрытые (охраняемые) жилые комплексы	Geschlossene Siedlungen закрытые (охраняемые) поселки (поселения)
Baustruktur структура застройки	Apartmentblocks многоквартирные дома	Einfamilienhäuser, Reihenhäuser, Apartmentblocks односемейные дома, блокированные дома (таунхаусы), многоквартирные дома
Eigentumsstruktur der Gemeinschaftsanlagen форма собственности общественных объединений	Eigentümergeinschaft, Genossenschaft, Aktiengesellschaft товарищество (общество) собственников, товарищество, акционерное общество	Gesellschaft der Eigentümer, Eigentümergeinschaft, Aktiengesellschaft общество собственников, товарищество собственников, акционерное общество
Gemeinschaftlich genutzte Dienstleistungen совместно используемые служебные мощности (содержание имущества общего пользования)	Hausmeister-, Wartungs- und Sicherheitsdienste etc. службы ремонта, обслуживания и обеспечения	
Gemeinschaftlich genutzte Infrastruktur совместно используемая инфраструктура	Grün- und Sportanlagen, Parkplätze, Ver- und Entsorgung etc. озелененные территории и спортивные площадки, парковки и стоянки, снабжение (инженерное обеспечение) и утилизация (водоотведение и мусороудаление)	
Regionale Beispiele региональные примеры	Condominios exclusivos (Lateinamerika); gated condominiums (USA); complexes balneaires (Libanon); osiedle zamnieta (Polen) эксклюзивные кондоминиумы (Латинская Америка); охраняемые кондоминиумы (США); закрытые комплексы (Ливан); закрытые жилые комплексы (Польша)	Gated communities (USA); gated model towns (USA); barrios cerrados (Lateinamerika); security villages (Südafrika) закрытые охраняемые общины (США); охраняемые поселки (Латинская Америка); охраняемые загородные деревни (поселки) (Южная Африка)

Примечание. Жирным шрифтом показан оригинальный текст; выделение жирным, перевод с немецкого на русский (нежирный текст) и серый фон даны нами (З.З. Зиятдинов).

Из таблицы видно, что согласно № 66-ФЗ имущественные отношения владельцев дач и садовых участков отличаются в зависимости от вида правовой формы: товарищество, партнерство или кооператив.

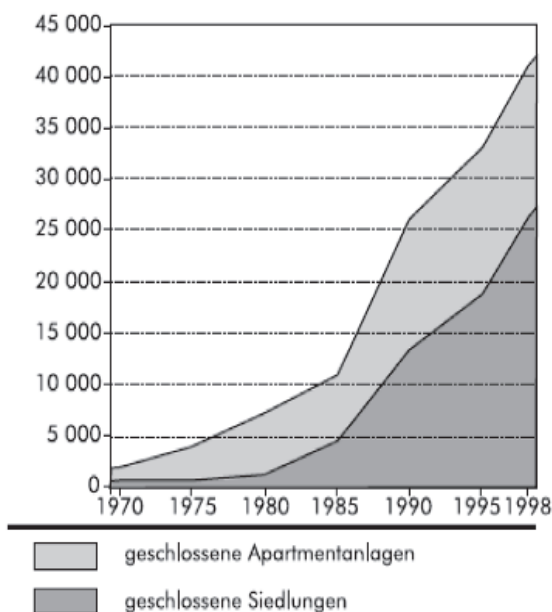


Рис. 3. Увеличение с течением времени количества закрытых (охраняемых) поселков вторых жилищ в США. Источник: [14]

Немецкий градостроитель Г. Глазге (G. Glasze) выделяет такой тип поселков, как закрытые комплексы и поселки вторых жилищ, и приводит классификацию в виде таблицы с их характеристиками [14, с. 43] (табл. 4).

Главным классификационным основанием (признаком) для выделения представляемых в табл. 4 поселков является режим функционирования. Подобные закрытые охраняемые поселки имеются во многих странах, например в США, Англии, Германии, Ливане, а также и в России (где называются охраняемые дачные поселки).

Численность закрытых поселков постоянно возрастает. Так, в США за период с 1978 по 1998 год она выросла в 22 раза (рис. 3, 4, 5) [14, с. 39].

По рис. 3 видно, что увеличивается не только количество, но и темпы его роста, особенно после 80-х годов XX века.

На рис. 4 представлен охраняемый поселок, имеющий ограждение по периметру его территории с охраняемым въездом. На территории общего пользования размещены вторые жилища в виде квартир в домах средней этажности (3–4 этажа) без приусадебных участков. На территории имеются бассейн, теннисные корты, сады, живая изгородь, проезды, стоянки. Архитектурно-планировочная организация застройки решена в виде нерегулярной живописной композиции.

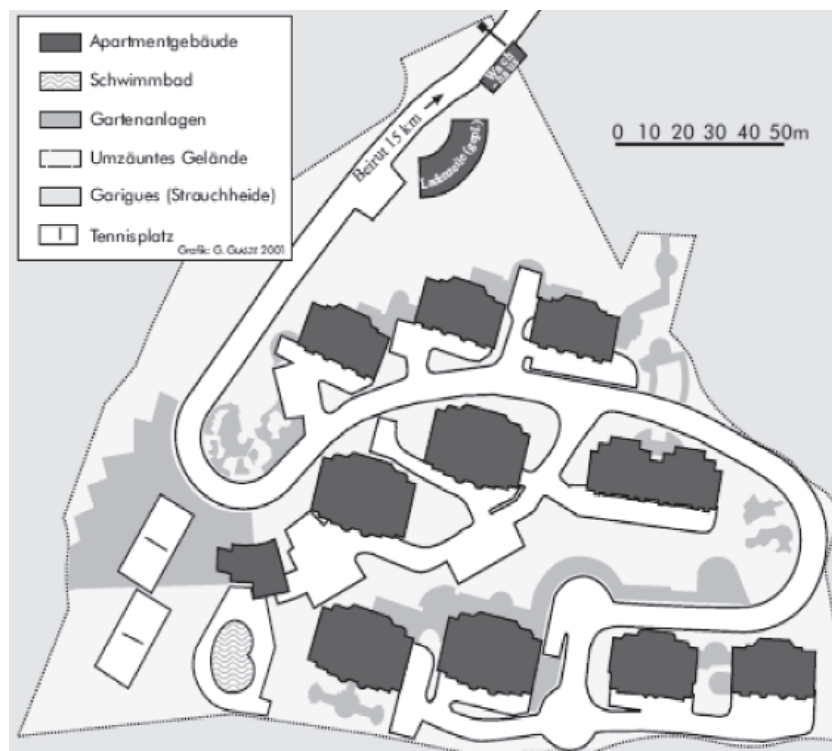


Рис. 4. Поселок вторых жилищ под Бейрутом, Ливан. Источник: [14]

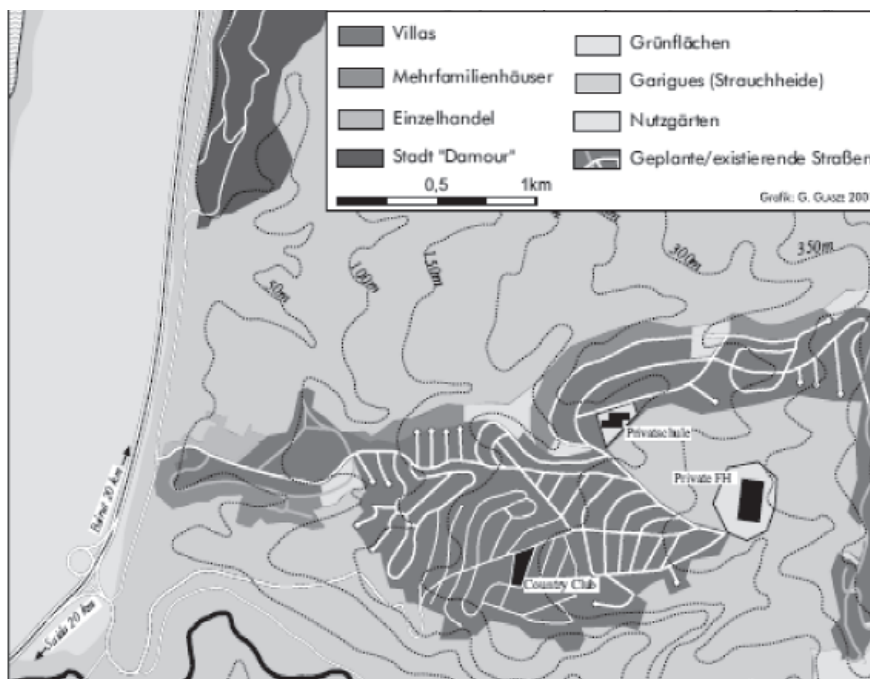


Рис. 5. План функционального зонирования «закрытого города» в Ливане. Источник: [14]

По условным обозначениям на рис. 5 видно, что в рассматриваемом поселке присутствуют как вторые жилища в виде односемейных домов, так и в виде квартир в малоэтажных зданиях. Имеются объекты общественного обслуживания. По отметкам рельефа видно, что территория имеет крутой рельеф: перепад в 50 м на расстоянии 250 м, т.е. уклон составляет 20%. В плане поселок имеет сложную непрямолинейную форму, улицы и дороги направлены в основном вдоль горизонталей рельефа.

По рис. 6 видно, что основная функция поселка – рекреационно-экологическая. При формировании архитектурно-планировочной структуры закрытого поселка особо особое внимание было уделено формированию аттрактивного ландшафта: живописная планировка, нерегулярная сеть улиц, запланированы 35 скверов и 10 искусственных озер, – что не принято для районов обычной коттеджной застройки в сельских и городских поселениях. По периметру поселка имеется ограждение, въезд

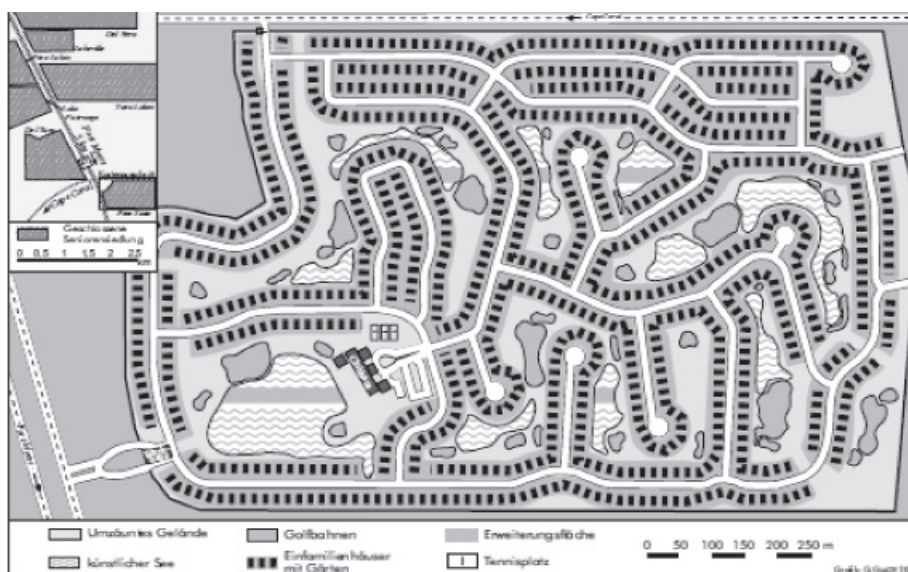


Рис. 6. Охраняемый (закрытый) поселок арендуемых вторых жилищ вблизи Fort Myers, штат Флорида. Источник: [14]

на территорию – по пропускам. Застройка представлена односемейными домами с приусадебными участками площадью каждого до 200 кв. м. Совокупное число коттеджей в поселке составляет 1000 единиц. Здания объединены в отдельные группы, между которыми присутствуют открытые незастроенные озелененные территории. Габаритные размеры территории поселка, определяемые по представленному на рисунке линейному масштабу, составляют 1,35×0,86 км.

Закрытые поселки отражают сегрегацию населения по уровню доходов в силу принадлежности вторых жилищ в таких поселках состоятельным гражданам. В России охраняемые дачные поселки с коттеджной застройкой появились в 90-х годах прошлого века сначала в Подмосковье и в прилегающих к Санкт-Петербургу районах Ленинградской области, и позже, в основном после 2000 года, получили распростране-

ние в пригородных зонах городов-центров регионов по всей территории страны.

Доктор архитектуры С.Б. Поморов выделяет следующие типы «садово-дачной агломерации» (табл. 5) [8].

В монографии С.Б. Поморова отсутствуют определения «садово-дачная агломерация», «агломерация вторых жилищ» и «охраненный пояс города». Предлагаемая ученым классификация имеет значение уже в силу наличия в ней слова «агломерация», подчеркивающего масштабность явления «второе жилище».

Анализ практики развития второго жилища показывает, что появившиеся в России в XX веке, особенно во второй половине XX века, поселки садоводческих товариществ являются аналогами таких поселков как *Kleingartenanlage*, *Schrebergärten* в Германии, *allotment gardens*, *community gardens* в Англии, США, Канаде, Швеции и многих других странах [2; 3] (рис. 7, 8).

Таблица 5

Типы садово-дачной агломерации

Основание выделения типа	Типы агломерации вторых жилищ		
	I	II	III
Расположение относительно города	в границах города	примыкающие к городской черте, формирующие охранный пояс города	удаленные от городской черты, примыкающие к межселенным автомагистралям и железным дорогам

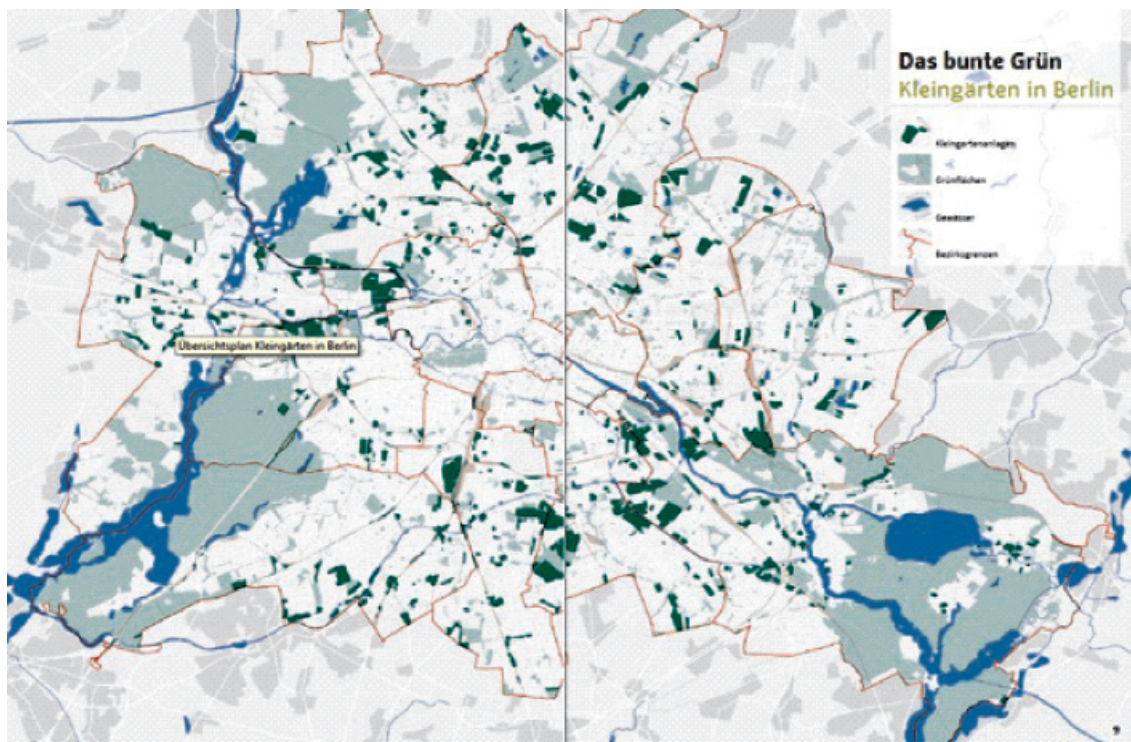


Рис. 7. Схема расположения поселков вторых жилищ типа «Kleingarten» в структуре Берлина (темно-зеленым цветом обозначены поселки вторых жилищ типа «Kleingarten»).

Источник: *Das bunte Grün. Kleingärten in Berlin*. Berlin: Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, 2012, 52 S.



Рис. 8. Садовые участки под Стокгольмом, Швеция. Источник: [17]

Садовые дома с приусадебными участками по своим объемно-планировочным параметрам аналогичны Kleingarten. Аналогия особенно заметна на первоначальном этапе становления садоводческих товариществ в период существования Советского Союза. В обоих случаях имелись законодательно установленные ограничения архитектурно-планировочных параметров. Площадь приусадебного участка кляйнгартена – 300 кв. м, садового участка – 400 кв. м (что, с учетом значительных территориальных ресурсов России, несущественно отличается от верхнего предела площади кляйнгартена).

Ограничивалась общая площадь домика и его высота: в Германии – соответственно 24 кв. м и 5 м, в России – 25 кв. м и 6 м. Содержание правил организации малых садов и садовых участков также аналогичны: предписана одна и та же функция – занятие садоводством и огородничеством; предусмотрено только временное проживание без права регистрации (прописки), запрещено возведение отапливаемых жилых строений; предоставление участков только проживающим в многоквартирных жилых домах; объединение отдельных вторых жилищ в некоммерческие организации и др. [3] (рис. 9, 10).



Рис. 9. Садовые дома в районе Светлополянского лесничества близ села Победа в Пензенской области. Октябрь 2014 г. Фото З.З. Зиятдинов



Рис. 10. Садоводческое товарищество. Источник: [18]

Таблица 6

Типы поселков вторых жилищ по С.В. Уваровой и В.М. Молчанову

Тип	Характеристика
Сельские поселки	исторически первая форма загородного проживания, сохранившаяся до настоящего времени. Объясняется специализацией производства – выделением ремесла и торговли от сельскохозяйственного труда
Вилла	комфортабельный частный дом для одной семьи в парке с декоративным садом, расположенный в привилегированных районах города, пригорода, загорода, в курортной зоне. Это жилище компенсационного типа, появляется двойственность или раздвоенность городского жилища
Дачные поселки	сформировались в эпоху индустриальных технологий. Располагались дачи сразу за городской чертой, на живописном ландшафте, вдоль железнодорожных магистралей. Дачные дома – это загородное жилище, предназначенное для временного проживания городских семей, Дачные поселки – это продолжение двойственности городского жилища, но для среднего класса. В советском варианте – это деятели культуры, т.е. творческая интеллигенция, управленцы, крупные чиновники – нужные государству люди
Садоводческие кооперативы	загородные поселения с усадебной застройкой. Садовые домики – небольшие, одноэтажные жилые дома, которые в основном возводят на малом участке около 0,06 га. Владельцами садовых домиков является основная масса горожан. Используется участок в садоводческом кооперативе для отдыха или для занятий аграрным трудом; Садовые поселки – двойственность городского жилища для трудящихся, для масс, для малоимущих. Транспорт – общественный автомобильный и железнодорожный
Коттеджные поселки	комфортабельные односемейные дома с приусадебными участками 0,2–0,4 га. Развитая инфраструктура. Это тот же дачный поселок, но современный. Владельцы – средний класс: предприниматели, бизнесмены, деятели культуры
Экологические поселения	экодомы, как новейшей формы исхода горожан в природу. Для максимального самовоспроизводства природной среды участки большой величины (1 га). Горожанин по преимуществу бедный. Жилище дает альтернативные формы жизни и архитектуры. В которых человеческий жизнь интегрирован в природную среду, поддерживает здоровое развитие человека и причиняет наименьший вред природе. Отражает неудовлетворенность постиндустриальным городом

В XXI веке вторые жилища, тождественные немецким кляйнгартенам, развиваются в ряде стран Азии, Африки и Латинской Америки в качестве средства решения продовольственной проблемы, что иллюстрирует единство и трансграничность тенденций развития второго жилища.

Исследователи С.В. Уварова и В.М. Молчанов в 2007 году в статье «Современные тенденции формирования загородного жилища» выделяют следующие типы поселков вторых жилищ [11] (табл. 6).

Представленная в таблице 6 классификация в целом верно отражает существующие в настоящее время в нашей стране поселки вторых жилищ. Недостатком является выделение поселков по разным признакам (основаниям). Так, дачные поселки и садо-

водческие кооперативы – это организационно-правовая форма, а виллы – это условное название комфортабельного второго жилища. Экологические поселения – выделены по признаку соответствия требованиям охраны окружающей среды и санитарно-гигиеническим требованиям. Сельские поселки могут представлять собой застроенные виллами экологические поселения. Не учтены распространенные в настоящее время в России такие типы второго жилища, как резиденции и дом-скит.

В настоящее время предлагаются классификации, используемые риэлторами в практике рынка недвижимости (организация сделок по купле-продаже квартир и односемейных домов), представленные в табл. 7, 8 [9; 7; 10].

Таблица 7

Классификация поселков вторых жилищ по типам застройки

Показатели, характеристики	Типы застройки поселков вторых жилищ			
	таунхаусы новых поселках	малоэтажная секционная в существующих и новых поселках	малоэтажная усадебная в существующих поселках	коттеджная застройка в новых поселках
1	2	3	4	5
Период возникновения	с 90-х годов 20 века	до и после 90-х годов 20 века	с 90-х годов 20 века	
Доля в общем количестве вторых жилищ	5	8	24	63
Площадь приусадебного участка, кв. м	≤ 300	≤ 50	500–5000	400–1500
Стоимость 1 кв. м площади жилища, тыс. руб. на 01.01.15	≥ 90	60–80	30–60	100–200

В классификациях риэлторов находят отражение, в первую очередь, вторые жилища тех типов, которые наиболее ликвидны по критериям купли-продажи. Не рассматриваются садоводческие товарищества, дачные поселки – потому что они весьма незначительную долю имеют в структуре продаваемой недвижимости и являются эксклюзивом. Различные типы застройки могут встречаться в одном и том же поселке.

Коттеджная застройка в новых поселках, которая имеет наибольшую долю в ассортименте продаваемой недвижимости, подразделяется на классы или категории (табл. 8). Выполненные риэлторами классификации идентичны, что позволяет свести их в одну таблицу (табл. 8).

Риэлторские классификации предназначены для практических целей совершения сделок купли-продажи вторых жилищ. В них фигурирует показатель «стоимость», в котором находят концентрированное вы-

ражение другие характеристики и современные тренды развития второго жилища.

Из таблицы видно, что выделяются три основных группы коттеджных поселков: эконом (в графе 2), бизнес (графы 3, 4) и премиум (графы 5, 6, 7). Риэлторы отмечают, что данная классификация не претендует на универсальность, и констатируют, что представление коттеджной застройки как второго жилища весьма условно: со временем она может трансформироваться в первое жилище.

Заключение

1. До настоящего времени отсутствует общепринятая градостроительная классификация поселков вторых жилищ, которая необходима для выявления тенденций и специфики экспансии второго жилища на международном уровне. Существующие классификации разработаны по разным основаниям в зависимости от поставленных исследователями целей.

Таблица 8

Классификация поселков вторых жилищ с коттеджной застройкой

Показатели, ха- рактеристики	коттеджная застройка класса						
	эконом эконом +	бизнес	бизнес+	премиум	элит	люкс	эксклюзив
		* * *	****	* * * * *			
	эконом класс	бизнес класс		класс premium		класс de luxe	
	D коттеджная застройка	C бизнес-категория		B высокая категория		A высшая категория	
1	2	3	4	5	6	7	
престижность направления, ка- чество ландшаф- та, экологические условия	различные на- правления	экологически благоприятные районы (в случае Подмосковья – Север, Запад, Юго-запад)		престижные экологически благоприятные районы (в случае Подмосковья – Запад, Рублево-Успенское, Новорижское, Скол- ковское, Ильинское, Минское шоссе). Тер- ритории с такими элементами ландшафта как река, озеро, водохранилище, лес, горы			
удаленность от поселения основ- ного проживания	≥ 30 мин*	≤ 30 мин (для Подмоско- вья – ≤ 90 мин, 60 км от МКАД)		≤ 15 мин (в случае Подмосковья – ≤ 60 мин, в пределах 30 км от МКАД)			
площадь жили- ща // приусадеб- ного участка, кв.м	100–300 // ≤ 1500	≥ 300 // ≥ 1500	≥ 400 // ≥ 3000	≥ 500 // ≥ 50000			
число вторых жилищ	≥ 100			≤ 100		≤ 40	
стоимость жили- ща на 01.01.2015, млн руб. и (тыс. \$)	≤ 5 (≤ \$300)	≤ 7,5 (≤ \$450)	≤ 12,5 (≤ \$800)	≤ 20 (≤ \$1300)		≥ 20 (≥ \$1300)	
наличие и уро- вень внутренней и внешней инфра- структур	электро- снабжение, частично – водо- и га- зоснабжение, отсутствие объектов соц- культбыта	требуемое инже- нерное обеспе- чение, неполный состав объектов соцкультбыта		в структуре поселка – спортивные и раз- влекательные объекты, бассейны, фитнес- центры, пляжи, парки, школы, детские сады. На прилегающей к поселку террито- рии – крупные спортивные и общественно значимые объекты			

Примечания: настоящая таблица составлена нами (З.З. Зиятдинов) по аналитическим материалам риэлторских фирм. Показатели в скобках даны для Москвы и Подмосковья;

*для города с населением 500000 жителей (на примере Пензы).

Исследователи рассматривают вторые жилища, не имея четкого определения предмета изучения: отсутствует однозначное толкование терминов «второе жилище» и «поселок вторых жилищ», которые трактуются по-разному, – что вызывает несоответствие количества типов и оснований в классификациях поселков.

В рассмотренных классификациях находит отражение тенденция увеличения с течением времени видов и форм поселков вторых жилищ: в ранее опубликованных исследованиях представлена менее широкая их типология сравнительно с последующими публикациями.

2. В большинстве классификаций представлены поселки из стационарных типов

второго жилища и не учтены набирающие все большее распространение поселки из мобильных видов жилых ячеек, таких, как автокараваны, дома на воде, дома на передвижных платформах и др. Недостаточно учитывается зарубежный опыт, отсутствует ретроспектива рассмотрения проблемы, не выявлены истоки и тенденции развития изучаемого явления. Классификации без присутствия количественных показателей носят описательный характер и не отражают динамики развития явления «второе жилище». Классификации, в которых не отражены действующие в стране организационно-правовые формы второго жилища, являются оторванными от практики и потому нежизнеспособными и невостребованными.

3. Градостроительная классификация поселков вторых жилищ должна представлять такие характеристики их развития, как:

- абсолютное число и доля различных типов поселков вторых жилищ в общем их количестве и в балансе землепользования как по стране в целом, так и по отдельным регионам;

- объемы инвестиций в строительство поселков вторых жилищ;

- величина поселков вторых жилищ, среднее число участков по каждому типу поселков, потенциал развития и прогноз их распространения в перспективе;

- частота и трудность сообщений между поселками вторых жилищ и местами основного проживания горожан;

- наличие такого вида поселков, как «массивы садоводческих товариществ», которые фактически присутствуют в современной отечественной градостроительной практике, но до настоящего времени изучены в весьма недостаточной мере.

Список литературы

1. Зиятдинов З.З. Анализ классификаций второго жилища // Градостроительство. – 2014. – № 1 (29). – С. 45–51.
2. Зиятдинов З.З. Второе жилище в структуре города [Электронный ресурс] // Архитектон: известия вузов. – 2013. – № 3(43). – Режим доступа: http://archvuz.ru/2013_3/20.
3. Зиятдинов З.З. Градостроительные аспекты развития второго жилища типа «Kleingarten» [Электронный ресурс] // Архитектон: известия вузов. – 2013. – № 4(44). – Режим доступа: http://archvuz.ru/2013_4/24.
4. Зиятдинов З.З. Градостроительные проблемы развития второго жилища // Академический вестник УралНИИ-проект РААСН. – 2014. – № 1. – С. 25–27.
5. Зиятдинов, З.З. Инновации в изучении второго жилища // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2014. – № 4. – С. 14–19.
6. Каганский, В.Л. Незамеченные революции. Дачный бум // Колокол. – 2003. – № 3, 4 (8, 9).
7. Классификация коттеджных поселков Санкт-Петербурга и Ленинградской области. PBL Holding. – СПб., 2007. – 11 с.
8. Поморов С.Б. Второе жилище горожан или дом на природе. Урбоэкологические аспекты городского жилища: научная монография. – Новосибирск: изд-во НГАСХА, 2004. – 472 с.
9. Седых А. Классификация загородной недвижимости Подмосквья [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.rmnt.ru/story/realty/384447.htm>.
10. Таран Н. Важные различия: Дача или постоянный дом [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.poselkispb.ru/stati/mneniya/546> 21.04.2014.
11. Уварова С.В., Молчанов В.М. Современные тенденции формирования загородного жилища. – <http://about-management.ru/sovremennye-tendencii-zagorodnogo-zhilja.php>.
12. Шестопалов С.С. Типологическое разнообразие дачных поселений как фактор формирования пригородной зоны // АМТ. – 2010. – № 3 (12).
13. Conference of European Statisticians. Ownership of second homes in a globalized world. The World Tourism Organization. UN Economic and Social Council. – Distr.: General. February 17, 2010.
14. Glasze G. Geschlossene Wohnkomplexe (gated communities): «Enklaven des Wohlbefindens» in der wirtschaftlichliberalen Stadt. ROGGENHIN, Heike (Hrsg.): Stadt – der Lebensraum der Zukunft? Gegenwärtige raumbezogene Prozesse in Verdichtungsräumen der Erde. / Mainzer Kontaktstudium Geographie, Bd. 7. – Mainz 2001. – P. 39–55.
15. Scherer R. Die Wirtschaftliche Effekte von Zweitwohnungen. Institut für Öffentliche Dienstleistungen und Tourismus. – Bern, 2005. – 23 p.
16. Zweitwohnungen. Planungshilfe für die kantonale Richtplanung. Bundesamt für Raumentwicklung ARE. / Eidg. Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK. – Bern, Juni, 2010.
17. Giardini e orti urbani di Tanto [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.visitsweden.com/svezia/Regioni-e-citta/Stoccolma/Natura-urbana-a-Stoccolma/giardini-e-orti-urbani-di-Tanto>. Дата обращения 30.09.2014.
18. Садоводческое некоммерческое товарищество «№1 ПЭЦЗ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://snt1pecz.ru/> дата обращения 17.06.2016.

УДК 669. 069.036

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТАЛЛА ПРИ РАЗЛИВКИ В КРУПНЫЕ ИЗЛОЖНИЦЫ**Ибраев И.К., Ибраева О.Т.***РГП «Карагандинский государственный индустриальный университет»
Министерства образования, Темиртау, e-mail: ibraevik@yandex.ru*

Приведена математическая модель, описывающая изменение температуры металла в процессе наполнения изложницы, которая позволяет рассчитать предельно-допустимый перегрев и температуру металла в ковше перед разливкой, с учетом планируемой скорости разливки. Предложенная математическая модель достаточно хорошо описывает изменение температуры металла в процессе наполнения изложницы. Промышленные исследования с использованием математической модели позволили выявить влияние на температуру металла при наполнении изложницы таких факторов, как линейной скорости наполнения изложницы, массы слитка, выраженной через отношения периметра к площади боковой поверхности изложницы, продолжительности наполнения изложницы до заданного уровня налива, а также исходного перегрева металла в ковше перед разливкой.

Ключевые слова: дефект слитка и поверхности проката, перегрев, температура разливки, запороченность поверхности, вторичное окисление, температура ликвидус

MATHEMATICAL MODEL OF CHANGE OF TEMPERATURE OF METAL THE CASTING OF THE MOLD IN THE LARGEST**Ibraev I.K., Ibrayeva O.T.***RSE «Karaganda State Industrial University» MES, Temirtau, e-mail: ibraevik@yandex.ru*

A mathematical model over is brought, describing the change of temperature of metal in a process filling of mould that allows to expect a maximum-possible overheat and temperature of metal in a scoop before a teem, taking into account the planned speed of teem. An offer mathematical model well enough describes the change of temperature of metal in the process of filling of mould. Industrial researches with the use of mathematical model allowed to educe influence on the temperature of metal at filling of mould of such.

Keywords: defect of bar and surface of rent, overheat, temperature of teem, запороченность surface, secondary oxidization, a temperature is a liquidus

Около 80 % дефектов поверхности листового проката приходятся на дефекты сталеплавильного производства, а точнее на дефекты, возникающие при разливке и кристаллизации низкоуглеродистой стали в изложнице. Технологический режим разливки стали должен обеспечивать получение слитков стабильного высокого качества – с достаточной толщиной и плотной наружной беспузыристой коркой, хорошим качеством наружной поверхностью слитка, небольшой рослостью, низким содержанием и равномерным распределением неметаллических включений, оптимальной формой и плотной головной поверхности и малой степенью ликвации примесей. Для обеспечения условий получения слитков требуемого качества необходимо исследовать и описать физико-химические процессы возникновения причин и условий, вызывающих образование как внутренних, так и поверхностных дефектов формирующегося слитка и предложить новые технические решения по устранению запороченности слитков низкоуглеродистой стали.

Температура разливки является одной из наиболее важных параметров, влияю-

щих на качество слитков: развитие усадочных пустот и пористости в слитке, развитие процессов кристаллизации и сегрегации, толщину и плотность корочки слитка низкоуглеродистой кипящей стали и запороченности поверхностными и внутренними дефектами.

Целью работы – определить предельно-допустимый уровень температур металла в изложницах, обеспечивающих минимальную запороченность проката поверхностными дефектами и установить оптимальные температурно-временные параметры выпуска, доводки и разливки стали на основе данных о температуре металла в изложнице.

**Экспериментальная часть
(теоретическая часть)**

На процесс образования корочки окисной плены при заполнении изложницы металлом помимо физико-химических процессов (вторичное окисление) большое влияние оказывают теплофизические процессы [1–5]. Образование пленки окислов на поверхности жидкого металла, находящегося в контакте с атмосферой, происходят постоянно,

однако образование дефектов происходит в том случае, когда пленка (корка) находится в твердом состоянии. При анализе механизма образования поверхностных дефектов следует исходить из условия одновременно-го протекания двух следующих процессов: окисления и охлаждения жидкого металла. Большую роль в формировании поверхности слитка играют процессы, протекающие на границе раздела жидкая сталь – атмосфера – изложница, и главным образом условия существования мениска.

Разливка стали сопровождается развитием больших, открытых для взаимодействия с атмосферой, поверхностей металла, что неизбежно приводит к вторичному окислению и охлаждению металла. Изучение гидродинамических характеристик разливки стали и проведенные на их основании расчеты [2, 4] показали, что наиболее благоприятные условия для вторичного окисления и охлаждения металла создаются в процессе подъема металла в изложнице. Несмотря на то, что общая поверхность контакта металла в изложнице меньше поверхности струи почти в 2 раза, продолжительность контакта металла с атмосферой почти в 40 раз больше.

Одновременно с процессами окисления поверхности металла при подъеме его в изложнице с образованием окислов железа, марганца, кремния и алюминия отмечается прогрессивное снижение температуры поверхностных объемов металла. Потери тепла происходят как в результате теплоотдачи к стенкам изложницы, так и в результате и вследствие излучения с поверхности металла в окружающее пространство. На отвод тепла от поверхностных объемов металла влияют множество факторов, основные из которых – площадь поперечного сечения слитка, периметр охлаждаемой поверхности, масса и размеры слитка, скорость и температура разливки стали и коэффициент теплопередачи к стенкам изложницы.

Для устранения образования дефектов на поверхности формирующегося слитка, режим разливки должен быть подобран таким образом, чтобы тепло перегрева стали сохранялось до момента подхода металла до заданного уровня наполнения изложницы.

Как показали результаты исследований, тепло перегрева расходуется на прогрев стенок изложницы и на излучение с открытой поверхности металла по мере подъема его в изложнице. Если тепло перегрева из верхних слоев поднимающегося металла расходуется раньше окончания наполнения изложницы, то на открытой поверхности образуется корка, а на слитке возникают завороты и плены.

Отвод тепла перегрева зависит от многих факторов, основные из них: площадь поперечного сечения изложницы, периметр охлаждающей поверхности, масса и геометрические размеры слитка, скорость и температура разливки.

Для выбора обоснованного температурно-временного режима разливки необходимо проанализировать потери тепла (перегрева) металла в процессе наполнения изложницы.

Рассмотрим тепловой баланс подвижного элемента объема жидкой стали (dh) по высоте слитка. Количество тепла $dQ_{ст}$ отдаваемого элементарным объемом жидкого металла стенкам изложницы за промежуток времени $d\tau$, составит:

$$\begin{aligned} dQ_{ст} &= \alpha \cdot (t_x - t_{кр}) \cdot dF \cdot d\tau = \\ &= \alpha \cdot \Delta t_x \cdot dF \cdot d\tau = \alpha \cdot \Delta t_x \cdot dh \cdot d\tau, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\Delta t_x = t_x - t_{кр}$ – величина перегрева стали над точкой ликвидуса в рассматриваемом сечении слитка, °C; $dF = P \cdot dh$ – площадь боковой поверхности охлаждения выделенного элементарного объема, м²; P – периметр поперечного сечения слитка, по которому происходит теплообмен с изложницей, м

Снижение энтальпии металла за это время будет равно

$$dQ_{ст} = -F \cdot dh \cdot \rho \cdot c \cdot d(\Delta t_x), \quad (2)$$

где $F \cdot dh$ – объем элемента, м³; F – площадь сечения изложницы, м²; ρ – плотность стали, кг/м³; c – удельная теплоемкость стали, ккал/(кг·град).

Приравняв уравнения (1) и (2), получаем дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными.

$$\begin{aligned} \alpha \cdot t_x \cdot P \cdot dh \cdot d\tau &= \\ &= -F \cdot dh \cdot \rho \cdot c \cdot d(\Delta t_x); \end{aligned} \quad (3)$$

$$\int \frac{d(\Delta t_x)}{t_x} = -\frac{\alpha \cdot P}{F \cdot \rho \cdot c} \cdot \int d\tau. \quad (4)$$

Интегрируя полученное равенство и произведя небольшую подстановку имеем

$$\ln \frac{\Delta t_x}{t_x} = -A \cdot \tau + C, \quad (5)$$

где
$$A = \frac{\alpha \cdot P}{F \cdot \rho \cdot c}.$$

Константу интегрирования определяем из начальных условий разливки стали. В момент поступления жидкой стали в изложницу, когда $\tau = 0$, перегрев жидкой стали равен начальному перегреву стали, т.е.

$$\Delta t_x = \Delta t_{раз} = t_{раз} - t_{кр}.$$

Отсюда следует

$$C = \ln t_{\text{раз}}.$$

Подставляя значение константы интегрирования в уравнения (5), получаем зависимость:

$$\ln \frac{\Delta t_x}{\Delta t_{\text{раз}}} = -A \cdot \tau. \quad (6)$$

Связь между величиной оставшегося перегрева в движущемся слое стали и величиной исходного перегрева стали при входе в изложницу может быть установлена путем следующего преобразования:

$$\frac{\Delta t_x}{\Delta t_{\text{раз}}} = e^{-A \cdot \tau} \quad \text{или} \quad \Delta t_x = \frac{\Delta t_{\text{раз}}}{e^{A \cdot \tau}}. \quad (7)$$

Величина Δt_x в последнем уравнении характеризует тот перегрев, который остался в рассматриваемом слое стали при перемещении его, на какое то расстояние от дна изложницы. При этом температура металла в этом слое равна

$$\Delta t_x = t_x - t_{\text{кр}} \quad \text{или} \quad t_x = \frac{\Delta t_x}{e^{A \cdot \tau}} + t_{\text{кр}}. \quad (8)$$

Отсюда, зная остаточный перегрев металла в изложнице по наполнению заданного уровня налива в изложнице можно определить расчетную температуру металла, т.е.:

$$t_x = t_{\text{кр}} + \Delta t_x.$$

Чтобы определить ту величину, на которую остыл подвижный элемент за время перемещения от дна изложницы до заданной высоты, необходимо от величины исходного перегрева $\Delta t_{\text{раз}}$ отнять величину оставшегося перегрева в стали Δt_x , т.е.

$$\Delta t_x = \Delta t_{\text{раз}} - \Delta t_x = \Delta t_{\text{раз}} - \frac{\Delta t_{\text{раз}}}{e^{A \cdot \tau}}. \quad (9)$$

Такое снижение температуры расплава наблюдалось бы в том случае, если от поступающей в изложницу стали отводилось бы тепло только на перегрев стенок изложницы. В реальных условиях разливки значительная часть тепла от жидкой стали расходуется на излучение открытой поверхности металла в изложнице.

Эти потери тепла в окружающую среду подсчитываются:

$$Q_{\text{изл}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot F \cdot d\tau, \quad (10)$$

где ε – коэффициент лучеиспускания открытой поверхности металла в изложнице, равной 0,53; σ – константа излучения абсолютно черного тела, равная $0,082 \cdot 10^{-8}$ ккал/(м²·мин·К); F – площадь от-

крытой поверхности металла в изложнице, м²; $d\tau$ – время перемещения (излучения) от открытой поверхности металла, мин; T – абсолютная температура поверхности металла, К.

Верхние поднимающиеся в изложнице слои стали обычно быстро теряют свое тепло. Температура открытой поверхности металла близка к температуре затвердевания стали.

Если от количества тепла, заключенного в подвижном элементе объема жидкой стали отнять тепло, теряемое на излучение, то оставшееся тепло в том же объеме жидкой стали будет определять величину перегрева, который еще остался в металле

$$\rho \cdot c \cdot \Delta t_x \cdot F \cdot dh - \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \times \\ \times F \cdot d\tau = \rho \cdot c \cdot F \cdot dh \cdot t. \quad (11)$$

Подставляя из уравнения (8) величину перегрева стали Δt_x , который остался в металле после отдачи тепла стенкам изложницы, получаем:

$$\Delta t_x = \frac{\Delta t_{\text{раз}}}{e^{A \cdot \tau}} - \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4}{\rho \cdot c \cdot \frac{1}{dh/d\tau}}.$$

Учитывая, что $dh/d\tau = w$ получаем

$$\Delta t_x = \frac{\Delta t_{\text{раз}}}{e^{A \cdot \tau}} - \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4}{\rho \cdot c \cdot w}, \quad (12)$$

где w – линейная скорость разливки, м/мин.

Тогда текущую температуру металла в конце наполнения изложницы можно определить из следующего выражения:

$$t_{\text{рас}} = \Delta t_x + t_{\text{лик}} = \\ = \frac{\Delta t_{\text{раз}}}{e^{A \cdot \tau}} - \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4}{\rho \cdot c \cdot w} + t_{\text{лик}}, \quad (13)$$

где $\Delta t_{\text{раз}}$ – исходный перегрев металла в ковше перед разливкой и подсчитывается по выражению (14):

$$\Delta t_{\text{раз}} = T_{\text{вып}} - T_{\text{лик}} - \Delta t_{\text{ковш}}, \quad (14)$$

где $\Delta t_{\text{ковш}}$ – потери температуры металла в ковше за время выпуска, обработки металла и выдержки в ковше, вычисляемая по уравнению (15)

$$\Delta t_{\text{ковш}} = T_{\text{вып}} - T_{\text{удм}}; \quad (15)$$

откуда

$$\Delta t_{\text{раз}} = T_{\text{удм}} - T_{\text{лик}}. \quad (16)$$

Приведенная система уравнений (13)–(16) является математической моделью, описывающая изменение температуры металла в процессе наполнения изложницы металлом. Полученная модель позволяет выявить влияние на температуру металла

при наполнении изложницы таких факторов, как линейная скорость наполнения изложницы (w), массы слитка, выраженной через отношение периметра к площади боковой поверхности изложницы (P/S), продолжительности наполнения изложницы до заданного уровня налива (τ), а также исходного перегрева металла в ковше перед разливкой ($\Delta t_{\text{раз}}$).

Используя приведенную модель изменения температуры металла в процессе наполнения изложницы можно определить оптимальный перегрев металла над температурой ликвидус в ковше перед разливкой. Если принять, что перед подходом металла к заданному уровню налива все тепло перегрева израсходовано на прогрев стенок изложницы и на излучение, т.е. когда $\Delta t_x = 0$, то оптимальная величина перегрева стали, обеспечивающего разливку с чистым зеркалом:

$$\Delta t_{\text{исх}} = \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4}{\rho \cdot c \cdot w} \cdot e^{A \cdot \tau}. \quad (17)$$

В качестве абсолютной температуры металла T принимаем температуру ликвидус для данного состава стали.

Аналогичное выражение предельно допустимого исходного перегрева металла в ковше перед разливкой получается из условия равенства текущей температуры металла в конце наполнения изложницы и температуры начала кристаллизации, т.е. $t_x = t_{\text{лик}}$

$$t_{\text{раз}} = \Delta t_x + t_{\text{лик}} = \frac{\Delta t_{\text{раз}}}{e^{A \cdot \tau}} - \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4}{\rho \cdot c \cdot w} + t_{\text{лик}},$$

при $t_{\text{рас}} = t_{\text{лик}}$ получаем

$$\frac{\Delta t_{\text{раз}}}{e^{A \cdot \tau}} - \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4}{\rho \cdot c \cdot w} = 0$$

или

$$\Delta t_{\text{исх}} = \Delta t_{\text{раз}} = \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4}{\rho \cdot c \cdot w} \cdot e^{A \cdot \tau}.$$

Анализ полученного выражения (17) показывает, что допустимый перегрев металла перед поступлением в изложницу определяется условиями разливки стали, т.е. линейной скоростью разливки (w), хим. составом стали ($t_{\text{лик}}$) и параметрами слитка (изложницы) P/S .

Из всех параметров формул (13) и (17) неопределенным остается коэффициент теплоотдачи от металла к поверхности изложницы (α). Для определения неизвестного коэффициента, для условий разливки в крупнотоннажные листовые изложницы сверху, были проведены опытно-промышленные плавки с измерением температуры металла в конце наполнения изложницы.

Среднюю степень перегрева стали над температурой ликвидус рассчитывали по выражению (14). Измерив температуру металла в изложнице после заданного уровня налива из выражения (13) рассчитывали неизвестный коэффициент суммарной теплоотдачи от жидкого металла к стенкам изложницы и в окружающее пространство. Коэффициент α изменялся в пределах 43,0–48,3 ккал/(м²·мин·град). Для дальнейших исследований приняли суммарный коэффициент теплоотдачи $\alpha = 45$ ккал/(м²·мин·град). Остаточный перегрев и расчетную температуру металла в изложнице после заполнения до заданного уровня налива рассчитывали по выражениям (13)–(16).

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ теплотехнических условий формирования слитка, рассмотренные выше показывают, что потери тепла перегрева в процессе наполнения изложницы складываются из потерь тепла на прогрев изложницы (18) и потерь излучением зеркала металла в процессе подъема металла в изложнице (19)

$$\Delta t_{\text{ст}} = \Delta t_{\text{исх}} - \frac{\Delta t_{\text{исх}}}{e^{A \cdot \tau}}; \quad (18)$$

$$\Delta t_{\text{изл}} = \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4}{\rho \cdot c \cdot w}. \quad (19)$$

Анализ потерь тепла перегрева в процессе наполнения изложницы показывает, что основная доля потерь приходится на потери тепла излучением и определяется только линейной скоростью разливки (рис. 1). Так, потери температуры (тепла перегрева) на прогрев изложницы составляют 4–5 °С при разливке через стакан 80/60 мм и 2–3 °С при разливке через стакан диаметром 90/80 мм. В то время, потери тепла перегрева излучением зеркалом металла – 20–25 °С при разливке через стакан диаметром 80/60 мм и 10–15 °С через стакан диаметром 90/80 мм. Столь существенная разница в потерях тепла перегрева при разливке через стакан 80/60 и 90/80 мм объясняются разными скоростями наполнения металлом изложниц.

Результаты опытных плавов с замерами температуры металла в изложнице в трех точках по длине состава (начальных, средних и конечных слитков) указывает на существование температурной неоднородности по длине разливочного состава, составляющее 6–12 °С (рис. 2).

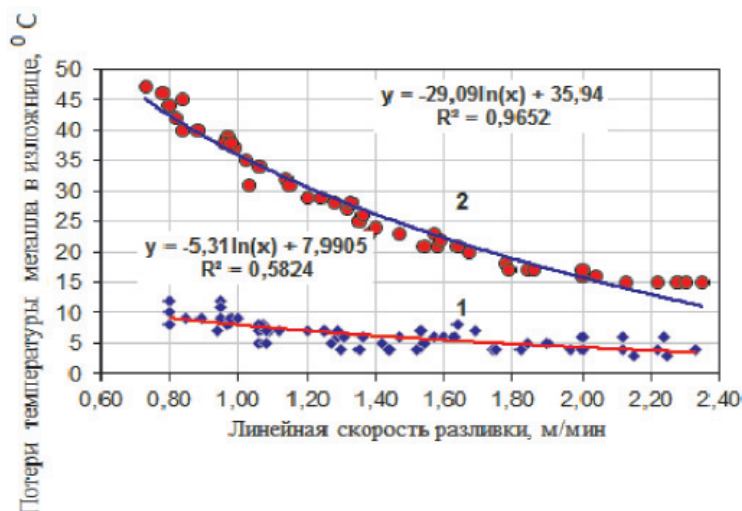


Рис. 1. Влияние скорости разливки на потери температуры металла в процессе наполнения изложницы излучением (1) и на прогрев стенок излучением (2)

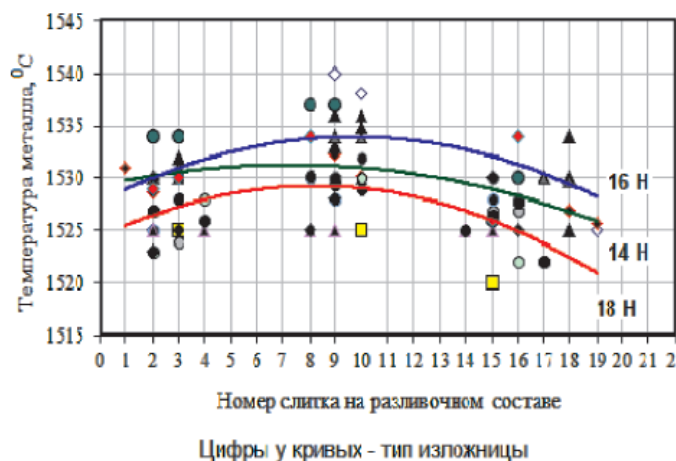


Рис. 2. Характер изменения температуры металла в изложнице в конце ее наполнения по длине разливочного состава

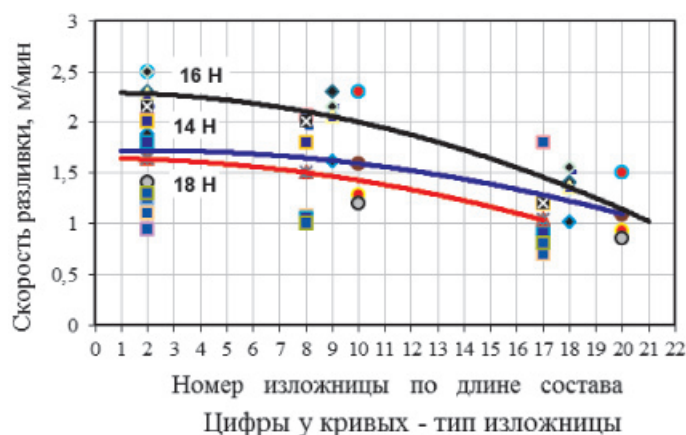


Рис. 3. Характер изменения скорости разливки по длине разливочного состава

Установленный характер снижения температуры металла в изложнице на конечных слитках состава теоретически обосновывает-

ся уменьшением линейной скорости разливки (рис. 3) и увеличением потерь тепла перегрева металла в процессе наполнения изложницы.

Существенные потери тепла перегрева при наполнении изложницы при разливке с пониженными скоростями объясняют и более низкие значения температур металла в изложнице, в особенности, конечных слитков состава, что в принципе объясняет более повышенную заporоченность «пленой» конечных слитков пленой.

Сравнительный анализ расчетного перегрева по уравнению (17) с фактическим перегревом стали в ковше перед разливкой показан на рис. 4.

установить и оптимальную температуру стали в ковше перед разливкой, с учетом планируемой линейной скорости разливки и типоразмера изложницы.

Таким образом, установлено, что на практике при выборе температуры металла в ковше не учитывается линейная скорость разливки.

Исходя из выражения $\Delta t_{\text{исх}} = T_{\text{ковш}} - t_{\text{лик}}$, температура металла в ковше перед разливкой определяется по выражению (20):

$$T_{\text{ковш}} = \Delta t_{\text{исх}} + t_{\text{лик}}. \quad (20)$$

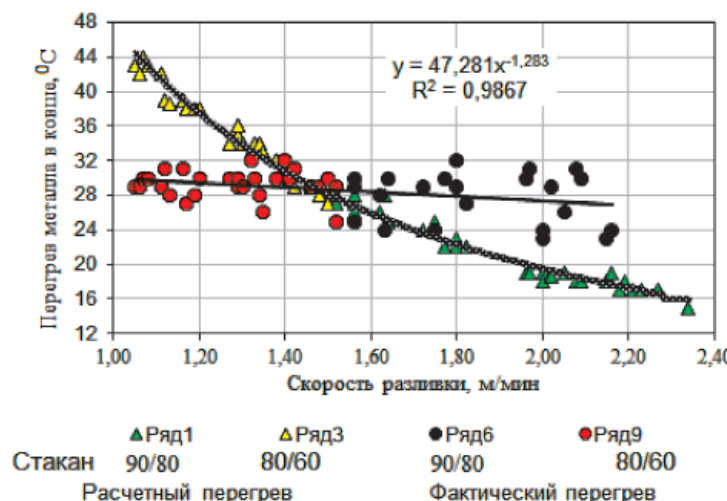


Рис. 4. Взаимосвязь перегрева металла в ковше со скоростью разливки

Из рис. 4 видно, что фактический перегрев характеризуется широким полем разброса и слабой зависимостью от линейной скорости разливки стали. Причем, при разливке стали через стакан – коллектор диаметром 80/60 мм при линейной скорости менее 1,4 м/мин, фактический перегрев находится ниже предельно-допустимого уровня, т.е. в этой области мы, как правило, имеем температуру металла в изложнице менее температуры начала кристаллизации ($t_{\text{лик}}$).

Это подтверждается частотным распределением замеренных температур металла в изложнице, где доля плавов с температурой металла в изложнице менее температуры ликвидус ($t_{\text{изл}} < t_{\text{лик}}$) составляет 47%.

Наоборот, при разливке стали через стакан диаметром 90/80 мм при линейной скорости более 1,7 м/мин, фактический перегрев превышает предельно-допустимый. Здесь, в этой области, как правило, имеем температуру металла в изложнице выше температуры ликвидус.

Это подтверждается частотными распределениями измеренных температур металла в изложнице, где доля таких плавов соответственно составляет 69,61 и 81,11%.

Зная предельно допустимый перегрев металла в ковше перед разливкой можно

Выводы

Таким образом, предложенная математическая модель достаточно хорошо описывает изменение температуры металла в процессе наполнения изложницы. При использовании математической модели можно выявить влияние на температуру металла при наполнении изложницы таких факторов, как линейной скорости наполнения изложницы (w), массы слитка, выраженной через отношения периметра к площади боковой поверхности изложницы (P/S), продолжительности наполнения изложницы до заданного уровня налива (τ), а также исходного перегрева металла в ковше перед разливкой ($\Delta t_{\text{раз}}$).

Список литературы

1. Грузин В.Г. Температурный режим литья стали. – М.: Государственное Научно-техническое издательство по черной и цветной металлургии. – 1962. – С. 155–160.
2. Кочо В.С., Коробко И.М. и др. Непрерывный контроль температуры при разливке стали // Труды I конференции по стальному слитку: Разливка стали и формирование слитка. М.: Металлургия, 1966. – С. 260–268.
3. Миккульник А.В. Непрерывный замер температуры жидкой стали в промежуточных ковшах при разливке стали в вакууме // Труды III конференции по слитку: Проблемы стального слитка. – М.: Металлургия, 1969. – С. 316–317.
4. Козлов Ф.В. Изменение температуры металла при разливке стали // Труды НТО ЧМ. М.: Металлургиздат, 1955. – т. 5.
5. Смирнов А.Н., Неделькович Л. И др. Расчет температуры ликвидус // Сталь. – 1996. – № 3 – С. 15–19.

УДК 681.518

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – НОВАЯ БАЗА ПОСТРОЕНИЯ И РАЗВИТИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

¹Лубенцова Е.В., ²Петраков В.А.¹*Невинномысский технологический институт, Северо-Кавказский федеральный университет, Невинномысск, e-mail: lubenchov@nti.ncstu.ru;*²*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

В работе проведен аналитический обзор научных работ по применению методов нечеткой логики и нейронных сетей для решения задач синтеза интеллектуальных систем управления биотехнологическими объектами. Показано, что биотехнологические объекты относятся к сложным системам. В подтверждение этого приведены виды и источники неопределенности информации, характерной для объектов биотехнологии. Отмечено, что число публикаций, посвященных интеллектуальным системам управления на основе методов нечеткой логики и нейросетевой технологии, огромно и продолжает увеличиваться. Однако, несмотря на большое число работ для различных объектов, их анализ позволяет выявить ограниченное число публикаций, содержащих результаты построения интеллектуальных систем управления биотехнологическими объектами. Приведенными в статье примерами подтверждена эффективность применения интеллектуальных систем управления биотехнологическими объектами управления в условиях существования дефицита априорной информации для их точного математического описания. С учетом этих работ отмечено, что методы нечеткого и нейросетевого управления в настоящее время являются перспективными методами интеллектуальных технологий, позволяющих создавать высококачественные системы управления биотехнологическими объектами в условиях неопределенности.

Ключевые слова: аналитический обзор, нечеткая логика, нейросетевой регулятор, интеллектуальная система, биотехнологический объект управления

INTELLECTUAL TECHNOLOGIES – THE NEW BASE CONSTRUCTION AND SYSTEMS DEVELOPMENT AUTOMATION OF COMPLEX BIOTECHNOLOGICAL PROCESSES

¹Lubentsova E.V., ²Petrakov V.A.¹*Nevinnomyssk institute of technology of the North-Caucasian federal university, Nevinnomyssk, e-mail: lubenchov@nti.ncstu.ru;*²*South Federal University, Rostov-on-Don*

The paper presents an analytical review of scientific works on the application of methods of fuzzy logic and neural networks for solving problems of synthesis of intellectual control systems of biotechnological objects. It is shown that biotechnological objects are complex systems. In confirmation of this shows the types and sources of uncertainty of information is typical of objects of biotechnology. It is noted that the number of publications devoted to intellectual control systems based on the methods of fuzzy logic and neural network technology is enormous and continues to grow. However, despite the large number of works for different objects, their analysis allows us to identify a limited number of publications containing the results of construction of intellectual systems control of biotechnological objects. In article examples confirmed the effectiveness of the intellectual control systems biotechnological objects control in the conditions of deficiency of the deficit a priori information for their exact mathematical description. Taking into account these works it is noted that the methods of fuzzy and neural network control are now promising methods of intellectual technology that allows to create high quality systems control of biotechnological objects in the conditions of uncertainty.

Keywords: analytical review, fuzzy logic, neural network controller, intellectual system, biotechnological control object

Национальной программой развития биотехнологии в Российской Федерации определена важнейшая роль процессов ферментации для решения задач промышленной микробиологии по производству лекарственных препаратов, биологически активных веществ, белково-витаминных концентратов, антибиотиков, бактериальных и вирусных препаратов в промышленности, медицине и сельском хозяйстве. Современные лекарственные средства получают, в основном, в результате микробиологического синтеза, который пред-

ставляет собой сложный многостадийный процесс [1], характеризующийся недостаточной (неполной) наблюдаемостью (невозможностью прямого измерения большинства показателей, непосредственно влияющих на качество продукции, таких как концентрации реагентов, их физико-химические свойства) и управляемостью, нестационарностью и нелинейностью [2]. Высокая стоимость реагентов и оборудования может стать причиной существенных экономических потерь в случае аварий и нештатных ситуаций.

Минэкономразвития России определена важнейшая роль биотехнологических систем, предназначенных для решения задач промышленной микробиологии по производству биологически активных веществ, белково-витаминных концентратов, антибиотиков, бактериальных и вирусных препаратов. В 2009 г. была утверждена «Стратегия развития фармацевтической промышленности Российской Федерации на период до 2020 года» («Фарма-2020»), в 2010 г. – Концепция федеральной целевой программы «Развитие фармацевтической и медицинской промышленности Российской Федерации на период до 2020 года и дальнейшую перспективу». Объем производства биотехнологической продукции в России к 2020 году, согласно разработанной Минэкономразвития программе «БИО-2020», возрастет до 800 миллиардов рублей в сравнении с 24 миллиардами рублей в 2010 год [3].

Несмотря на имеющиеся исследования и разработки, направленные на решение проблемы динамичного развития фармацевтической и медицинской промышленности Российской Федерации, они не достаточно затрагивают вопросы автоматизации и управления биотехнологическими процессами (БТП) и производствами и не носят системного и комплексного характера.

Для отечественных производств, как и для зарубежных многоассортиментных фармацевтических производств, существенной становится проблема управления при переходе на новый вид продукции, который часто сопровождается изменениями технологической схемы и приводит к вынужденным простоям из-за наладки оборудования и настройки систем управления [4]. В связи с этим, актуальной задачей становится разработка системы управления, адаптивной по отношению к различным классам выпускаемых продуктов и производительности. Благодаря оперативной автоматизированной настройке и адаптации такая система позволит существенно сократить экономические потери, связанные с переходом на новый вид продукции.

В деле повышения эффективности намеченных мер, сокращения времени на разработку новых технологий и реализацию промышленного производства важная роль отводится проектированию и развитию САУ и АСУ БТП, позволяющих при оптимальном сочетании традиционных и интеллектуальных методов и алгоритмов управления обеспечить простоту многовариантного решения компоновки алгоритмического обеспечения конкретных АСУ при многообразии биотехнологий в соответствии с поставленными задачами.

Специфика биотехнологических объектов (БТО) характеризуется недостаточной изученностью лежащих в их основе теоретических механизмов, наличием большого числа многоуровневых качественных и количественных факторов, значительной изменчивостью результатов наблюдений, обусловленной действием неуправляемых переменных, нарушением предпосылок стандартных методов статистического анализа, относительно невысокой воспроизводимостью, неоднородностью и ограниченностью данных. Все это обуславливает, во-первых, неэффективность использования традиционных методов синтеза систем на основе математических моделей объектов и, во-вторых, необходимость применения новых подходов для решения задач синтеза управления указанными объектами с учетом их специфики.

Известно [5], что система определяется как сложная, если для построения ее модели недостаточно информации. Процессы живых систем не поддаются формализации, что приводит к необходимости привлечения человека, его способности ориентироваться в слабо структурируемой ситуации и находить решение слабо формализуемых задач в условиях неполного, нечеткого и неточного знания характеристик объекта управления и характеристик внешних и внутренних воздействий, при которых функционирует этот биотехнологический объект.

Основные причины, усложняющие автоматизацию биотехнологических процессов, состоят в отсутствии достаточных знаний о явлениях, связанных с метаболизмом микроорганизмов и синтезом целевых продуктов. На сегодняшний день для решения подобного рода задач управления широко используются интеллектуальные методы. Среди них выделяют следующие типы интеллектуальных систем управления: на основе нечеткой логики (НЛ) и на основе нейросетевых (НС) технологий [6,7]. Системы управления с нечеткими регуляторами хорошо зарекомендовали себя при управлении сложными объектами с параметрами, изменяющимися в широких пределах [8]. Системы с нейросетевыми регуляторами не требуют построения базы правил. Системы управления на основе объединения указанных принципов, т.е. системы с нейро-нечеткими регуляторами, способны во многом удовлетворить современным требованиям проектируемых систем. Кроме того, используя технологию синтеза интеллектуальных алгоритмов управления, возможно провести оптимизацию сложных контуров САУ. При этом существующие теоретические и экспериментальные исследования,

объясняющие отдельные элементы и закономерности функционирования процесса биосинтеза, составляют набор рабочих гипотез процесса, которым может воспользоваться оператор при управлении процессом. Важную роль играют его собственный опыт и интуиция.

Проблема управления сложными процессами ферментации в условиях неопределенности относится к актуальным проблемам современной теории и практики автоматического управления. Во-первых, для такого класса систем типичным становится случай, когда отсутствует точное математическое описание объекта управления, процесс плохо воспроизводится, а изменение его параметров в процессе функционирования происходит неизвестным образом в широких пределах [9]. Во-вторых, вместе с появлением новых биотехнологических процессов и биообъектов возникают более высокие требования к разрабатываемым системам управления, которые ранее невозможно было выполнить. В-третьих, каждый процесс имеет свои особенности, которые, с одной стороны, требуют учитывать при автоматизации, а, с другой стороны, они не в полной мере могут быть учтены существующими системами и подходами к синтезу систем. Хорошо известно, что для синтеза систем управления в условиях неопределенности большими возможностями обладают адаптивные подходы. Однако следует отметить, что основным недостатком теории адаптивных систем является предположение о квазистационарности параметров модели объекта управления и использование контуров настройки параметров. Альтернативным адаптивному управлению являются робастное управление, а также управление на основе нечеткой логики и нейросетевой технологии. По сравнению с адаптивными законами управления здесь есть возможность построить управляющую систему без использования контуров настройки параметров, нет необходимости в математической модели объекта и в предположении о квазистационарности параметров объекта управления. Однако применение этих методов для синтеза систем управления БТО и процессами ферментационной системы исследовано недостаточно.

Следует отметить, что, несмотря на достаточно большое количество решений в области адаптивного и робастного управления, имеется ряд проблем, которые мало изучены для синтеза таких систем для управления процессами ферментации. Это обусловлено тем, что БТО являются нестационарными объектами, имеют запаздывание по состоянию и/или управлению,

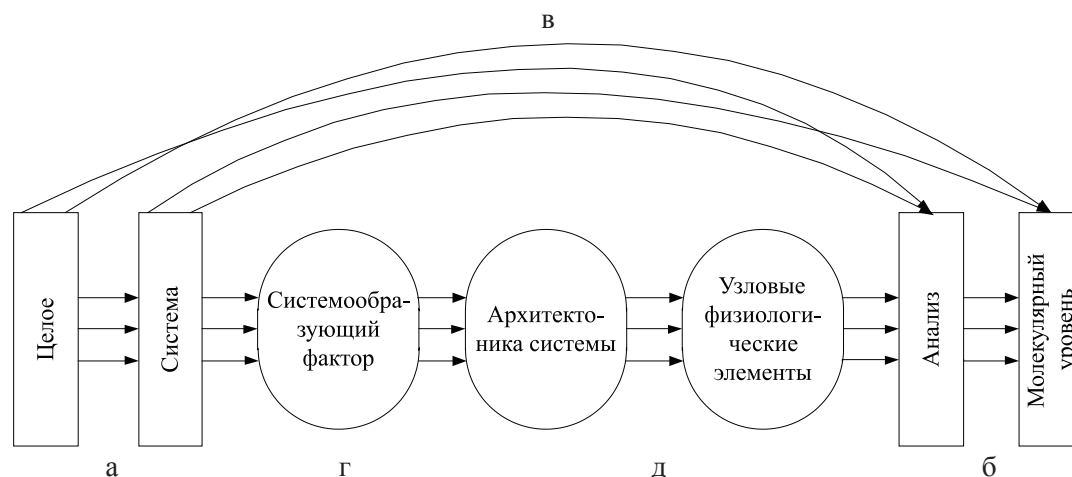
характеризуются некоторыми свойствами нелинейных систем ввиду наличия неконтролируемых возмущений: тепловыделения, потребления кислорода и др. Кроме того, многие существующие способы адаптивного и робастного управления достаточно сложны как в аналитическом расчете системы регулирования, так и в ее технической реализации.

Для повышения конкурентоспособности и снижения импортозависимости по важнейшим традиционным биотехнологическим продуктам – лекарственным препаратам, биологически активным веществам, белково-витаминным концентратам, бактериальным и вирусным препаратам, производимым в Российской Федерации, требуется более широкое использование интеллектуальных технологий при управлении процессами ферментации – одной из основных составляющих производства, как по сложности реализации, так и по влиянию на рентабельность производства [10].

Анализ общесистемных свойств и видов неопределенности информации, характерных для управления процессами ферментации

Современный уровень развития прикладной биотехнологии сопровождается созданием управляемых объектов различного назначения и требует учета факторов неопределенности информации, характерных для процесса управления сложными ферментационными системами. По сути протекающих процессов биореактор относится к биологическим системам. В качестве методологической основы анализа биологической системы и выявления общесистемных свойств и причин возникновения неопределенности информации является системный подход. При системном подходе не выделяется какая-либо отдельная составляющая, а используются принципы организации многих составляющих с непрерывным изучением результата деятельности этой разветвленной гетерогенной системы [11]. Ключевым моментом такого подхода является определение системообразующего фактора [12]. Предложенная в [12] схема демонстрирует непрерывность исследовательского процесса, обеспечивающего непосредственный переход от системного уровня к тонким физиологическим деталям системы до молекулярного уровня включительно (рисунок).

Аналогичный подход применяют при рассмотрении отдельных элементов биотехнологической системы (БТС), определяемых с позиции системного анализа как сложные системы [13]. Так основной технический



Схематическое изображение «концептуального моста» между системным уровнем и аналитическими процессами [12]:

а – уровень целостной системной деятельности; б – уровень тонких аналитических процессов; в – путь обычных корреляционных отношений; г – включение системообразующего фактора, который объясняет процесс упорядочивания между множеством компонентов системы; д – операциональная архитектура системы и ее узловые механизмы

элемент БТС – биореактор анализируют декомпозицией до уровня эффектов взаимодействия отдельных составляющих процесса биосинтеза: кинетической, массообменной, термодинамической, гидродинамической и последующего синтеза управления режимными параметрами с учетом общего критерия эффективности.

Принадлежность живых систем к классу наиболее сложных и динамичных в настоящее время общепризнано. Основными при определении и описании сложных систем, к числу которых относятся биосистемы, служат понятия управления и цели функционирования. Действие регулирующих механизмов в клетке, также как и в технических системах, происходит по принципу обратной связи. Под внутриклеточными управлениями понимаются процессы биохимического, физико-химического и другого характера, приводящие скорости процессов в соответствии с общей целью функционирования клетки. В качестве целевой функции клетки принимают максимизацию удельной скорости роста биомассы [14,15]:

$$\frac{1}{x} \frac{dx}{dt} \rightarrow \frac{\max}{\bar{U}},$$

где x – биомасса; t – время; $\bar{U}$ – вектор внутренних управлений клетки.

Следующей важной целью живого организма является необходимость поддержания постоянства условий (концентраций, состава и др.) внутри организма при изменении окружающей среды. Понятие сбалансированности роста сформулировано для экспоненциальной фазы роста

микроорганизмов, когда ввиду относительного постоянства условий среды не происходит смены факторов, лимитирующих рост. В этой фазе рост осуществляется по экспоненциальному закону и описывается кинетическими зависимостями единственной лимитирующей ферментативной реакций, а состав и количественное соотношение внутриклеточных веществ сохраняют относительное постоянство. Рост при этом описывается уравнением

$$\frac{1}{x} \frac{dx}{dt} = a^T \bar{y} \quad (1)$$

и также сбалансирован. Матрица a^T определяет качественный состав биомассы. Количественное соотношение компонентов биомассы зависит от значений элементов вектора $\bar{y}$ – вектора удельных скоростей образования продуктов реакций. С учетом этого целевую функцию клетки можно записать в виде

$$J = \max \left(\frac{1}{x} \frac{dx}{dt} \right) = a^T \max_{\bar{U}} \{ \bar{y} \},$$

где условие сбалансированности роста выступает как основное ограничение.

Таким образом, можно считать, что в соответствии с широким применением системного подхода к биологическим, биотехническим и микробиологическим системам, результат системной целенаправленной деятельности как решающий самоорганизующий фактор системы может быть рассмотрен в качестве системообразующего фактора, т.е. фактора, который формирует систему, обеспечивает её идентификацию,

функционирование, развитие, целостность, структуру и форму. Трудности в выборе адекватного описания кинетики процесса, которое должно учитывать одновременно протекающие процессы на микроуровне (в клетках), в микробных популяциях и макроуровне (массо- и теплообмен в аппарате, гидродинамическая обстановка и т.п.) характеризуют сложность разработки и использования математических моделей для целей управления.

Динамику биологических процессов можно описывать уравнениями, аналогичными уравнениям химической кинетики. Однако по сравнению с обычной химической кинетикой биологических процессов характеризуется следующими особенностями [14]: в качестве переменных выступают не только концентрации веществ, но и другие величины; переменные изменяются не только во времени, но и в пространстве; биологическая система пространственно гетерогенна и условия взаимодействия реагентов могут быть различны в разных точках системы; существуют специальные механизмы саморегуляции, действующие по принципу обратной связи.

Отмеченные особенности подчеркивают сложный характер функционирования биосистемы и в условиях ее неопределенности. В биологических системах процессы, как правило, существенно нелинейны, так в модели (1), например, правые части уравнений содержат нелинейные члены. В этом случае нахождение точных аналитических решений связано с серьезными математическими трудностями и подчас вообще невозможно. Поэтому основной подход в современной кинетике и математическом моделировании биологических процессов заключается в отказе от нахождения точных аналитических решений дифференциальных уравнений. Упрощение состоит в получении качественных характеристик динамического поведения системы, т.е. в формальном описании переходов между ними с учетом качественной зависимости поведения системы от критических значений параметров и лимитирующих факторов.

Все сложные системы в той или иной степени являются неопределенными. Неопределенности могут быть: экзогенными, определяемыми внешними воздействиями; координатными (не полностью и не точно известен вектор состояния); параметрическими; структурными, связанными с наличием паразитной динамики [16]. Не учитываемые неопределенности ухудшают качество систем управления и могут привести к потере их работоспособности. Поэтому повышение эффективности функциони-

рования современных биотехнологических комплексов приводит к необходимости выявления и учета следующих видов неопределенностей, характерных для процесса управления сложными биосистемами [17]:

1. Низкая точность оперативной информации, получаемой с объектов управления, возникающая ввиду большой погрешности датчиков замера технологических параметров (например, растворенного кислорода и углекислого газа, окислительно-восстановительного потенциала, pH и т.д.), их невысокой надежности, отказов каналов связи, большого запаздывания при получении информации о показателях и параметрах на основе лабораторного анализа периодически отбираемых из биореактора проб, отсутствия возможности замеров параметров во всех точках технологического объекта управления. Наличие такого вида неопределенности вызывает неточность в задании переменных величин в моделях, начальных и граничных условий.

2. Неточность моделей объектов управления, вызванная некорректно проведенной декомпозицией общей задачи управления, излишней идеализацией модели сложного процесса, разрыва существенных связей в технологическом комплексе, линеаризации, дискретизации, замены фактических характеристик оборудования паспортными, нарушения допущений, принятых при выводе уравнений (стационарности, изотермичности, однородности и т.д.).

3. Нечеткость в процессе принятия управленческих решений в системах, обусловленная тем, что процедура принятия решения базируется на неполной информации, включая качественную.

4. Неточность моделей, вызванная высокой вариабельностью показателей и параметров исходной среды, поступающей в биореактор, культуральной жидкости в биореакторе в различные моменты функционирования биотехнологического объекта управления. Известно [18, 19], что в сложных биотехнологических системах медицинской и микробиологической промышленности вариабельность параметров и биохимических показателей сырья составляет, например, на входе в биореактор объемом 50 м³ от 3,1 до 11,1 % для биосинтеза пенициллина, от 3,7 до 14,5 % для биосинтеза энтобактрина, от 11,8 до 27,2 % для биосинтеза лизина в промышленном биореакторе объемом 100 м³. Крайне вариабельно также соотношение элементов в клетках [20].

5. Особенности решения задач в реальном масштабе времени приводят к тому, что недостаток вычислительных возможностей

и статистических методов решения (несоответствие вычислительных ресурсов и методов сложности решаемой задачи) эквивалентен, в некотором смысле, недостатку информации об условиях задачи.

6. Неопределенность проявляется при агрегации правил и моделей, исходящих от разных источников знаний или от диспетчеров различных уровней управления (эти правила и модели могут быть противоречивыми, избыточными и т.п.). Ошибки расчета в основном складывается из ошибки исходных данных, ошибки модели и ошибки метода решения (численного метода). Так, например, в сложных системах энергетики соотношение между составляющими ошибки для установившихся режимов составляют из-за неточности исходных данных – 82–84%, из-за неточности модели – 14–15%, из-за неточности метода – 2–3 % [21]. Ввиду такой большой доли погрешности исходных данных, возникает и погрешность в расчете целевой функции, что приводит к значительной неопределенности при выборе оптимального режима работы системы.

При наличии границ неопределенностей параметров используют эту информацию с применением в САУ регуляторов, связанных с интервальной моделью. При отсутствии данных об этих границах применяют регуляторы, синтезированные методом гарантирующего управления, либо робастные и адаптивные регуляторы. Адаптивные алгоритмы могут быть намного сложнее алгоритмов робастного управления и поэтому робастный подход к синтезу систем управления объектами с неопределенностью следует рассматривать в качестве альтернативного адаптивному. Методы робастного управления изучались во многих работах. Самые общие результаты в этой области, как отмечается в [22], получены для стационарных систем, оптимизируемых на бесконечном интервале. Однако распространенная на практике задача робастного управления динамическими биосистемами с параметрической неопределенностью не исследована достаточно полно.

Отмеченные выше особенности свидетельствуют о том, что для повышения требований к качеству работы биообъектов, а именно, его устойчивости, надежности, расширения его функциональных возможностей необходим поиск принципиально новых путей совершенствования процесса управления, учитывающих неопределенный, нечеткий характер БТО и сложные взаимосвязи в процессе их функционирования. Необходимость управления системой в этих условиях затрудняет использование стандартных принципов управления.

Особенно сложным является получение моделей, адекватных объекту при смене режимов работы технологического оборудования, так как задание жестких (четких) ограничений для систем управления приводят к невозможности оптимизации этих систем. Одной из основных проблем на сегодняшний день остается построение динамических моделей физико-химических процессов, отличительной особенностью которых является отсутствие полной и подробной информации о всех взаимодействиях отдельных составляющих (кинетической, массообменной, термодинамической, гидродинамической) процесса биосинтеза. Эти особенности биотехнологических систем приводят к априорной неопределенности и нечеткости моделей процессов. При этом главными источниками проявления неопределенности в задачах управления биотехнологическими объектами являются следующие основные факторы:

- сложность формализованного описания биотехнологического объекта и задач управления;
- нестационарность параметров биотехнологического объекта;
- невысокая воспроизводимость процесса ферментации, обусловленная наличием неизученных характеристик посевного материала, питательной среды и самого процесса;
- априорная неопределенность обстановки и условий функционирования процесса ферментации и системы управления.

Высокий уровень сложности задачи управления приводит к необходимости качественного анализа поведения биопроцессов и обуславливает использование при построении систем управления приближенных моделей.

Анализ особенностей технологических процессов стадии ферментации как объектов управления

Центральная стадия биофармацевтического и микробиологического производства – ферментация. Под ферментацией понимают процесс, в котором целевой продукт получается как результат жизнедеятельности микроорганизмов, выращиваемых в специальных условиях. Такими продуктами могут быть как простые дрожжи, так и сложные соединения, включая протеины, антибиотики, ферменты или материалы для генной инженерии. В основе процесса ферментации лежит культивирование продуцентов, т.е. выращивание культуры микроорганизмов, клеток высших растений или плесневых грибов. Культура микроорганизмов – это популяция микроорганизмов, выращиваемая в питательной

среде и находящаяся в стадии размножения или закончившая его.

Поскольку в промышленной биотехнологии выделяют два типа процессов ферментации – накопление биомассы и накопление целевых веществ, синтезируемых в ходе роста и последующего развития культуры, то меняется и характер функционирования производства во времени. Биомасса одноклеточных выращивается непрерывным способом в аппаратах хемотатного типа, а все процессы второй группы осуществляются периодически, когда в одном и том же аппарате в производственном цикле протекают все необходимые фазы развития клеток и биосинтеза [23]. При непрерывном культивировании нет смены фаз развития культуры, как при периодическом культивировании, и процесс постоянно протекает в экспоненциальной фазе. Учет дифференциации режимов культивирования по фазам при управлении непрерывным процессом не требуется.

Питательная среда перед подачей в ферментатор должна быть стерильной. На этом этапе подготовки субстрата необходимо решить две задачи: полностью уничтожить всю контаминантную микрофлору, которая содержится в необходимом для культивирования объеме жидкости, и сохранить биологическую полноценность питательной среды. Термический метод чаще всего применяется для стерилизации питательных сред и оборудования.

Процессы непрерывной стерилизации питательных сред и ферментации являются сложными технологическими объектами управления и имеют ряд отличительных особенностей, которые необходимо учитывать при решении задач управления. Отметим некоторые из них.

1. Наличие большого числа неконтролируемых возмущений (возмущений), часть из которых генерируется в ходе протекания самих процессов ферментации (например, тепловыделение, потребление кислорода, изменение гидродинамической обстановки в аппарате и т.п.), влияющих на выходные (или косвенные) переменные.

2. Сложный характер зависимостей между входными и выходными переменными. Как правило, для большинства процессов ферментации отсутствует полное априорное математическое описание, что существенно усложняет управление процессом. Так как применение нелинейных моделей в системах управления ограничено, то обычно осуществляют разбиение всего процесса на ряд линейных и квазистационарных участков, для которых строят линейные математические модели. Такой

подход при решении задач стабилизации режимных параметров процессов ферментации в ряде случаев дает удовлетворительные практические результаты.

3. Существенное изменение во времени статических и динамических характеристик. В этих условиях для повышения качества управления процессом использование классических регуляторов (т.е. регуляторов с постоянными коэффициентами) малоэффективно. Это является одной из причин построения адаптивных либо эквивалентных им систем для управления существенно нестационарными объектами стадии ферментации.

4. Большая инерционность процессов ферментации и запаздывание в каналах управления. Это приводит к тому, что выходные переменные в данный момент зависят не только от настоящих, но и от предыдущих значений входных воздействий. Основное требование к алгоритмам управления, применяемым для управления динамическими объектами, заключается в том, что при приложении данного управляющего воздействия выходная переменная должна изменяться быстрее, чем она изменялась бы при действии возмущения. Именно запаздывание в каналах управления и наличие возмущающих воздействий на входе объектов обуславливает применение для управления процессами ферментации каскадных САУ.

6. Ограниченное число паростерилизуемых датчиков и измерительных устройств. Это связано как с необходимостью соблюдения условий стерильности, недостаточной изученностью процессов, протекающих в аппаратах стадии, так и с невозможностью теоретически измерить данную переменную, потому что она не имеет физического смысла. Особенно актуальна эта задача при измерении температуры среды на выходе выдерживателя УНС и при разработке систем управления технологическими объектами с применением динамических моделей в пространстве состояний.

Принимая во внимание перечисленные особенности, решение задач синтеза и анализа САУ процессами стерилизации и ферментации продолжает оставаться актуальной и занимает значительное место при разработке прикладного математического обеспечения АСУ ТП. Использование в реальных системах слишком сложных математических моделей лишает их гибкости и универсальности, затрудняет их применение, требует применения быстродействующих вычислительных средств. Для построения детерминированных моделей биотехнологических процессов можно

применять законы термодинамики, тепло- и массопереноса, кинетики [9]. Ввиду сложности и многообразия процессов, протекающих в биотехнологических комплексах, а также в связи с большим числом составляющих их элементов методы построения моделей на основе физико-химических закономерностей процессов часто оказываются малоэффективными.

В связи с применением вычислительной техники в контурах управления широкое распространение получило представление объектов в пространстве состояний. Но такое представление биотехнологических процессов требует разработки методов оценки переменных состояния, так как не все компоненты вектора можно измерить, а некоторые из них не имеют физического смысла. Это является недостатком моделей в пространстве состояний.

До настоящего времени в прикладной биотехнологии наибольшее применение нашли методы и алгоритмы управления, основанные на строгой формализации проблемы и наличии количественных оценок по определяющим параметрам [24]. Однако эти методы неприменимы для управления нестационарными БТО и решения задач принятия решений при выборе алгоритмического обеспечения систем управления, строгая формализация функционирования которых с помощью числовых моделей невозможна. Характерной особенностью решения подобных задач является большой удельный вес качественной информации и связанная с этим информационная неопределенность и противоречивость суждений экспертов, принимающих управленческие решения, что позволяет выделить объекты прикладной биотехнологии в класс нечетких систем. Основой построения систем управления подобными объектами и методики поддержки принятия решений является теория нечетких систем и аппарат нечеткой логики. Процесс принятия управленческих решений в условиях функционирования нечетких систем основан на анализе текущей информации, оценки альтернатив и выбора рационального варианта управления с учетом неполной, а иногда противоречивой информации.

В работе [25] показана необходимость учета информационной неопределенности при моделировании технологических процессов при брожении полуфабрикатов хлебопекарного производства. Для решения этой задачи в первом приближении предложены математические модели процессов (коллоидных, биохимических и микробиологических), протекающих при брожении.

Возрастающие требования к управлению процессами ферментации, требуют учета существенной нестационарности, нелинейности, невысокой воспроизводимости процессов ферментации биотехнологических производств и способствуют проявлению их сложного характера и отнесению их к сложным системам, ограничивают применение классических методов управления особенно в тех случаях, когда решение должно быть получено в условиях неполноты информации о динамике объекта и действующих на него возмущениях. Ремиконты и микро-ЭВМ позволяют реализовывать более сложные алгоритмы управления и законы регулирования по отношению к традиционным регуляторам. Однако, примеров практического применения интеллектуальных методов и алгоритмов для реализации эффективных систем управления БТО невелико. Алгоритмическое обеспечение систем на нижнем иерархическом уровне АСУТП ферментации, создаваемых на базе нечетких регуляторов и нейросетевых технологий, представляет собой наименее проработанную часть АСУТП. Это обстоятельство во многом обусловлено тем, что применение интеллектуальных методов для синтеза систем управления промышленными БТО до настоящего времени не исследовано.

Таким образом, в настоящее время проблеме синтеза систем управления биотехнологическими объектами по измерениям выходной переменной посвящено большое количество статей и диссертаций. Во многом это объясняется тем, что в этом случае пропадает необходимость использования большого количества датчиков, которые измеряют вектор состояния проектируемой системы и вносят дополнительные погрешности, связанные с ошибками измерений и дополнительными возмущениями (шумы измерений). При проектировании системы управления БТО в ряде случаев невозможно установить датчики (особенно паростерилизуемые), позволяющие измерить ряд переменных состояния системы, либо производные выходной переменной. Несмотря на то, что методы адаптивного управления параметрически неопределенными системами достаточно развиты, следует отметить, что предлагаемые схемы адаптивного управления зачастую обладают высокой размерностью, а также используют сложный математический аппарат, что усложняет их инженерное использование. В связи с этим, проблема синтеза систем управления, обладающих простой структурой и малой размерностью, способных функционировать в условиях неопределенности математического описания объекта управления,

остается открытой. Известны многочисленные примеры решения задач синтеза систем сложными технологическими и техническими объектами на основе применения методов нечеткой логики и нейронных сетей.

В связи с этим возникает необходимость обобщить и систематизировать возможности названного класса систем, особенности их построения и функционирования для управления биотехнологическими объектами, которые относятся к сложным системам. Учитывая сложный характер затронутой проблемы и разнообразие имеющихся на сегодня подходов к ее решению, ограничимся рассмотрением лишь одного из возможных подходов (направлений), которое считается многообещающим с точки зрения создания высокоэффективных САУ нового поколения – это методы управления сложными объектами в условиях неопределенности с использованием алгоритмов нечеткой логики и нейросетевой технологии. Под неопределенностью в данном случае понимается неопределенность, обусловленная как недостатком информации, необходимой для получения количественного описания протекающих в системе процессов, так и сложностью объекта управления. Обоснованием выбора данного круга рассматриваемых алгоритмов явились: наглядность и вместе с тем нетрадиционность, нешаблонность постановки задачи управления; корректность и доступность применяемого математического аппарата; понятная интерпретация и достаточная простота реализации полученных результатов.

Анализ методов и алгоритмов решения задач синтеза систем управления процессами ферментации на основе нечеткой логики

Нечёткое управление (Fuzzy Control, Fuzzy-управление) является одной из перспективных интеллектуальных технологий, позволяющих создавать высококачественные системы управления [26]. Под нечёткими САУ понимаются системы управления, содержащие структурно блоки нечёткого логического вывода. Указанные блоки представляют собой нелинейные звенья, операторы которых определяются базой знаний, состоящих из нечётких продукционных правил, и используемым алгоритмом нечёткого логического вывода. К достоинствам таких систем можно отнести: возможность использования для сложных процессов, когда нет простой математической модели; экспертные знания об объекте управления или процессе можно сформулировать в словесной форме; простота структуры; свойство робастности или адаптивности.

Эффективность систем нечеткой логики базируется на следующих результатах [27]:

1. В 1992 г. Ванг (Wang) доказал теорему: для каждой вещественной непрерывной функции $G(x)$, заданной на компакте U и для произвольного $\varepsilon > 0$, существует нечеткая экспертная система, формирующая выходную функцию $F(x)$ такую, что

$$\sup_{x \in U} \|F(x) - G(x)\| \leq \varepsilon,$$

где $\|\cdot\|$ – символ нормы. Иными словами, для каждой вещественной непрерывной функции $G(x)$ можно построить нечеткий аппроксиматор с заданной ошибкой аппроксимации.

2. Согласно теореме FAT (Fuzzy Approximation Theorem), доказанной Б. Коско (B. Kosco) в 1993 г., любая математическая система может быть аппроксимирована системой, основанной на нечеткой логике.

Системы с нечеткой логикой целесообразно применять для сложных процессов, каковыми являются процессы ферментации, не допускающих построение «обычных» прогностических динамических моделей, а также в тех случаях, когда экспертные знания об объекте или о процессе можно формализовать. Именно такие применения особенно актуальны для биомедицинских информационных систем.

Для стабилизации температуры в ферментаторе в [28] рассмотрено применение нечеткого регулятора, формирующего сигнал на изменение расхода охлаждающей жидкости на основе пяти нечетких правил вида «если..., то...» и сделан вывод о том, что нечеткий логический регулятор действует лучше, чем классический ПИД-регулятор. Однако сделанный вывод не подкреплен экспериментальными данными промышленного процесса и качественными оценками и поэтому не является корректным.

Функциональная структура системы управления биотехнологической системой с использованием сформированной нечеткой модели процесса, учитывающей качественные параметры, определяемые по лабораторным анализам, предложена в работе [29].

В [30] предлагается нечеткая система управления, оперирующая при стабилизации температурного режима ферментатора такой оценкой тепловыделения как концентрация микроорганизмов в единице питательного раствора N . Для нечеткой системы управления, по мнению авторов, достаточно будет интерпретировать концентрацию микроорганизмов N в понятиях «малая», «средняя», «большая», что вполне возможно даже при достаточно низкой точности

измерения N . Однако однозначной зависимости между концентрацией N и тепловыделением процесса ферментации не существует, что делает предлагаемую оценку весьма приближенной.

Часто стандартное ферментационное оборудование не обеспечивает технические возможности для надлежащего управления технологическим процессом. Исключение составляет интеллектуальный контроллер ферментации с широким сенсорным экраном, используемый в Южно-Корейском лабораторном оборудовании Liflus GX I [31]. Однако регулирование температуры, pH, pO_2 осуществляется традиционными ПИД-контроллерами.

Отмечено [32], что нечеткие регуляторы в системах управления биотехнологическими процессами позволяют уменьшить ошибки в переходных и установившихся режимах и реализовать более высокие требования процесса за счет управления. Кроме того, используя методы синтеза нечетких алгоритмов управления, можно выполнить оптимизацию сложных контуров регулирования без проведения всесторонних математических исследований [33].

В работе [34] сравнивается качество регулирования температуры в емкости с линейным и нечетким пропорционально-интегрально-дифференциальным (ПИД) регуляторами и отмечается, что в ряде случаев применение нечеткого ПИД-регулятора может оказаться более целесообразным, чем линейного ПИД-регулятора.

Нечеткая система управления формирует либо управляющие сигналы, либо сигналы с нечеткой системы управляют параметрами классических регуляторов САУ. В работе [35] построены двухуровневые нечетко-логические системы автоматического управления. На нижнем уровне таких САУ используются традиционные ПИД-регуляторы, а на верхнем – нечеткие системы, названные супервизорами, корректирующие параметры регуляторов нижнего уровня в зависимости от процессов, протекающих в системе, придавая ей свойства адаптивности или робастности. В основу функционирования нечеткого супервизорного регулятора положен алгоритм нечеткого логического вывода Сугэно нулевого порядка.

В работах [36, 37] показано, что простая замена классического ПИД-регулятора на нечеткий регулятор не решает задачу построения регулятора с простым механизмом подстройки, что связано с достаточно трудоёмким процессом периодической подстройки нечеткого регулятора (изменение количества правил-термов, весов этих правил и т.д.).

В работе [38] предложен нечеткий регулятор с тремя входами, включенный на параллельную коррекцию параметра И-регулятора при возникновении контролируемых и неконтролируемых возмущений.

Выбору оптимальных алгоритмов систем регулирования в условиях нечеткой информации посвящена работа [39], в которой разработан фаззи-алгоритм типа Такаги-Сугено, гарантирующий определенный запас устойчивости для всех вероятных моделей объекта.

Используемые нечеткие системы различаются формой функции принадлежности выходных переменных (линейная, колоколообразная, треугольная, трапециевидная, двухсторонняя кривая Гаусса и др.). Выбор функций принадлежности лингвистических переменных и формирование базы правил в большинстве работ производится методом проб и ошибок, что занимает достаточно много времени и не всегда эффективно. В [40] проведено исследование влияния базы правил нечеткого регулятора на вид переходного процесса в замкнутой системе управления. По результатам исследования осуществляется выбор той или иной функции принадлежности, исходя из заданного запаса устойчивости системы.

Известно, что большое количество нечетких правил может вызывать «паралич» сигнала управления. Поэтому в [41] предлагается осуществлять декомпозицию сложной базы на относительно простые составляющие, а затем преобразовывать их сигналы в общий сигнал управления. Однако в условиях неопределенности трудно оценить минимальную структуру базы и получить правило согласования сигналов управления для выработки общего сигнала управления, т.е. свойство универсальности данной методики не очевидно. Это означает, что определенная база правил для одного объекта не является рациональной для объектов, которые имеют подобные характеристики.

В тех случаях, когда информация о системе, ее параметрах, а также входах и выходах и состояниях системы является неполной либо слабоформализуемой, исходный набор нечетких правил, формируемый экспертом, может оказаться неполным или противоречивым. Поэтому в силу этих причин в работе [42] предлагается при использовании классического пропорционального П-регулятора во внутреннем контуре применить нечеткую логику для подстройки коэффициентов регулятора внешнего контура, что обеспечивает «живучесть» системы при указанном недостатке нечетких регуляторов.

Результаты решения задачи построения нечеткого регулятора потока субстрата в биореактор с использованием ANFIS и системы нечеткого вывода Сугено нулевого порядка позволяют отметить, что наиболее эффективным при синтезе нечеткого регулятора потока субстрата является использование гауссовских функций принадлежности при трех правилах разложения по каждому входу [43, 44]. При высоких скоростях разбавления, обуславливающих быстрое и резкое изменение концентрации биомассы, в качестве входной лингвистической переменной нечеткого регулятора целесообразно дополнительно использовать концентрацию биомассы в аппарате, что способствует улучшению характеристик нечеткого регулятора. Такой подход позволяет автоматически настраивать регуляторы потоков и формировать управляющие воздействия в зависимости концентрации лимитирующего субстрата, концентрации биомассы и уровня в ферментаторе, обобщая информацию о скорости роста микроорганизмов.

В работе [45] реализован подход к синтезу системы управления БТО, основанный на использовании нечеткой логики для параметрической коррекции настройки регулятора системы с аппроксимирующей нелинейной функцией управления (АНФ-регулятора). Кроме того, при стабилизации статического объекта дополнительно использован интегратор с переменным коэффициентом интегрирования, что обеспечивает повышение точности [46]. Весьма существенной особенностью комбинированного применения нечеткого регулятора и интегратора является то, что для реализации астатических свойств системы достаточно скорректировать настройку интегратора, а структуру нечеткого АНФ-регулятора оставить без изменения. Нечеткий АНФ-регулятор имеет следующие преимущества: достаточным является настройка только одного параметра; нет необходимости в точном определении параметров объекта управления; не требуется расширение базы правил для получения качественных переходных процессов в системе стабилизации и в программной системе управления.

Дополнительная возможность повышения эффективности нечеткого управления за счет использования двух фаззи-блоков с различным количеством термов, последовательно реализуемых в зависимости от состояния переходного процесса в системе, показана в работах [47, 48]. Причем в первом фаззи-блоке размещено меньшее количество продукционных правил, отработка которых занимает меньше времени, чем во втором фаззи-блоке, который срабатывает только после оценки состояния переходного процесса

и необходимости его улучшения. В результате исследования переходных процессов по каналу управления «расход хладагента – температура в ферментаторе» установлено, что подбором условий переключения баз правил можно получить монотонные переходные процессы и процессы без существенного перерегулирования с приемлемым временем регулирования. Следует отметить, что в классических нечетких регуляторах такая возможность отсутствует.

В развитых странах мира интенсивно ведутся работы по практическому внедрению нечетких контроллеров и регуляторов, по созданию интеллектуальных систем управления на их основе, экспертных систем с нечеткой логикой в промышленную и непромышленную сферу. К настоящему времени известно более 400 практических применений нечетких контроллеров и систем управления. По мнению экспертов, в ближайшие годы около 70% всех разработок по интеллектуальным системам будут основываться на нечеткой логике [49].

В заключение процитируем слова основоположника и пропагандиста теории нечетких множеств профессора Л.А. Заде [50]: «В последующие годы нечеткие алгоритмы и стратегии управления будут завоевывать, хотя, возможно, и против желания, все большее признание. Они должны быть приняты и должны приобрести некоторую респектабельность, так как обычные «четкие» алгоритмы не могут в общем случае справиться со сложностью и плохой определенностью больших систем. Для того чтобы создать благоприятную среду для развития нечетких алгоритмов, теория управления должна меньше значения придавать математической строгости и точности и больше заботиться о развитии качественных и приближенных решений насущных проблем реального мира. Такая теория может оказаться гораздо богаче и увлекательнее, чем теория управления в настоящее время».

Анализ нечетких регуляторов и принципов их построения применительно к задачам управления процессами ферментации выявил следующее:

- применение нечетких регуляторов позволяет использовать для управления технологическими процессами информацию качественного характера, которую невозможно формализовать при реализации традиционных законов регулирования параметров процесса роста микроорганизмов и биосинтеза;
- нечеткий регулятор оказывается малочувствительным к возмущениям в достаточно широком диапазоне и демонстрирует лучшие характеристики по сравнению с классическими и регуляторами;

– для составления базы правил нечеткого регулятора требуется экспертная информация и хорошее знание влияния параметров и структуры управляющих устройств для управления нестационарными объектами с запаздыванием, вследствие чего в литературе практически отсутствуют методики для непосредственного синтеза нечетких регуляторов;

– существующие нечеткие регуляторы настраиваются на логику пользователя при помощи изменения функций принадлежности, причем выбор функций принадлежности является нетривиальной процедурой;

– не определена возможность и не существует однозначных рекомендаций по выбору нечетких регуляторов для внутреннего и внешнего контуров каскадных САУ процессом ферментации и в совместном их использовании с традиционными регуляторами при построении таких САУ.

Для решения задачи синтеза управления методами нечеткой логики необходимо знать правила, по которым из входных данных можно получить выходные (найти решение задачи). С помощью технологии нейронных сетей можно найти решение, не зная правил, а имея несколько примеров. Рассмотрим методы и алгоритмы решения задач синтеза систем управления на основе нейросетевых технологий.

Анализ методов и алгоритмов решения задач синтеза систем управления процессами ферментации на основе нейросетевых технологий

Использование нейросетевого подхода не требует формального математического описания законов изменения состояния управляемого объекта, а предполагает наличие представительного набора образцов экспериментальных данных для обучения системы управления свойствам имеющихся экспериментальных данных.

Обучение нейронных сетей (НС) является первоначальным этапом идентификации нейросетевой модели (НСМ) [51]. При отсутствии ограничений на вычислительные и временные затраты обучения нейросетевой модели в работе [52] показана целесообразность многоэтапной процедуры обучения линейной динамической модели на базе многослойной нейронной сети прямого распространения. На начальном этапе обучения, когда точность обучения не имеет определяющего значения, рационально использовать алгоритм поиска в случайном направлении, либо алгоритм градиентного спуска с автоматическим определением параметра активности. На втором этапе обучения, когда направление движения поис-

ка определено, целесообразно применять алгоритмы сопряженного градиента Флетчера – Ривса либо Полака – Рибейры. На третьем этапе обучения целесообразно применить алгоритм Левенберга – Марквардта, который обеспечивает большую точность и высокую скорость сходимости вблизи минимума, а, следовательно, позволяет существенно ускорить процедуру обучения. Как показали эксперименты ошибка обучения для алгоритмов обучения градиентного спуска составляет 0,185 за 200 циклов и время 80,2 с; для алгоритмов Флетчера – Ривса – $5,77 \cdot 10^{-4}$ за 200 циклов и время 237,0 с; для алгоритма Левенберга – Марквардта – $3,95 \cdot 10^{-8}$ за 90 циклов и время 112,4 с.

В работах [53, 54] предложен метод решения задачи построения робастной системы управления, основанный на применении в системе нескольких нейросетевых моделей (НСМ) объекта управления, каждая из которых на определенных участках протекания процесса наиболее приближена к фактическому состоянию объекта, и соответствующих им нейросетевых регуляторов, предварительно обученных на основе информации о параметрах модели объекта. Результаты, полученные при исследовании системы программного управления температурой в ферментаторе с многомодульной нейронной сетью, показали следующие преимущества по сравнению с обычной системой с одной НСМ [55]:

1) возможность функционирования системы со структурой, оптимальной для каждого состояния;

2) возможность наращивания структуры системы за счет подключения новых модулей без переобучения имеющихся в системе;

3) возможность реализации в реальном времени.

В работе [56] разработан регулятор стабилизации температуры непрерывного процесса ферментации с использованием адаптивной нейро-нечеткой системы – ANFIS (Adaptive network-based fuzzy inference system). Разработанный нечеткий регулятор обеспечивает требования к стабилизации температуры в ферментаторе при ограничении на управляющее воздействие. Результаты исследований показали, что данная система позволит повысить точность поддержания заданной температуры относительно ПИД-регулятора на 2,1% и снизить пиковый расход хладагента на 43%. При этом обеспечивается робастность к возмущениям по температуре охлаждающей воды и компенсация тепловыделения процесса при ограничении на расход охлаждающей воды и при допустимых температурных рассогласованиях в системе при действии пикового тепловыделения процесса.

Для оптимальной настройки и эффективного функционирования алгоритма системы управления процессом биосинтеза важно иметь информацию о состоянии биосистемы. Получение такой информации с помощью моделей ограничено их сложностью, трудностями идентификации, требующей задания начальных приближений по константам. Существенным фактором в дополнение к вышесказанному является неопределенность в принадлежности области конкретного вида модели зависимостей удельных скоростей процессов синтеза потребления субстрата и удельной скорости роста от концентрации субстрата. В этих условиях определение принадлежности конкретного процесса области лимитированного или нелимитированного роста микроорганизмов возможно с помощью классификатора процессов биосинтеза по степени лимитирования на основе нейроподобной сети Кохонена. В [57] разработана методика нейросетевой классификации процессов биосинтеза по степени лимитирования субстратом в условиях разнородности и фрагментарности массивов данных и, как следствие, ограниченности их содержательного анализа традиционными статистическими методами. Созданная нейронная сеть классификатора отвечает требованиям модульности, адаптивности, инвариантности и однородности структуры.

Следует отметить, что в производственных условиях при частых изменениях нагрузки и наличии внешних не полностью контролируемых возмущений или условий неопределенности параметры БТО подвержены дрейфу, что требует от наладчика введения новых правил в базу знаний нечеткого регулятора. Однако, в силу ограниченности времени, недостаточности средств измерений и опыта, наладчики зачастую не могут предусмотреть все условия поведения системы, что может привести к снижению эффективности работы нечеткой системы. В таких случаях идут либо на усложнение информационной структуры системы [58], примером которой могут служить каскадные САУ с использованием традиционных и модифицированных регуляторов, вплоть до нечетких и нейросетевых [59–64]. Наиболее простыми и распространенными на практике являются двухконтурные САУ, которые включают два регулятора: основной (внешний) регулятор, служащий для регулирования основного выхода объекта, и вспомогательный (внутренний) регулятор, предназначенный для компенсации входных возмущений.

В работах [65, 66] предложены структуры каскадных САУ с использованием

нейросетевых регуляторов на базе многослойных персептронов, обеспечивающие высокие показатели качества переходных процессов в заданном диапазоне изменения режимов работы системы, включая стабилизацию и программный режимы, при одновременном изменении задания регулятору и параметров объекта: в проведенных экспериментах непрерывное изменение коэффициента демпфирования осуществлялось по синусоидальному закону при подаче на вход системы различных по величине ступенчатых воздействий и составляло от 0 до 1 относительно их постоянных значений, принятых при настройке. Экспериментальными исследованиями установлено, что использование нейросетевых регуляторов в контурах каскадной САУ обеспечивает одновременное улучшение нескольких показателей качества переходного процесса при независимой автоматической настройке параметров системы управления, что недостижимо с помощью классических линейных и позиционных регуляторов.

В [67] получено выражение для оптимального значения параметра, при котором скорость сходимости алгоритма управления для нейросетевого ПИД-регулятора нелинейных объектов будет наибольшей.

При обучении трехслойной НС в режиме off-line при синтезе системы управления динамическими объектами ставится вопрос об адаптации параметров регулятора к изменению характеристик объекта [68].

В [69] осуществлен синтез контура подстройки основного регулятора на основе методов нечеткой логики и синтез каскадной САУ БТО с непосредственным включением нейросетевых регуляторов в основной (внешний) и вспомогательный (внутренний) контуры системы. Разработанные каскадные САУ с нейросетевыми регуляторами на основе многослойных персептронов обеспечивают высокие показатели качества переходных процессов в различных режимах работы системы, включая стабилизацию и программный режимы, и при изменяющихся параметрах объекта управления с запаздыванием. Несмотря на то, что топология нейронных сетей, используемых при реализации алгоритмов управления (законов регулирования), выбиралась эмпирически и при этом оказалась достаточно простой, разработанную каскадную САУ динамическим объектом можно считать эквивалентной робастным и адаптивным системам управления.

Подход к построению систем управления на основе комбинации нейросетевой технологии и нечеткой логики применим ко многим существующим системам, так как

во многих случаях улучшение существующих алгоритмов можно произвести с минимальными затратами с использованием существующего программно-аппаратного обеспечения [70]. Однако, несмотря на широкое развитие нейрорегулирования, вопрос об эффективном применении нейросетевых регуляторов для построения системы управления сложными БТО, обеспечивающей в условиях неопределенности робастность к изменяющимся параметрам объекта управления, остается открытым.

Одним из направлений разрешения противоречия между возрастающими требованиями к управлению биотехнологическими объектами и ограниченной информацией об их свойствах может стать применение аппарата теории интеллектуального управления. Однако применение таких методов интеллектуального управления как нечеткая логика, теория нейронных сетей, нейро-нечеткого (гибридного) управления для синтеза систем управления биообъектами практически не исследовано. Из анализа литературных источников по применению нечетких и нейронных сетей в задачах управления динамическими объектами в условиях неопределенности следует, что большинство работ носит частный или эмпирический характер, результаты по выбору структуры и настройки получены, в основном, подбором и путем многократного моделирования, практически отсутствуют результаты синтеза нечетких и нейро-нечетких систем управления процессами стерилизации и ферментации. Эффективное совмещение методов нечеткой логики и нейросетевой технологии позволяет формировать модели сложных формализуемых процессов поддержки управленческих решений. Нейро-нечеткие системы особенно эффективны в сложных нелинейных процессах управления с параметрическими неопределенностями.

Основными недостатками экспертных регуляторов, основанных на нечеткой логике, являются, прежде всего, субъективность выбора набора правил и параметров функций принадлежности входных переменных, а также сложность корректировки этих параметров на основе экспериментальных данных, особенно проявляющаяся при недостатке информации о характеристиках возмущений и объекта управления, т.е. в условиях неопределенности. Эти недостатки можно устранить или ослабить их влияние применением нейро-нечетких регуляторов, объединяющих в себе лучшие качества нейронных сетей и нечетких систем.

Управление процессом ферментации традиционными системами неэффективно, так как эти системы настраиваются только

при разработке. Для эффективного управления процессом необходимо использовать адаптивную систему, которая позволит изменять свои характеристики в соответствии с изменениями свойств объекта управления. Одним из эффективных вариантов адаптивной системы управления служит нейро-нечеткая система управления. Нейро-нечеткие системы управления отличаются от классических тем, что алгоритм их функционирования в начале работы не определен, и полностью задается при их настройке путем обучения.

Как показывает анализ работ, количество разработок в области применения интеллектуальных методов для систем управления промышленными процессами ферментации незначительно. С появлением аналогичных разработок для технических и технологических систем в ближайшие годы следует ожидать все большего их применения для целей управления процессами ферментации, что делает естественным реализацию функций регулирования режимных параметров существенно нестационарных процессов ферментации на качественно новом уровне. С учетом изложенного наиболее перспективным путем промышленной автоматизации процессов ферментации в биотехнологическом производстве является создание алгоритмического обеспечения автоматизированных систем управления на базе интеллектуальных методов. Основное направление исследований должно состоять в разработке более совершенных САУ процессом ферментации, обеспечивающих реализацию задач оптимального управления и учитывающих важную специфическую особенность этого класса промышленных объектов – их существенную нестационарность, запаздывание, нелинейность, невысокую воспроизводимость и другие факторы, создающие неопределенность в математическом описании БТОУ. Эта тенденция обусловлена экономическими факторами развития этих производств, а поэтому является весьма устойчивой [71].

Выводы

1. Повышение эффективности фармацевтических и микробиологических производств связано с разработкой САУ процессами стерилизации и ферментации, требующей при отсутствии полного и точного математического описания динамики процессов применения интеллектуальных методов при синтезе алгоритмов управления и регулирования.

2. Анализ существующего состояния управления процессами стадии ферментации показывает, что вопросам синтеза САУ

БТО в условиях информационной неопределённости, с учётом физико-химических, биофизических, биохимических закономерностей и нечётких причинно-следственных связей не уделялось должного внимания, в то время как в технических областях они давно получили решение, эффективное по отношению к результатам, полученным на основе традиционных решений.

3. Количество работ, в которых решаются задачи с применением интеллектуальных систем для целей робастного и адаптивного управления нестационарными биотехнологическими объектами и процессами в условиях неопределённости, невелико, что свидетельствует об отсутствии их окончательного решения и придает этим работам в настоящее время все большую актуальность и востребованность на практике.

4. Из анализа литературных источников по применению нечетких и нейронных сетей в задачах управления биотехнологическими объектами в условиях неопределённости следует, что большинство работ носит частный или эмпирический характер, результаты по выбору структуры и настройки регуляторов получены, в основном, подбором и путем многократного моделирования, практически отсутствуют результаты синтеза нейро-нечетких систем управления процессами ферментации и стерилизации и рекомендаций по их достижению.

5. Решение задач разработки методов управления движением нелинейных систем, в частности выводом на заданный режим, управление потоками субстратов и отбором продуктов, и методов стабилизации в детерминированном случае и при наличии неопределённости связано с серьезными затруднениями в виду специфики объектов промышленной биотехнологии и необходимости одновременного учета целого ряда разнообразных факторов неопределённости, практически не позволяющих сформировать в замкнутой аналитической форме алгоритмы функционирования САУ БТО с требуемыми показателями эффективности. В связи с этим внедрение интеллектуальных методов в теорию и практику автоматического управления сложными, нелинейными биотехнологическими объектами является весьма перспективным.

Список литературы

1. Солдатенков, А.Т. Основы органической химии лекарственных веществ / А.Т. Солдатенков, Н.М. Колядина, И.В. Шендрик. – М.: Химия, 2001. – 188 с.
2. Лубенцов В.Ф. Системы автоматического управления процессами ферментации: монография. – Сев.-Кав. гос. техн. ун-т. Ставрополь: СевКавГТУ, 2005. – 200 с.
3. Программа «БИО-2020». – URL: <http://rosbiotech.com/news/view.php?ID=45> (дата обращения: 03.06.2012).
4. Островский Ю.В. Система управления производством субстанций лекарственных препаратов с перенастраиваемой технологией / Ю.В. Островский, Т.Б. Чистякова, А.А. Малин // Химическая промышленность. – 2003. – № 5. – С. 4–18. – URL: www.thesa.ru/chemprom/2003/05_03/ostrov.pdf (дата обращения: 12.12.2015).
5. Медянцева Д.В. Нейросетевые информационные системы для автоматизации технологических процессов: 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в промышленности): автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2007. – 22 с.
6. Усков А.А. Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечеткая логика / А.А. Усков, А.В. Кузьмин. – М.: Горячая линия-Телеком, 2004. – 144 с.
7. Гостев В.И. Синтез нечетких регуляторов систем автоматического управления. – К.: Радиоамастор, 2003. – 512 с.
8. Sefa I. Simulation of fuzzy logic controlled grid interactive inverter / I. Sefa, N. Altin // University of Pitesti – Electronics and computers science. Scientific bulletin. – 2008. – Vol. 2. – № 8.
9. Юсупбеков Н.Р. Управление процессами ферментации с применением микро-ЭВМ / Н.Р. Юсупбеков и др. – Ташкент: Фан., 1987. – 200 с.
10. Оптимизация процесса проектирования биотехнологических производств путем разработки элементов САПР / В.А. Герасименко, Ю.Н. Погребной, Ю.В. Карлаш // Научное сообщество студентов XXI столетия: материалы II Студенческой международной заочной научно-практической конференции (Россия, г. Новосибирск, 16 апреля 2012 г.). – Новосибирск, 2012. – <http://bio-x.ru/articles/optimizaciya-processa-proektirovaniya-biotehnologicheskikh-proizvodstv> (дата обращения: 04.06.2012).
11. Москвин С.В. Системный анализ эффективности управления биологическими системами низкоэнергетическим лазерным излучением: 05.13.01: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. – Тула: ФГУ «Государственный научный центр лазерной медицины Росздрава», 2008. – 41 с.
12. Анохин П.К. Принципиальные вопросы общей теории функциональных систем. – 1973. – URL: <http://www.raai.org/library/books/anohin/anohin.htm> (дата обращения: 12.06.2012).
13. Системный подход к анализу процесса биосинтеза. – <http://tweetbot.ru/biotehnologiya-spirta/500-sistemnyy-podhod-k-analizu-processa-biosinteza-chast-3.html> (дата обращения: 13.06.2012).
14. Рубин А.Б. Кинетика биологических процессов / А.Б. Рубин, Н.Ф. Пытьева, Г.Ю. Ризниченко. – М.: Изд-во МГУ, 1987. – 300 с.
15. Ризниченко Н.Ф. Математические модели биологических производственных процессов / Н.Ф. Ризниченко, А.Б. Рубин. – М.: Изд-во МГУ, 1993. – 300 с.
16. Потапенко Е.М. Высокоточное управление неопределенными объектами. Сравнение методов управления / Е.М. Потапенко, А.Е. Казурова // 36. наук. Праць Дніпродзержинського техн. університету (технічні науки). Тематичний вип. «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика». – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2007. – С. 412–414.
17. Анализ видов неопределённости информации, характерных для процесса управления сложными системами. – URL: <http://www.plink.ru/tnm/g111.htm> (дата обращения: 12.08.2011).
18. Лубенцов, В.Ф. Методы динамической идентификации биотехнологических объектов / В.Ф. Лубенцов, Д.В. Болдырев – Ставрополь: СевКавГТУ, 2005. – 84 с.
19. Лубенцов В.Ф. Практический математико-статистический анализ биотехнологических систем. – Ставрополь: Изд-во СевКавГТУ, 2000. – 111 с.
20. Фурсова П.В. Дифференциальные уравнения в моделировании сообществ микроорганизмов / П.В. Фурсова,

- А.П. Левич // Успехи современной биологии. – Т. 126. – 2006. – № 2. – С. 149–179.
21. Месарович М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, Я. Такахара. – М.: Мир, 1973. – 344 с.
22. Миллер Г.Б. Оптимизация управления в линейных стохастических дифференциальных системах с неопределенными параметрами возмущений / Г.Б. Миллер, А.Р. Панков // Информационные процессы. – 2006. – Т. 6. – № 2. – С. 131–143.
23. Бирюков В.В. Основы промышленной биотехнологии. – М.: Колос С, 2004. – 296 с.
24. Ивашкин Ю.А. Управление нечеткими объектами в прикладной биотехнологии / Ю.А. Ивашкин, И.И. Протопопов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – Вып. № 4. – М.: МГТУ, 1999. – С. 1–3.
25. Злобин Д.Л. Математические модели процессов при брожении полуфабрикатов хлебопекарного производства: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2005. – 121 с.
26. Макаров И.М. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления / И.М. Макаров, В.М. Лохин, С.В. Манько, М.П. Романов. – Отделение информ. технологий и вычислит. систем РАН. – М.: Наука, 2006. – 333 с.
27. Электронный ресурс. – URL: <http://www.bmt.bmstu.ru/show/autodiag.doc> (дата обращения: 13.08.2012).
28. Искандеров Г.М. Нечеткие логические регуляторы в системе управления ферментатором // Вузовская наука – Северо-Кавказскому региону: материалы V региональной НТК. Технические и прикладные науки. Ч. 2. – Ставрополь: СевКавГТУ, 2001. – С. 32–33.
29. Синтез функциональной структуры системы оптимального управления биотехнологической системой / У.Т. Хаитматов и др. // Математические методы в технике и технологиях: сб. трудов XVI Междунар. науч. конф. В 10-и т. Т. 6. Секции 9, 13 / под общ. ред. В.С. Балакирева; РГАСХМ ГОУ. – Ростов н/Д., 2003. – С. 196–197.
30. <http://nrsu.bstu.ru/chap43.html> (дата обращения: 13.08.2012).
31. Liflus GX I (автоклавизируемый ферментер). – <http://koreabioblab.ru/catalog/9/17.htm> (дата обращения: 13.08.2012).
32. Применение нечеткой логики в управлении биотехнологическими процессами / Б.Т. Каипбергенов, С.Х. Файзуллаев, А.А. Акрамов, А.Е. Исмаилов // Математические методы в технике и технологиях. ММТТ-21. Секция 6. – Саратов, 2008.
33. Куленко М.С., Буренин С.В. Исследование применения нечетких регуляторов в системах управления технологическими процессами // Вестник ИГЭУ. – Вып. 2. – 2010. – С. 1–5.
34. Кудинов Ю.И. Сравнение линейного и нечеткого ПИД-регуляторов / Ю.И. Кудинов, А.Ю. Келина. – URL: http://www.rusnauka.com/13_NMN_2011/Economics/10_83520.doc.htm (дата обращения: 13.08.2012).
35. Воробьев К.А. Использование аппарата нечеткой логики в интересах адаптации системы управления самонаводящихся зенитных управляемых ракет / К.А. Воробьев, И.Н. Хурской // Электронный математический и медико-биологический журнал. – Т. 9. – Вып. 1. – 2010. – URL: <http://www.smolensk.ru/user/sgma/MMORPH/N-25.html/cont.htm> (дата обращения: 20.12.2012).
36. Уграватов А.Ю. Применение регуляторов на нечеткой логике // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 3. – С. 9–15.
37. Уграватов А.Ю. Приемы управления сложными динамическими объектами с применением методов нечеткой логики // Проблемы автоматизации и управления в технических системах: сборник статей Международной научно-технической конференции. – Пенза: ИИЦ ПГУ, 2008. – С. 105–109.
38. Шидловский С.В. Система автоматического регулирования, инвариантная к параметрическим возмущениям, на базе нечеткой логики // Вестник Томского государственного университета. – 2006. – № 290. – С. 247–250.
39. Роман М.Р. Выбор оптимальных алгоритмов систем регулирования в условиях нечеткой информации: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Магди Рауф Марзук Роман. – М., 2008. – 20 с.
40. Михасев А.Ю. Исследование влияния вида базы правил нечеткого регулятора на вид переходного процесса / А.Ю. Михасев, И.М. Кольцов // Научная сессия МИФИ-2005. – Т. 5. Автоматика. – 2005. – С. 32–33.
41. Бураков М.В. Разработка интеллектуальных систем управления динамическими объектами методом декомпозиции базы знаний / М.В. Бураков, А.С. Коновалов. – URL: <http://www.inftech.webservis.ru/it.conference/isanditc/2000/section2/rus/argus2.html> (дата обращения: 20.08.2012).
42. Масютина Г.В. Синтез и анализ каскадной системы управления с нечетким модифицированным регулятором / Г.В. Масютина, В.Ф. Лубенцов // Вестник СевКавГТУ. Технические науки. – Ставрополь: Изд-во СевКавГТУ. – 2010. – № 4. – С. 97–103.
43. Володин А.А., Лубенцова Е.В., Лубенцов В.Ф. Построение и исследование нейро-нечетких регуляторов потоков субстрата и продукта для управляемой непрерывной биосистемы // Вестник СКФУ. – Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2013. – № 3(36). – С. 14–20.
44. Володин А.А., Лубенцова Е.В. Адаптивная нейро-нечеткая система управления биотехнологическим процессом // Инфокоммуникационные технологии в инновациях, медико-биологических и технических науках: сборник научных трудов Пятого международного научного конгресса «Нейробиотелеком-2012». – СПб.: Политехника, 2012. – С. 223–226.
45. Лубенцов В.Ф. Коррекция регуляторов нелинейных систем с использованием нечеткой логики / В.Ф. Лубенцов, Г.В. Масютина // Системный синтез и прикладная синергетика: Международная научная конференция 29.09–02.10.2009 г. Пятигорск. Сб. докладов. – Пятигорск: РИА на КМВ, 2009. – С. 220–223.
46. Масютина Г.В. Астатическое регулирование в нечетких условиях // Материалы XXXIX по итогам работы профессорско-преподавательского состава СевКавГТУ за 2009 год. Том первый. Естественный и точные науки. Технические и прикладные науки. – Ставрополь: СевКавГТУ, 2010. – С. 52–54.
47. Лубенцов В.Ф. Интеллектуальная система программного управления и робастной стабилизации на основе нечеткой логики / В.Ф. Лубенцов, Г.В. Масютина // XXIII Международная научная конференция. Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-23: в 12 т. Т. 6. Секции 6, 7; под общ. ред. В.С. Балакирева. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2010. – С. 63–65.
48. Лубенцов В.Ф. Интеллектуальная система управления с переменной структурой на основе нечеткой логики // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12 (часть 2) – С. 252–257.
49. Мелихова О.А. Нечеткие интеллектуальные системы. – URL: <http://pitis.tsure.ru/files5/09.htm> (дата обращения: 20.10.2012).
50. Электронный ресурс / <http://texproc.ru/index.php/biblioteka/90-o-intellektualnykh-sistemakh-upravleniya/nechlog/138-map?limitstart=0> (дата обращения: 3.10.2012).
51. Иванов В.А. Математическое моделирование процесса синтеза метанола с помощью искусственных нейронных сетей / В.А. Иванов, И.А. Кудрина // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-2000: сборник трудов международной научной конференции в 7-и томах. Секции 11, 12, 13. Т. 6. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный технологический институт (техн. ун-т), 2000. – С. 141–143.
52. Червяков Н.И. Сравнение алгоритмов обучения нейросетевой модели управления динамическими системами / Н.И. Червяков, Т.А. Рудакова, С.Ю. Щербина // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – М.: Радиотехника, 2008. – № 1–2. – С. 57–63.

53. Рудакова Т.А. Система автоматического управления с многомодульной нейросетевой моделью / Т.А. Рудакова, В.Ф. Лубенцов // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-21: XXI Международная научная конференция. – Саратов: СГТУ, 2008. – С. 231–232.
54. Червяков Н.И. Нейросетевая система автоматического управления с переменной структурой / Н.И. Червяков, В.Ф. Лубенцов, Т.А. Рудакова // Инфокоммуникационные технологии. – 2008. – № 1. – С. 8–12.
55. Рудакова Т.А. Система автоматического управления с многомодульной нейросетевой моделью / Т.А. Рудакова, В.Ф. Лубенцов // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-21: XXI Международная научная конференция. – Саратов: СГТУ, 2008. – С. 231–232.
56. Володин А.А. Интеллектуальная система стабилизации температурного режима биопроцесса / А.А. Володин, Е.В. Лубенцова // Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований: материалы II международной научно-практической конференции. – М., 2013. – С. 117–120.
57. Лубенцова Е.В., Володин А.А., Евдокимов А.А., Лубенцов В.Ф. Нейросетевой классификатор процессов биосинтеза по степени лимитирования субстратом // Нейрокомпьютеры: разработка и применение. – М.: Изд-во: «Радио-техника», 2013. – № 2. – С. 61–69.
58. Смирнов Н.И. Оптимизация одноконтурных АСР с многопараметрическими регуляторами / Н.И. Смирнов, В.Р. Сабанин, А.И. Репин // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2005. – № 7. – С. 24–28.
59. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / под ред. Н.Д. Егупова. – 2-е изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 744 с.
60. Заде Л.А. Роль мягких вычислений и нечеткой логики в понимании, конструировании и развитии информационных интеллектуальных систем. – http://zadeh.narod.ru/ZADEH_Rol_mjagkikh_vychislenij.html
61. Городецкий А.Е. Нечеткое математическое моделирование плохо формализуемых процессов и систем / А.Е. Городецкий, И.Л. Тарасова. – СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2010. – 336 с.
62. Анисимов, Д.Н. Использование нечеткой логики в системах автоматического управления // Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика. – 2001. – № 8. – С. 39–42.
63. Genetic tuning of non-linear PID-controllers / A.H. Jones, D.W. Pearson, N.C. Steele, R.F. Albrecht // In: Artificial Neural Nets and Genetic Algorithms. Procs. of the Int. Conf. in Ales, France. – Wien: Springer Verlag, 1995. – P. 412–415.
64. Галушкин А.И. Теория нейронных сетей: учебное пособие для вузов. Кн. 1. Нейрокомпьютеры и их применение / под ред. А.И. Галушкина. – М.: ИПРЖР, 2000. – С. 356–404.
65. Масютина Г.В. Синтез и анализ каскадной системы управления с нечетким модифицированным регулятором / Г.В. Масютина, В.Ф. Лубенцов // Вестник СевКавГТУ. Технические науки. – Ставрополь: Изд-во СевКавГТУ, 2010. – № 4. – С. 97–103.
66. Масютина Г.В. Синтез каскадной САУ с использованием квазилинейных и нейросетевых регуляторов / Г.В. Масютина, В.Ф. Лубенцов // Инфокоммуникационные технологии в науке, производстве и образовании: четвертая международная научно-техническая конференция, 28–30 июня 2010 г. Ч. 1. – Ставрополь: СевКавГТУ, 2010. – С. 115–120.
67. Ляшенко С.А. Оптимизация управления сложными технологическими процессами в сахарном производстве на основе применения нейросетевых регуляторов // Вестник ХНТУ. – 2011. – № 2(41). – С. 39–46.
68. Коломейцева М.Б. Применение нейронных сетей в системе управления динамическими объектами / М.Б. Коломейцева, Д.Л. Хо // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-2000: Сб. трудов Международ. науч. конф. В 7-и т. Т. 6. Секции 11, 12, 13. Санкт-Петербургский гос. технол. ин-т (техн. ун-т). – СПб., 2000. – С. 155–156.
69. Масютина Г.В. Синтез робастных систем управления с использованием каскадно-связанных модифицированных нелинейных, нечетких и нейросетевых регуляторов: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01: защищена 1.12.2011. – Ставрополь, 2011. – 228 с.
70. Колдаев А.И. Разработка нечеткого нейроконтроллера с применением методов вейвлет-преобразований: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. – Ставрополь, 2012. – 150 с.
71. Андриевская Н.В. Особенности применения нейро-нечетких моделей для задач синтеза систем автоматического управления / Н.В. Андриевская, А.С. Резников, А.А. Черанев // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–7. – С. 1445–1449. – URL: www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=10005052 (дата обращения: 07.08.2015).

УДК 629.113

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЛИЯНИЯ СЕЗОННЫХ УСЛОВИЙ НА НАДЕЖНОСТЬ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ПОДВЕСКИ АВТОБУСОВ

Мальшаков А.В.

Тюменский государственный нефтегазовый университет, Тюмень, e-mail: Albert_Nord@mail.ru

В статье рассматривается закономерность влияния сезонных условий на надежность пневмоподвески автобусов MAN A72. Описывается имитационная модель изучаемой зависимости. Приводятся результаты имитационного эксперимента на модели.

Ключевые слова: имитационная модель, сезонные условия, отказы, пневматическая подвеска автобуса

SIMULATION MODEL THE REGULARITIES OF THE INFLUENCE OF SEASONAL CONDITIONS ON THE RELIABILITY OF AIR SUSPENSION BUSES

Malshakov A.V.

Tyumen State Oil and Gas University, Tyumen, e-mail: Albert_Nord@mail.ru

The article discusses the pattern of influence of seasonal conditions on the reliability of the air suspension MAN bus A72. Describes a simulation model of the studied dependence. The results of simulation experiment on the model.

Keywords: a simulation model, seasonal conditions, waivers, pneumatic suspension bus

Эффективность автомобильного транспорта зависит от условий эксплуатации, которые меняются по сезонам года [1, 8, 12]. В наибольшей степени варьируют температура воздуха, количество осадков и дорожные условия [2]. Кроме того, в течение года меняется интенсивность эксплуатации автомобилей, что обусловлено как изменением условий эксплуатации, так и особенностями обслуживаемых производств. При существенном сезонном изменении интенсивности и условий эксплуатации автомобилей известные методы планирования технического обслуживания (ТО) и ремонта (Р) не позволяют в ряде случаев обеспечить заданный уровень работоспособности: нормативы ресурса элементов автомобилей, расхода запасных частей не соответствуют реализуемой долговечности и фактическому расходу; нормативы периодичности ТО не обеспечивает заданной технической готовности; нормативные параметры производственно-технической базы не соответствуют потребностям в производственных площадях, постах ТО и Р [3, 4, 5, 14, 15].

Это обусловлено тем, что теоретические основы используемых системы ТО и Р, методик корректирования нормативов недостаточно учитывают переменный характер условий эксплуатации [10, 11]. Кроме того, в типичных расчетах принимается, что интенсивность использования автомобилей не меняется по времени. При этом нормирование расхода запасных частей на уровне автомобиля производится по наработке,

а на уровне предприятия – по времени. Это несоответствие может влиять на точность расчетов, причем сила влияния зависит от вариации интенсивности эксплуатации автомобилей по времени [7, 13].

В этой связи в ТюмГНГУ ведутся исследования, целью которых является разработка совокупности теоретических положений, позволяющих адекватно интерпретировать и моделировать процессы изменения качества автомобилей и их групп с учетом сезонной вариации условий и интенсивности эксплуатации, а также разрабатывать практические методы повышения эффективности использования подвижного состава.

Частью указанных исследований является изучение надежности элементов пневматической подвески автобусов в условиях Севера Тюменской области [16]. От надежности подвести автобусов зависит комфорт и безопасность пассажиров [6, 9]. В конструкции подвески используются пневмобаллоны. В зимний период существенно возрастает количество их отказов по сравнению с летним. Это ведет к неравномерной потребности в запасных частях. Для исключения простоев автобусов из-за отсутствия запасных частей, а также устранения излишних запасов необходимо знать закономерности формирования потока отказов пневмоподвески автобусов большого класса с учетом влияния сезонной вариации интенсивности и условий эксплуатации, что позволяет совершенствовать на этой основе методику определения потребности в запасных частях.

На первом этапе исследований установлен полный перечень факторов, влияющих на надежность подвески. Затем проведен предварительный отбор на основе результатов ранее выполненных исследований и выдвинута гипотеза о перечне значимых факторов. Окончательный отбор осуществлялся на основе эксперимента, выполненного в Управлении технологического транспорта № 3 ОАО «Сургутнефтегаз».

Далее разработана структура изучаемой системы. Общая схема имитационной модели системы разработана на основе базовых моделей формирования качества автомобилей, описанных в работах Н.С. Захаров [17].

При разработке гипотез о виде математических моделей взаимодействия элементов системы на первом этапе проведен анализ содержательной сущности изучаемой зависимости. Затем выдвинуты гипотезы о виде однофакторных моделей. Проверка их адекватности проведена на основе эксперимента. На их базе разработана многофакторная регрессионная модель.

Поскольку условия и интенсивность эксплуатации автобусов изменяются во времени случайным образом, то для определения количества отказов в различные периоды года необходимо использовать имитационную модель.

Алгоритм разработанной имитационной модели представлен на рис. 1.

Сначала задается количество годовых циклов моделирования N_{year} , затем текущим номерам года, месяца и дня присваиваются начальные значения. Далее генерируется значение температуры воздуха и вероятности осадков, а также интенсивности эксплуатации автобусов.

На следующем этапе генерируется интенсивность отказов пневмобаллонов. Полученные значения умножаются на интенсивность эксплуатации и количество автобусов для расчета количества отказов.

Номер дня увеличивается на единицу, и проверяется условие окончания месяца. Если номер дня не превышает количества дней в месяце, то повторяется дневной цикл расчета количества отказов, в ином случае номер месяца увеличивается на единицу, и проверяется условие окончания года. Если номер месяца не превышает 12, то повторяется цикл расчета количества отказов, в ином случае номер года увеличивается на единицу, и проверяется условие окончания моделирования. Если не достигнуто условие окончания моделирования, то расчеты продолжают по заданному циклу, в ином случае выводятся на печать результаты моделирования, и расчеты заканчиваются.

На рис. 2 представлен фрагмент результатов моделирования.

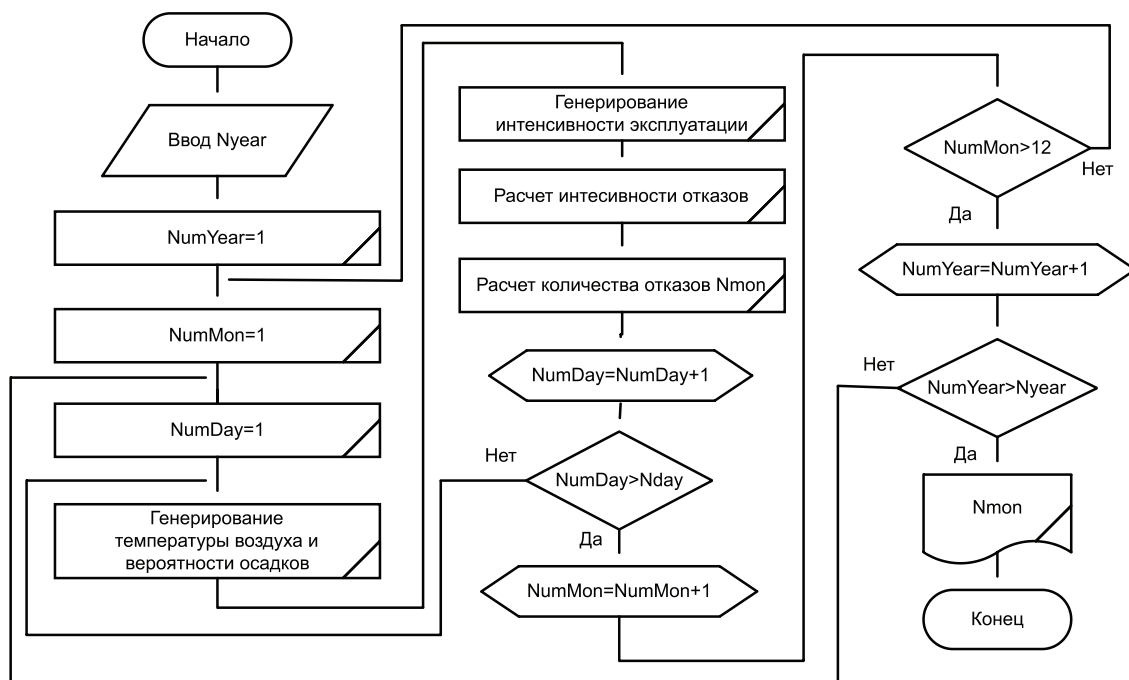


Рис. 1. Алгоритм имитационной модели влияния сезонных условий на количество отказов пневмоподвески автобусов

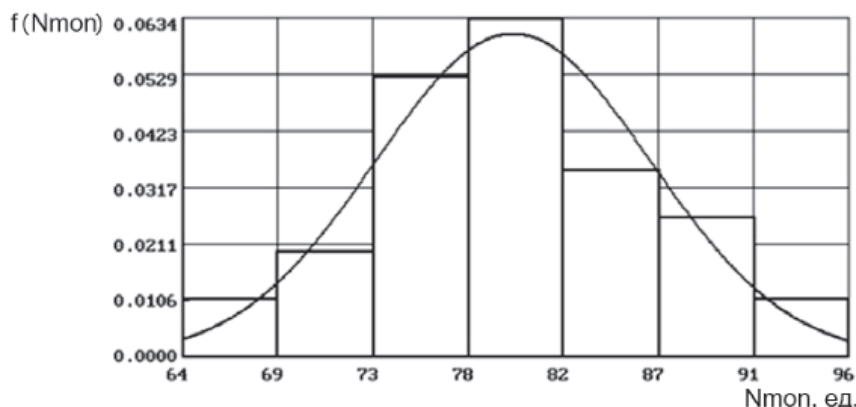


Рис. 2. Распределение количества отказов пневмоподвески автобусов большого класса MAN A72 в январе

Случайные компоненты температуры воздуха, доли дней с осадками и интенсивности эксплуатации автобусов формируют случайную компоненту количества отказов. Полученные на модели распределения количества отказов позволяют оценить не только среднюю потребность в заменах пневмобаллонов по месяцам, но и определить запас баллонов для исключения простоев автобусов из-за их отсутствия с заданной вероятностью.

Список литературы

1. Захаров Н.С. Оценка факторов, влияющих на эффективность транспортно-технологического обслуживания процессов нефтегазодобычи / Н.С. Захаров, О.А. Новоселов, М.М. Иванкив, А.А. Лушников // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2013. – № 1. – С. 70–75.
2. Захаров Н.С. Взаимосвязь между климатическими факторами / Н.С. Захаров, Г.В. Абакумов, А.Н. Ракитин // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 1. – С. 26–29.
3. Зиганшин Р.А. Формирование потока требований на запасные части при эксплуатации специальной нефтепромысловой техники с учетом влияния сезонных факторов / Р.А. Зиганшин, Н.С. Захаров, А.В. Зиганшина // Перспективы науки. – 2013. – № 10 (49). – С. 11–17.
4. Захаров Н.С. Структура системы при моделировании расхода запасных частей для транспортно-технологических машин в нефтегазодобыче / Н.С. Захаров, О.А. Новоселов, Р.А. Зиганшин, А.Н. Макарова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 5. – С. 193–195.
5. Захаров Н.С. Целевая функция при управлении снабжением запасными частями для транспортно-технологических машин в нефтегазодобыче / Н.С. Захаров, О.А. Новоселов, Р.А. Зиганшин, А.Н. Макарова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 4. – С. 108–110.
6. Захаров Н.С. Методика сравнительной оценки потребительских свойств автомобилей / Н.С. Захаров, О.А. Новоселов, В.А. Ракитин // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 6. – С. 158–160.
7. Захаров, Н.С. Использование TP-распределения при моделировании процессов изменения качества автомобилей // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 1999. – № 3. – С. 105–111.
8. Сервис транспортных, технологических машин и оборудования в нефтегазодобыче: учебное пособие / Н.С. Захаров, А.И. Яговкин, С.А. Асеев и др.; под ред. Н.С. Захарова. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2011. – 508 с.
9. Захаров Н.С. Информационное обеспечение системы контроля индекса клиентской лояльности / Н.С. Захаров, Л.А. Текутьев // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 3. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2506.2916> (доступ свободный). – Загл. с экрана. – Яз. рус.
10. Захаров Н.С. Техническое обслуживание автомобилей и автомобильные эксплуатационные материалы: учебное пособие. – Тюмень: Вектор бук, 1997. – 176 с.
11. Захаров Н.С. Техника транспорта. Обслуживание и ремонт. Часть 1. Теоретические основы: Курс лекций. – Тюмень: ТюмГНГУ, 1998. – 48 с.
12. Захаров Н.С. Оценка стратегий развития транспортно-технологических систем // Проблемы эксплуатации и обслуживания транспортно-технологических машин: Доклады междунар. науч.-техн. конф. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2006. – С. 73–84.
13. Захаров Н.С. Влияние сезонных условий на расходование ресурсов при эксплуатации автомобилей / Н.С. Захаров, Г.В. Абакумов, А.В. Вознесенский. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2011. – 115 с.
14. Захаров Н.С. Определение параметров зоны технического обслуживания с учётом неравномерности поступления автомобилей / Н.С. Захаров, Г.В. Абакумов, Е.С. Шевелев. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2011. – 132 с.
15. Захаров Н.С. Оптимизация количества постов текущего ремонта с учетом неравномерности поступления автомобилей / Н.С. Захаров, Е.В. Сергиенко. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2013. – 128 с.
16. Захаров Н.С., Мальшаков А.В. Оценка наработки на отказ пневмоподвески автобусов большого класса KAROSA-C934 // Теоретические и прикладные аспекты современной науки. – 2014. – № 3–1. – С. 60–64.
17. Захаров Н.С. Влияние сезонных условий на процессы изменения качества автомобилей. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2003. – 141 с.

УДК 629.113

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЛИЯНИЯ СЕЗОННЫХ УСЛОВИЙ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ОТКАЗОВ АВТОБУСОВ KAROSA C-934

Мальшаков А.В., Терехов А.С.

Тюменский государственный нефтегазовый университет,
Тюмень, e-mail: Albert_Nord@mail.ru, eom@tsogu.ru

В статье описывается математическая модель влияния сезонных условий на надежность пневмоподвески автобусов KAROSA C-934. Сравниваются модель на главных эффектах и модель со смешанными эффектами. Показаны преимущества модели второго типа.

Ключевые слова: надежность, сезонные условия, автобус большого класса, интенсивность отказов

MODELING THE REGULARITIES OF THE INFLUENCE OF SEASONAL CONDITIONS ON THE FAILURE RATE OF KAROSA C-934

Malshakov A.V., Terekhov A.S.

Tyumen State Oil and Gas University, Tyumen, e-mail: Albert_Nord@mail.ru, eom@tsogu.ru

The article describes the mathematical model of the influence of seasonal conditions on the reliability of the air suspension of A KAROSA bus C-934. Compares the model to the main effects model with mixed effects. The advantages of the model of the second type.

Keywords: reliability, seasonal conditions, bus large class, the failure rate

Работа нефтегазовой отрасли тесно связана с надежностью транспортно-обслуживания [1, 10, 14, 23]. Нефтяные компании для обеспечения производственной деятельности используют специальную технику различного назначения. Важную роль в обеспечении транспортного обслуживания играют автобусы большого класса, используемые для перевозки персонала [8].

В условиях Крайнего Севера важно учитывать влияние климатических условий на надежность автомобилей [3, 4, 5, 6, 9, 11]. Для автобусов большого класса особо актуальна надежность подвески, так как от ее состояния зависит комфорт и безопасность пассажиров.

В компании ОАО «Сургутнефтегаз» эксплуатируют около 19 тыс. единиц подвижного состава, из них 35 % составляют автобусы большого класса. В конструкции подвески таких автобусов используются пневмобаллоны. Опыт показывает, что в зимнее время существенно возрастает интенсивность их отказов по сравнению с летним периодом. Кроме того, по сезонам меняется интенсивность эксплуатации машин [18]. Это ведет к неравномерной потребности в запасных частях, постах обслуживания и ремонта, персонале [13, 15, 16, 17, 19, 21, 20, 22].

Целью исследования является снижение затрат на эксплуатацию путем установления закономерностей формирования потока отказов пневмоподвески автобусов большого

класса с учетом влияния сезонной вариации интенсивности и условий эксплуатации, а также совершенствование на этой основе методик определения потребности в запасных частях.

Для достижения поставленной цели решался ряд задач, сформулированных с учетом системного подхода [7]. Одной из задач исследования является составление математической модели для описания закономерностей формирования потока отказов пневмоподвески автобусов большого класса с учетом влияния сезонной вариации и интенсивности условий эксплуатации.

Оценка влияния климатических факторов на надежность пневмоподвески автобусов проводилась на основе экспериментальных исследований. Установлено, что значимо влияют на интенсивность отказов температура воздуха t и доля дней с осадками D [2]. На основе полученных данных об интенсивности отказов для каждого месяца и соответствующих значений показателей климатических факторов выдвинута гипотеза о возможности описания исследуемой зависимости моделью на главных эффектах следующего вида

$$\lambda = a_0 + a_1(t - t_0)^2 + a_2 D^{a_3},$$

где $a_0 \dots a_3$ – эмпирические коэффициенты.

На рис. 1 представлен график последней модели.

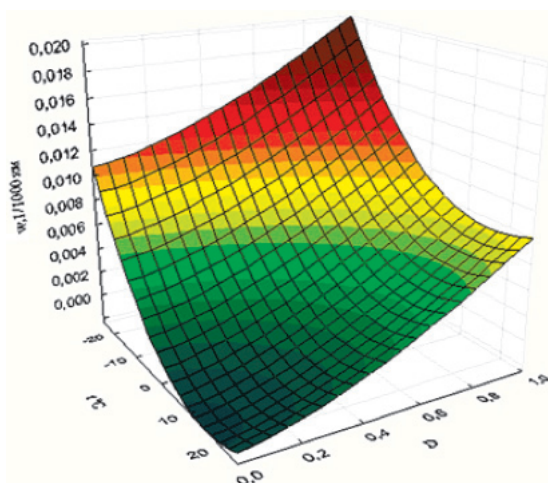


Рис. 1. Влияние температуры воздуха и доли дней с осадками на интенсивность отказов пневмоподвески автобусов большого класса KAROSA C-934 (модель на главных эффектах)

Анализ показал, что данная модель не в полной мере соответствует физическому смыслу изучаемого процесса: при низких температурах в зимний период года интенсивность отказов возрастает, при увеличении в этих условиях доли дней с осадками это влияние еще сильнее. При положительных температурах данной за-

висимости не должно быть. В модели на главных эффектах учесть совместно влияние факторов невозможно. Следовательно, необходимо использовать модель со смешанными эффектами.

Модель со смешанными эффектами имеет общий вид:

$$\lambda = A_0 + A_1 t + A_2 t^2 + A_3 t^2 D^{1,45} + A_4 t D^{1,45} + A_5 D^{1,45},$$

где $A_0 \dots A_5$ – эмпирические коэффициенты.

Для оценки значимости смешанных эффектов последняя модель линейаризована путем замены переменных:

$$\lambda = A_0 + A_1 X_1 + A_2 X_2 + A_3 X_3 + A_4 X_4 + A_5 X_5.$$

Для оценки адекватности модели, определения численных значений ее параметров и статистических характеристик использовалась программа «REGRESS 2.5» [12]. К смешанным эффектам в последней модели относятся 4-е и 5-е слагаемые. Расчеты показали, что коэффициент парной корреляции между $X_3 = t^2 D^{1,45}$ и l составил 0,76, а между $X_4 = t D^{1,45}$ и l 0,74 (табл. 1). Проверка по критерию Стьюдента показала, что с вероятностью 0,99 оба смешанных эффекта статистически значимо влияют на интенсивность отказов пневмобаллонов (табл. 2).

На рис. 2 представлен график модели со смешанными эффектами.

Таблица 1

Матрица коэффициентов парной корреляции

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
λ	-0,65	0,59	0,76	-0,74	0,79
X_1	1	-0,28	-0,59	0,96	-0,71
X_2	-0,28	1	0,89	-0,44	0,15
X_3	-0,59	0,898	1	-0,73	0,5
X_4	0,96	-0,44	-0,73	1	-0,73
X_5	-0,71	0,157	0,5	-0,73	1

Таблица 2

Матрица вероятностей значимости коэффициентов парной корреляции

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
λ	0,98	0,95	0,99	0,99	0,99
X_1	0,99	0	0,95	0,99	0,99
X_2	0	0,99	0,99	0,80	0
X_3	0,95	0,99	0,99	0,99	0,90
X_4	0,99	0,80	0,99	0,99	0,99
X_5	0,99	0	0,90	0,99	0,99

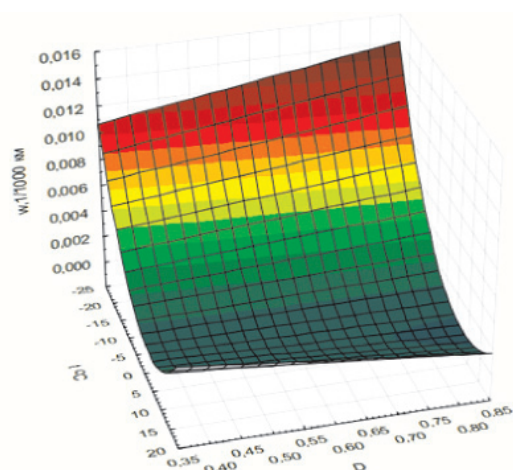


Рис. 2. Влияние температуры воздуха и доли дней с осадками на интенсивность отказов пневмоподвески автобусов большого класса KAROSA C-934

Адекватность уравнения оценивалась по критерию Фишера. Дисперсионное отношение Фишера превысило табличное значение с вероятностью 0,95, что свидетельствует об адекватности выбранной модели. Средняя ошибка аппроксимации составила 4,6%.

На основе полученных результатов можно моделировать поток отказов элементов бульдозеров, что позволит планировать объемы ремонтных работ, потребность в трудовых и материальных ресурсах, запасных частях [24].

Список литературы

- Захаров Н.С. Актуальные проблемы эксплуатации автомобилей и транспортно-технологических машин в нефтегазодобывающем регионе / Н.С. Захаров, Г.В. Абакумов, К.В. Бугаев, Д.С. Быков, В.В. Ефимов, А.А. Панфилов // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2006. – № 6. – С. 77–79.
- Захаров Н.С. Взаимосвязь между климатическими факторами / Н.С. Захаров, Г.В. Абакумов, А.Н. Ракитин // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 1. – С. 26–29.
- Захаров Н.С. Влияние неравномерности интенсивности эксплуатации автомобилей на время простоя исполнителей технического обслуживания / Н.С. Захаров, Г.В. Абакумов, В.Н. Карнаухов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2012. – № 12–2. – С. 167–173.
- Захаров Н.С. Влияние сезонной вариации факторов на интенсивность расходования ресурсов при эксплуатации транспортно-технологических машин / Н.С. Захаров, Г.В. Абакумов, А.В. Вознесенский, Л.В. Бачинин, А.Н. Ракитин // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2006. – № 1. – С. 75–79.
- Захаров Н.С. Влияние сезонных условий на оптимальное количество постов технического обслуживания автомобилей / Н.С. Захаров, Г.В. Абакумов, Е.С. Шевелев // Транспорт Урала. – 2008. – № 1. – С. 72–76.
- Захаров Н.С. Влияние условий эксплуатации на долговечность автомобильных шин. – Тюмень: ТюмГНГУ, 1997. – 139 с.
- Захаров Н.С. Использование ТР-распределения при моделировании процессов изменения качества автомобилей // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 1999. – № 3. – С. 105–111.
- Захаров Н.С. Методика сравнительной оценки потребительских свойств автомобилей / Н.С. Захаров, О.А. Новоселов, В.А. Ракитин // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 6. – С. 158–160.
- Захаров Н.С. Оценка надежности автомобилей с учетом вариации фактической периодичности технического обслуживания / Н.С. Захаров, В.Г. Логачев, А.Н. Макарова // Известия Тульского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Информатика. – 2012. – № 12–2. – С. 186–191.
- Захаров Н.С. Проблема обеспечения надежности шин автомобилей, обслуживающих объекты нефтегазового комплекса [Текст] / Н.С. Захаров, Г.В. Абакумов, А.И. Петров // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 1998. – № 6. – С. 107–113.
- Захаров Н.С. Проблемы обеспечения работоспособности автомобилей в условиях Западной Сибири / Н.С. Захаров, Г.В. Абакумов, С.Ю. Кичигин, Е.С. Шевелев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2008. – Т. 33. – № 1. – С. 76–77.
- Захаров Н.С. Программа «REGRESS». Руководство пользователя. – Тюмень: ТюмГНГУ, 1999. – 52 с.
- Захаров Н.С. Структура системы при моделировании расхода запасных частей для транспортно-технологических машин в нефтегазодобыче / Н.С. Захаров, О.А. Новоселов, Р.А. Зиганшин, А.Н. Макарова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 5. – С. 193–195.
- Захаров Н.С. Факторы, влияющие на продолжительность простоя транспортно-технологических машин в текущем ремонте / Н.С. Захаров, С.А. Савин, М.М. Иванкив, А.А. Лушников // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 4. – С. 82–84.
- Захаров Н.С. Целевая функция при управлении снабжением запасными частями для транспортно-технологических машин в нефтегазодобыче / Н.С. Захаров, О.А. Новоселов, Р.А. Зиганшин, А.Н. Макарова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 4. – С. 108–110.
- Зиганшин Р. Моделирование потока требований на запасные части при эксплуатации специальной нефтепромысловой техники с учетом влияния сезонных факторов / Р. Зиганшин, А. Зиганшина, Н. Захаров, В. Савчугов // Логистика. – 2013. – № 4 (77). – С. 50–52.
- Зиганшин Р.А. Формирование потока требований на запасные части при эксплуатации специальной нефтепромысловой техники с учетом влияния сезонных факторов / Р.А. Зиганшин, Н.С. Захаров, А.В. Зиганшина // Перспективы науки. – 2013. – № 10 (49). – С. 11–17.
- Новоселов О.А. Влияние сезонных условий на интенсивность эксплуатации бульдозеров при строительстве оснований для нефтегазовых объектов / О.А. Новоселов, В.Н. Пермяков, Е.И. Макаров // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 3. – С. 177–180.
- Новоселов О.А. Закономерности формирования расхода запасных частей для транспортно-технологических машин / О.А. Новоселов, Р.А. Зиганшин, А.Н. Макарова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 6. – С. 288–290.
- Пермяков В.Н. Моделирование закономерностей распределения наработок на отказ бульдозеров при строительстве оснований для нефтегазовых объектов [Электронный ресурс] / В.Н. Пермяков, О.А. Новоселов, А.Н. Макарова // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 2. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2435> (доступ свободный). – Загл. с экрана. – Яз. рус.
- Пермяков В.Н. Оценка надежности бульдозеров Б170М1Б.01В4 при строительстве оснований для нефтегазовых объектов / В.Н. Пермяков, О.А. Новоселов, А.Н. Макарова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 3. – С. 199–201.
- Резник Л.Г. Корректирование норм пробега шин / Л.Г. Резник, Н.С. Захаров // Автомобильный транспорт. – 1988. – № 11. – С. 29–31.
- Сервис транспортных, технологических машин и оборудования в нефтегазодобыче: учебное пособие / Н.С. Захаров, А.И. Яговкин, С.А. Асеев и др.; под ред. Н.С. Захарова. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2011. – 508 с.
- Терехов А.С. Оценка надежности пневматической подвески автобусов большого класса / А.С. Терехов, А.Н. Макарова, А.В. Малышков // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 3. – С. 232–235.

УДК 629.113

ОЦЕНКА ЗНАЧИМОСТИ ФАКТОРОВ ВЛИЯЮЩИХ НА НАДЕЖНОСТЬ ПНЕВМОПОДВЕСКИ АВТОБУСОВ БОЛЬШОГО КЛАССА KAROSA C-934

Мальшаков А.В.

Тюменский государственный нефтегазовый университет, Тюмень, e-mail: Albert_Nord@mail.ru

В статье рассматриваются экспериментальные исследования после выбора объекта, постановки цели и задачи эксперимента, выбираются наиболее важные факторы, которые влияют на систему. В качестве метода, позволяющего выбрать наиболее значимые факторы используется метод априорного ранжирования.

Ключевые слова: эксперимент, эксперты, автобус большого класса, агрегаты, подвеска

ASSESSING SIGNIFICANCE OF FACTORS AFFECTING THE RELIABILITY OF THE AIR SUSPENSION OF BUSES OF A LARGE CLASS OF KAROSA C-934

Malshakov A.V.

Tyumen State Oil and Gas University, Tyumen, e-mail: Albert_Nord@mail.ru

The article discusses a pilot study after selecting the object, purpose and objectives of the experiment choose the most important factors that affect the system. As a method, allowing you to select the most significant factors used the method of a priori ranking.

Keywords: the experiment, experts, bus large class, assemblies, suspension

Нефтегазовая отрасль играет важную роль в экономике Российской Федерации. В нефтяной промышленности технологический транспорт играет важную роль. Помимо участия в технологических процессах, он обеспечивает перевозки пассажиров, для этого используются автобусы большого класса [2, 5]. Надежность важна для автобусов, так как от нее зависит комфорт и безопасность пассажиров [8, 12]. В конструкции подвески используются пневмобаллоны. В зимний период времени существенно возрастает количество отказов по сравнению с летним периодом. Это ведет к неравномерной потребности в запасных частях.

Целью исследования является снижение затрат на эксплуатацию путем установления закономерностей формирования потока отказов пневмоподвески автобусов большого класса с учетом влияния сезонной вариации интенсивности и условий эксплуатации, а также совершенствование на этой основе методик определения потребности в запасных частях.

Одной из важной части исследования является выявление факторов, влияющих на отказы пневмоподвески автобуса.

Необходимым условием успешной работы автотранспортного предприятия является эффективная работа системы материально-технического снабжения [3, 6, 9]. Для того чтобы обеспечить, с одной стороны, бесперебойное снабжение ресурсами и исключить простои автомобилей из-за их отсутствия, а с другой – минимизировать затраты на их доставку и хранение, необхо-

димо знать, какие факторы влияют на процесс расходования и восполнения ресурсов [1, 4, 10, 11, 12].

Всю совокупность факторов можно разделить четыре группы: конструктивные, эксплуатационные, технологические и организационные [1, 10] (рис. 1).

В качестве метода выявления наиболее значимых факторов используется метод априорного ранжирования.

На начальном этапе исследования составили анкету. В анкету включили 5 факторов, влияющих на надежность автобуса. В эксперименте участвовало 7 экспертов компании ОАО «Сурутнефтегаз».

Были рассмотрены следующие факторы:

- природно-климатические условия;
- дорожные условия;
- интенсивность эксплуатации;
- природно-климатические условия;
- техническое состояние.

Матрица рангов, полученная из анкет, приведена в таблице.

Оценка согласованности мнений экспертов проводилась по коэффициенту конкордации:

$$W = \frac{12 \cdot 341}{5^2 \cdot (7^3 - 5)} = 0,62.$$

Несмотря на то, что полученное значение коэффициента конкордации значительно отличается от нуля, проверим его значимости по критерию Пирсона:

$$\chi^2 = \frac{12 \cdot 341}{5 \cdot 7(7 + 1)} = 18,73.$$



Рис. 1. Классификация факторов, влияющих на расход автомобильных запчастей [1]

Номер эксперта	X_1 – Классификация водителя	X_2 – Дорожные условия	X_3 – Интенсивность эксплуатации	X_4 – Природно-климатические условия	X_5 – Техническое состояние
1	5	3	4	1	2
2	4	2	3	1	5
3	5	4	3	1	2
4	5	2	1	2	3
5	5	2	4	1	2
6	5	3	2	1	4
7	5	4	2	1	3
Σ	34	20	19	8	21
Δi	-13,6	0,4	1,4	12,4	-0,6
$(\Delta i)^2$	184,96	0,16	1,96	153,76	0,36

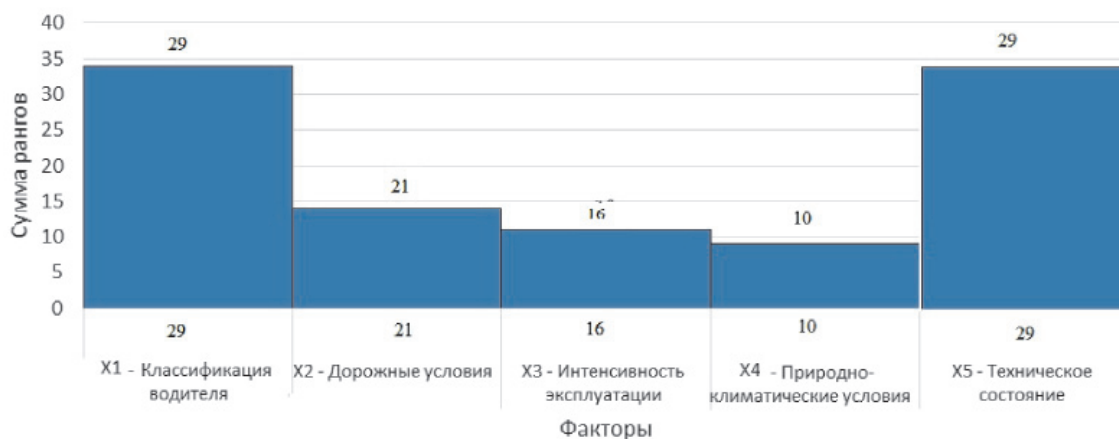


Рис. 2. Диаграмма априорного ранжирования факторов

Гипотеза о наличии согласованности мнений экспертов может быть принята, если при заданном числе степеней свободы табличное значение χ^2 меньше расчетного для 5% погрешности расчета.

С учетом 5% уровня значимости числа степеней свободы $f=6$ табличное значение критерия $\chi^2 = 12,6$. Следовательно, мнение экспертов согласованно. Построим диаграмму рангов для рассматриваемых факторов (рис. 2).

Таким образом, по результатам проведенного эксперимента установлено, что в наибольшей степени на надежность пневмоподвески автобусов влияют природно-климатические условия.

Список литературы

1. Техническая эксплуатация автомобилей: учебник для вузов / под ред. Е.С. Кузнецова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 2001. – 535 с.
2. Сервис транспортных, технологических машин и оборудования в нефтегазодобыче: учебное пособие / Н.С. Захаров, А.И. Яговкин, С.А. Асеев и др.; под ред. Н.С. Захарова. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2011. – 508 с.
3. Захаров Н.С. Информационное обеспечение системы контроля индекса клиентской лояльности / Н.С. Захаров, Л.А. Текутьев // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 3. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2014/2506.2916> (доступ свободный). – Загл. с экрана. – Яз. рус.
4. Захаров Н.С. Техническое обслуживание автомобилей и автомобильные эксплуатационные материалы: учебное пособие. – Тюмень: Вектор бук, 1997. – 176 с.
5. Захаров Н.С. Оценка стратегий развития транспортно-технологических систем // Проблемы эксплуатации и обслуживания транспортно-технологических машин: Доклады междунар. науч.-техн. конф. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2006. – С. 73–84.
6. Захаров Н.С. Влияние сезонных условий на расходование ресурсов при эксплуатации автомобилей / Н.С. Захаров, Г.В. Абакумов, А.В. Вознесенский. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2011. – 115 с.
7. Захаров Н.С. Влияние сезонных условий на процессы изменения качества автомобилей. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2003. – 141 с.
8. Захаров Н.С. Влияние сезонных условий на надежность автомобилей Урал-4320 / Н.С. Захаров, Г.В. Абакумов, Ю.М. Першин // Повышение эффективности использования колесных и гусеничных машин в суровых условиях: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. – Тюмень: ТюмГНГУ, 1996. – С. 60–66.
9. Захаров Н.С. Проектирование автотранспортных предприятий с использованием ПЭВМ. – Тюмень: ТюмГНГУ, 1998. – 409 с.
10. Захаров Н.С. Концепция формирования качества автомобилей в процессе эксплуатации // Приспособленность автомобилей, строительных и дорожных машин к суровым условиям эксплуатации: Межвузовский сборник научных трудов. – Тюмень: ТюмГНГУ, 1999. – С. 59–62.
11. Захаров Н.С. Влияние квалификации рабочих на затраты при обслуживании и ремонте транспортно-технологических машин в нефтегазодобыче / Н.С. Захаров, Г.В. Абакумов, С.В. Елесин, С.Ю. Кичигин // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2012. – № 6. – С. 112–120.
12. Захаров Н.С. Техника транспорта. Обслуживание и ремонт. Часть 1. Теоретические основы: Курс лекций. – Тюмень: ТюмГНГУ, 1998. – 48 с.

УДК 004.9

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ ДИСЦИПЛИНЫ «МЕХАНИКА ГРУНТОВ»)

Петухов А.Г.

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва, e-mail: kanz@mgsu.ru

Разработана в ЦНИТ и Серпуховском филиале Московского института коммунального хозяйства и строительства система дистанционного обучения «Виртуальный профессор». Эта система была внедрена в учебный процесс дистанционного обучения студентов направления подготовки 270800 – «Строительство», дисциплина: «Механика грунтов». Рассмотрены разделы дисциплины в соответствии с требованиями ГОС к обязательному минимуму содержания основной образовательной программы и даны к ним методические рекомендации. В целях проверки степени усвоения материала по разделам дисциплины составлены тестовые задания. После тестирования студентов, система была способна проконсультировать обучаемого по каждому разделу предмета. Кроме того, она могла автоматически генерировать сценарии дополнительного обучения по результатам тестирования.

Ключевые слова центр новых информационных технологий (ЦНИТ), государственный образовательный стандарт (ГОС), Серпуховский филиал Московского института коммунального хозяйства и строительства (МИКХиС), система дистанционного обучения (СДО)

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF DISTANCE LEARNING SYSTEM IN EDUCATIONAL PROCESS THE CASE OF A DISCIPLINE «SOIL ENGINEERING»

Petukhov A.G.

National Research Moscow State Construction University, Moscow, e-mail: kanz@mgsu.ru

Distance learning system «Virtual professor» has been developed in the center of new information technologies and Serpukhov branch of Moscow Institute of Communal Economy and Construction. This system has been implemented in the distance learning process of students with the direction of preparation 270800-Construction, discipline – «Soil engineering». Course units have been considered in accordance with the requirements of State educational standard to an obligatory minimum of the contents of the main educational program and the methodical recommendations are provided. The test tasks have been made to check the degree of learning by course units. After testing students, the system was able to advise a student on each section of the subject. Moreover, It could automatically generate scripts for additional training according to testing results.

Keywords: center of new information technologies(CNIT), State educational standard (SES), Serpukhov branch of Moscow Institute of Communal Economy and Construction, distance learning system (DLS)

Одним из направлений деятельности системы образования в области информационных технологий является разработка и внедрение новых форм дистанционного обучения в учебный процесс. Дистанционное образование до сих пор применялось под именем заочного обучения. Внедрение в образовательный процесс компьютера поднимает заочное образование на новый уровень. При этом, именно дистанционное обучение позволяет реально воплотить в жизнь идею повышения квалификации и переподготовки специалистов непосредственно в данном учебном заведении.

В современных условиях дистанционное образование – это совокупность информационных технологий, обеспечивающих доставку студентам основного объема изучаемого материала, интерактивное взаимодействие с преподавателями в процессе обучения, предоставления учащимся самостоятельной работы по освоению материала, а также оценку знаний и навыков.

Информационные технологии дистанционного обучения делятся на три вида:

1. Неинтерактивные (печатные материалы, аудиовизуальные носители).

2. Интерактивные (компьютеры, асинхронная почта, электронные учебники, электронные библиотеки, тестирование и контроль знаний).

3. Развитые средства коммуникации – интернет. Интернет (видеоконференции в режиме реального времени, возможно, с использованием спутникового канала).

В центре новых информационных технологий и Серпуховском филиале Московского института коммунального хозяйства и строительства (ЦНИТ МИКХиС) была разработана система дистанционного обучения (СДО) «Виртуальный профессор», основанная на имитации работы преподавателя при очной форме обучения посредством создания мультимедийных электронных лекций, лабораторных работ и тестов [1–2, 5–8]. Эта система была внедрена в учебный процесс дистанционного обучения студентов направления подготовки 270800 – «Строительство», дисциплина «Механика грунтов» [3, 4]. Она представляет собой пошаговую инструкцию освоения учебного материала, дающую возможность в максимальной степени приблизить процесс передачи информации

к естественному общению. Основные элементы системы – это сценарии, сценарные элементы и фреймы.

Сценарий – изложение определенной учебной дисциплины в логически-смысловой последовательности.

Сценарный элемент – составная часть сценария (информация по определенному разделу дисциплины).

Фрейм – базовая смысловая единица (сценарного элемента), сочетающая текст, иллюстрацию и звуковое сопровождение на одном экране (кадре). Мозг человека эффективно воспринимает информацию именно фреймами – элементарными смысловыми блоками.

Разбиение на фреймы является эффективным приемом управления вниманием, поскольку один смысловой блок отделен от другого, а переход от одного фрейма к другому осуществляется самим обучаемым нажатием кнопки «следующий» («предыдущий»). Это позволяет вести обучение с удобной скоростью и компоновать учебные курсы под возможности и потребности конкретных социальных и профессиональных групп обучаемых.

Апробация аудиовизуальных лекций по дисциплине «Механика грунтов» показала, что использование всех каналов поступления информации (зрения, слуха и ощущения) повышает скорость восприятия излагаемых материалов студентами не менее, чем в четыре раза. Кроме того, представленная в каждом смысловом фрейме информация сжата до минимально необходимого и достаточного объема. Будучи информационно эквивалентными традиционным лекциям, аудиовизуальные лекции за счет «сжатия» материала значительно менее продолжительны по сравнению с ними. Это вызвало высокую заинтересованность студентов в проведении подобных занятий и их стремление иметь аудиовизуальные материалы на домашнем компьютере.

Исследование и разработка учебно-методических материалов на электронных носителях с целью реализации их для дистанционного обучения студентов по дисциплине «Механика грунтов» представлены в разделах НИР [1, 2], а в источниках [3, 4] даны демонстрационные варианты тестов по основным разделам дисциплины.

В учебном пособии [7] изложены общие сведения о системе дистанционного обучения студентов. Рассмотрены разделы дисциплины «Механика грунтов» в соответствии с требованиями ГОС к обязательному минимуму содержания основной образовательной программы. Каждый раздел содержит методические рекомендации. В целях проверки степени усвоения материала по разделам дисциплины составлены тестовые задания по разработанным нами Правилам [6].

Тематическая структура аттестационно-педагогических измерительных материалов

(АПИМ) представлена в виде дидактической единицы ГОС, то есть по разделам дисциплины «Механика грунтов». Для каждого задания даны варианты ответов, из которых надо выбрать один.

Тематическая структура АПИМ и правильные варианты ответов на задания приведены в приложении работы [7].

Проведенный в марте 2009 года интернет-экзамен по дисциплине «Механика грунтов» в Серпуховском филиале Московского института коммунального хозяйства и строительства (МИКХиС) показал какие именно понятия усвоил (или не усвоил) студент.

После тестирования система была способна проконсультировать обучаемого по каждому элементу знаний. Кроме того, она могла автоматически генерировать сценарии дополнительного обучения по результатам тестирования.

Таким образом, полученные результаты послужили началу широкомасштабному внедрению элементов дистанционного обучения в учебный процесс не только по дисциплине «Механика грунтов», но и других предметов.

Список литературы

1. Петухов А.Г. Отчет по теме НИР: «Исследование и разработка учебно-методических материалов на электронных носителях для реализации дистанционного обучения по дисциплинам кафедр: «Инженерные дисциплины», «Математических и естественнонаучных дисциплин», договор № 20-07 в/в, раздел 5. – Серпухов, 2008. – С. 36–42.
2. Петухов А.Г. Отчет по теме НИР (заключительный), договор № 20-08 в/в, раздел 5. – Серпухов, 2009. – С. 41–59.
3. Петухов А.Г., Гаврилов А.В., Ковалева Л.М. Механика грунтов. Методические указания к курсу, задания и методические указания к контрольной работе для студентов III курса направления подготовки 270800 – «Строительство», дисциплина «Механика грунтов». – М.: ИПЦ МГАКХиС, 2011. – 47с.
4. Петухов А.Г., Ковалева Л.М., Макаров С.А. Механика грунтов. Методические указания к курсу. Задания и методические указания контрольной работе для студентов III курса направления подготовки 270800 – «Строительство», дисциплина Механика грунтов», профиль: «Водоснабжение и водоотведение», «Теплогазоснабжение». – М.: ИПЦ МГАКХиС, 2011. – 48 с.
5. Петухов А.Г., Меньшикова В.Ф. Исследование и аналитическое обоснование возможности прогнозирования учебных программ по геотехнике (на примере дисциплины «Механика грунтов» в системе дистанционного обучения): сб. научных работ (Актуальные проблемы современного образования и науки. Вып. 1 / под ред. Ю.А. Холодкова, А.Л. Шиловой. Серпуховский филиал ИДО МГСУ. – Серпухов, 2014. – С. 37–38.
6. Угрозова Е.А., Петухов А.Г. Разработка правил составления тестовых заданий системы дистанционного обучения. Строительство – формирование среды жизнедеятельности: сборник трудов XVII Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистров, аспирантов и молодых ученых (Москва, 23–25 апреля 2014 г.) / М-во образования и науки Росс. Федерации, Московский гос. строит.ун-т. – М.: МГСУ, 2014. – С. 412–416.
7. Петухов А.Г., Меньшикова В.Ф., Зуев В.П. Механика грунтов в системе дистанционного обучения учебное пособие. – М.: ИПЦ МГАКХиС, 2012. – 67с.
8. Федотов И.П., Звягин А.В. Система дистанционного обучения «Виртуальный профессор». – М.: ИПЦ МИКХиС, 2007. – 14 с.

УДК 629.5

ИННОВАЦИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ СУДОВ И СРЕДСТВ ОКЕАНОТЕХНИКИ

Рашковский А.С., Воленюк Л.С.

*Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова,
Николаев, e-mail: alexrash@trion.mk.ua*

При традиционном спуске судов с наклонных продольных стапелей, судно устанавливается на специальные спусковые устройства. Их установка и раскрепление между собой и к судну отличается высокой трудоемкостью и продолжительностью. Одним из прогрессивных способов спуска судов на воду с таких стапелей является спуск на пневматических баллонах. Для применения такого способа спуска требуется затратная реконструкция существующих стапелей. Для ремонта судов используются цельнометаллические или композитные плавучие доки. Композитные доки экономичнее цельнометаллических, поскольку вес металла для его строительства в 2,0...2,5 раза меньше, а стоимость строительства на 15...20% меньше. В статье приведены результаты исследований по мало затратной реконструкции существующих продольных наклонных стапелей для возможности спуска с них судов на пневматических баллонах; по совершенствованию подготовки производства в судостроении и технологии строительства композитных плавучих доков, по модульным принципам проектирования и строительства композитных плавучих доков различной подъемной силы до 50 тыс. т.

Ключевые слова: продольный наклонный стапель, спуск судов на баллонах, подготовка производства, композитный плавучий док, модульные доки

INNOVATIONS IN CONSTRUCTION OF SHIPS AND OCEAN TECHNOLOGY MEANS

Rashkovsky A.S., Voleniuk L.S.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, e-mail: alexrash@trion.mk.ua

In the traditional ships launching from the longitudinal inclined slipways, a ship is set to the special launching gears. Their installation and detachment among each other and to the vessel is characterized by the high labor intensity and duration. One of the progressive ways of the ship launching on the water from such slipways is the launching on the pneumatic cylinders. Using this method of launching requires the costly reconstruction of the existing slipways. For the repair of vessels all-metal or composite floating docks are used. Composite docks are more economically viable than all-metal ones, since the weight of the metal for its construction is 2,0...2,5 times smaller, and the cost of construction is by 15...20% less. The article lists the results of research on a low-cost reconstruction of the existing inclined slipways for the possibility of launching of ships from them on pneumatic cylinders; on the improvement of the preparation for production in the shipbuilding and construction technology of composite floating docks, on modular principles of design and construction of composite floating docks with different lifting force up to 50 thousand tons.

Keywords: longitudinal inclined slipway, launching on the pneumatic cylinders, preparation for production, composite floating docks, modular docks

Спуск судна на воду завершает его строительство на стапеле. Спуск с наклонных стапелей является наиболее ответственным технологическим процессом в строительстве судна. При спуске судна с наклонных продольных стапелей оно устанавливается на специальные сложные металлоемкие спусковые устройства. Одним из прогрессивных способов спуска судов с наклонных продольных стапелей является спуск на пневматических баллонах. Проведенные исследования показали возможность спуска судов с существующих продольных наклонных стапелей при минимальных затратах на их реконструкцию.

Плавучие доки большой подъемной силы находят широкое применение при ремонте морских судов большого дедвейта и размерений. Наиболее востребованными являются экономичные композитные пла-

вучие доки, состоящие из железобетонного монолитного понтона и двух сплошных стальных башен. В результате проведенных исследований по проектированию и технологии строительства таких доков решен ряд задач, не имеющих аналогов в мировой практике докостроения.

Основное содержание

Спуск судна на воду является неотъемлемой частью технологического процесса строительства, завершающего его сборку и оборудование на построечном месте. Спуски судов могут быть условно разделены на управляемые (с горизонтальных стапелей с применением слипов, плавучих или сухих доков, судоподъемников, подъемных кранов) и неуправляемые (с наклонных продольных или поперечных стапелей) [6].



Рис. 1. Схема поперечного сечения продольного наклонного стапеля:
1 – железобетонное основание стапеля; 2 – спусковые дорожки; 3 – рыбина; 4 – крепление рыбины

Общепринято, что спуск судов на воду с наклонных продольных стапелей является одним из наиболее старых, надежных и широко используемых способов спуска. Он представляет собой движение судна по наклонной плоскости стапеля под действием собственной силы тяжести после освобождения его от задерживающих устройств. Наклонный продольный стапель – это сложное инженерное сооружение, имеющее железобетонное основание для размещения спусковых дорожек и углубления между ними для установки опорных устройств при строительстве корпуса судна (рис. 1). Он располагается перпендикулярно береговой линии с уклоном $1,5 \dots 3,5^\circ$ и имеет надводную и подводную части [4].

рожки устанавливают специальные щиты из антифрикционной пластмассы.

Одним из прогрессивных способов спуска судов с наклонных продольных стапелей является спуск на пневматических баллонах (рис. 3). Он представляет собой движение судна по стапелю за счет вращения баллонов, на которые оно установлено [13, 30, 31].

Пневматические баллоны – это цилиндры с конусообразными оконечностями, состоящие из внутреннего и наружного слоев резины и слоя синтетического армирующего корда. Такие баллоны используются для спуска и съема с мели судов, подъема и перемещения затонувших

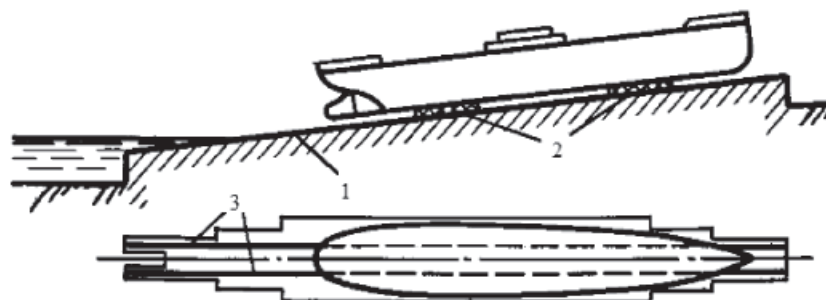


Рис. 2. Условное изображение судна на наклонном продольном стапеле:
1 – стапель; 2 – спусковые устройства; 3 – спусковые дорожки

При традиционном спуске судов с наклонных продольных стапелей, судно устанавливается на специальные спусковые устройства, которые раскрепляются между собой и закрепляются к судну (рис. 2). Выбор типа спускового устройства является одной из важных и сложных проблем, так как основные конструктивные решения, касающиеся его необходимо принять с учетом характера воспринимаемых нагрузок, возникающих при спуске, места и протяженности устройства под судном [4]. Для уменьшения силы трения скольжения между спусковыми дорожками и спусковыми полозьями наносится специальный состав – насалка или на до-

объектов. В настоящее время на пневматических баллонах спускают суда водоизмещением не более 60 тыс. т [8].

Спуск судна на пневматических баллонах имеет ряд преимуществ перед традиционным спуском с наклонных продольных стапелей. Одним из наиболее существенных преимуществ являются невысокие требования к поверхности стапелей. Она должна быть плоской и может быть выполнена из металла, бетона, дерева, крупного песка или мелкого щебня, что позволяет экономить на строительстве или реконструкции построечного места. Другим преимуществом является отсутствие сложных и дорогостоящих спусковых устройств.



Рис. 3. Спуск судна на пневматических баллонах

Такой спуск судна может быть осуществлен на судостроительных заводах с существующих продольных наклонных стапелей. Для этого необходимо создать плоскую поверхность стапеля путем заполнения углубления между спусковыми дорожками (рис. 1) для возможности перекачивания по ней баллонов. Проведены исследования по созданию плоской поверхности стапеля путем полного демонтажа существующих дорожек или заполнения углубления между ними специальными металлическими или железобетонными проставками (рис. 4) [12, 28, 29]. В связи с высокой прочностью бетона полный демонтаж дорожек технологически очень сложный процесс.

стоимость изготовления и установки железобетонных проставок в 2...3 раза меньше, чем металлических [13].

Проведенный сравнительный анализ показал, что применение пневматических баллонов для спуска судов позволит уменьшить расходы на реконструкцию существующих наклонных продольных стапелей, изготовление и ремонт спусковых устройств, упростить технологию спуска, сократить время и затраты на подготовку к спуску.

В целях обеспечения безопасности спуска на практике иногда прикрепляют к судну специальные поплавки, увеличивающие силу плавучести при его входе в воду. Действие таких поплавков рассчитывается,

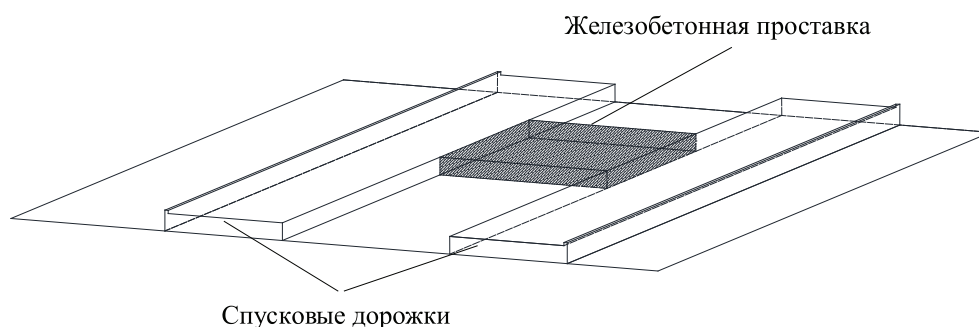


Рис. 4. Схематичное изображение спусковых дорожек с установленной железобетонной проставкой

Для оптимизации выбора проставок были взяты размерные характеристики одного из существующих стапелей и созданы модели типовых конструкций по следующим критериям: прочность, технологичность, стоимость изготовления и их установки. Результаты расчетов показали, что

добавляя для данного положения судна силу плавучести поплавков и абсциссу точки приложения этой силы. Аналогично можно рассчитать силу плавучести от пневматических баллонов.

Однако при расчете силы плавучести баллонов следует учитывать, что при

прохождении судном расстояния S , баллоны пройдут еще некоторое расстояние ΔS . Если принять оболочку баллона как нерастяжимую, то в соответствии с законами физики, расстояние, пройденное баллоном, составит $1/2S$. Тогда количество баллонов, оставшихся под судном и оказывающих влияния на его всплытие, будет равно

$$N = \frac{\frac{S}{2} + l}{d + \frac{\pi}{2}(D - d) + l},$$

где S – расстояние, пройденное судном; l – расстояние между баллонами; D – диаметр баллона; d – рабочая высота от поверхности стапеля до днища судна.

Зная количество баллонов, можно рассчитать силу их плавучести и создаваемый ими момент плавучести, которые служат для расчета диаграммы спуска. Выполненные расчеты показали, что дополнительная сила плавучести от пневматических баллонов, равномерно распределенная по днищу судна, уменьшает баксовое давление, возникающее в третьем периоде спуска.

Благодаря гибкости пневматических баллонов, при всплытии кормы их рабочая высота уменьшается за счет создаваемого на них давления и судно плавно входит в воду, что способствует значительному снижению баксового давления. Эта особенность баллонов имитирует использование поворотного копыла в носовой части судна и дает возможность ему не только поворачиваться, но и свободно всплывать носовой оконечности при погружении в воду [2, 3].

В последние годы большой популярностью на мировом рынке пользуются П-образные композитные плавучие доки большой подъемной силы (рис. 5) и новые виды плавучих железобетонных сооружений: жилые дома на воде (рис. 6), гостиницы, объекты развлекательного назначения (рис. 7), автостоянки, причалы для судов и работы с генеральными грузами, склады и хранилища, плавучие электростанции, средства освоения континентального шельфа, основания погружных буровых платформ, базы для экспедиционных рабочих, затапливаемые понтоны для оконтуривания искусственных грунтовых островов, дебаркадеры, припортовые волнозащитные сооружения и др. [9].



Рис. 5. Ремонтный композитный плавучий док



Рис. 6. Плавучий жилой дом на железобетонном понтоне



Рис. 7. Композитный плавучий ресторан

С конца прошлого столетия в мировом судостроении идет ускоряющийся процесс строительства все более крупных транспортных судов, в первую очередь танкеров дедвейтом 75...150 тыс. т, контейнеровозов на 10...15 тыс. контейнеров, судов для перевозки навалочных грузов дедвейтом 100...175 тыс. т, а также круизных лайнеров. Эта тенденция в развитии современного судостроения является весьма устойчивой, поскольку экономичность строительства и эксплуатации судов возрастает по мере роста их тоннажа вследствие уменьшения строительных и эксплуатационных расходов, отнесенных к 1 т дедвейта. Поэтому в связи с ростом дедвейта и размерений морских судов в судоремонте все большее применение находят ремонтные плавучие доки большой подъемной силы. Широко применяются цельнометаллические плавучие доки, срок службы которых из-за коррозии не превышает 25...30 лет. На них с определенной регулярностью проводится ремонт своих понтонов, во время которого док не может использоваться для докования судов. Для этой цели в течение полного срока службы металлический док выводится из эксплуатации для самодокования примерно на 5 лет [7].

Наиболее востребованным современным типом дока является композитный плавучий док большой подъемной силы, состоящий из железобетонного монолитного понтона и двух сплошных стальных башен. Композитные доки экономичнее цельнометаллических: расход стали на 1 т подъемной силы композитного дока и, соответственно, вес металла для его строительства в 2,0...2,5 раза меньше, а стоимость строительства на 15...20% меньше, чем у аналогичных цельнометаллических при сроке эксплуатации 60...70 лет. Железобетонные плавучие понтоны практически не подвергаются коррозии в морской воде, что существенно снижает расходы на их содержание и ремонт. Применение железобетонных понтонов позволяет исключить вывод дока из эксплуатации для ремонта его корпуса, в результате чего эксплуатационные расходы композитного дока меньше примерно на 70%, чем у металлического [21].

Создание композитных плавучих доков большой подъемной силы является весьма сложной проблемой для судостроения. Для ее решения необходимо совершенствование проектирования, оптимизация конструкции и разработка технически возможного и экономически выгодного способа строительства, применение современных систем контроля параметров при эксплуатации, технологичных и долговечных материалов, что позволит

значительно снизить себестоимость доков и создать рентабельную продукцию.

Специфика проектирования и технологии строительства композитных плавучих доков большой подъемной силы требует решения ряда задач, не имеющих аналогов в мировой практике докостроения. К ним можно отнести: совершенствование подготовки судостроительного производства; разработку математической модели процесса строительства дока; оптимизацию конструкции железобетонного понтона; разработку системы автоматизированного контроля параметров посадки и прочности дока; разработку технологии изготовления железобетонного понтона и строительства самого дока практически неограниченных размеров; разработку технологии сращивания крупногабаритных частей понтона на плавучих доках большой подъемной силы; исследование качки плавучего дока больших размерений на волнении при его транспортировании к месту базирования [10, 11].

Подготовка производства в судостроении является важным и сложным наукоемким процессом, требующим для своей реализации высокого организационно-технического уровня. Она является комплексной и представляет собой совокупность взаимосвязанных процессов разных видов работ и мероприятий и существенно отличается от аналогичных работ в других отраслях промышленности. Цель этой подготовки – обеспечить полную готовность завода-строителя к выполнению программы строительства объектов высшей категории качества в установленные сроки с заданными технико-экономическими показателями. Продолжительность подготовки производства часто соизмерима с длительностью строительства плавучего сооружения, при этом самый большой объем работ приходится на технологическую (ТПП, 48...50%) и организационную (ОПП, 15...17%) подготовку. Они обеспечивают технологическую и организационную готовность завода к строительству плавучего сооружения, а также заданный рост технического уровня производства. В результате реализации их функций создается комплект планово-технологической документации, обеспечивающей управление строительством плавучих сооружений [1, 19].

Основным способом строительства композитных плавучих доков и других железобетонных плавучих сооружений является сборный метод, который предполагает их формирование на стапеле из железобетонных секций, с последующим омоноличиванием стыков [23, 24].

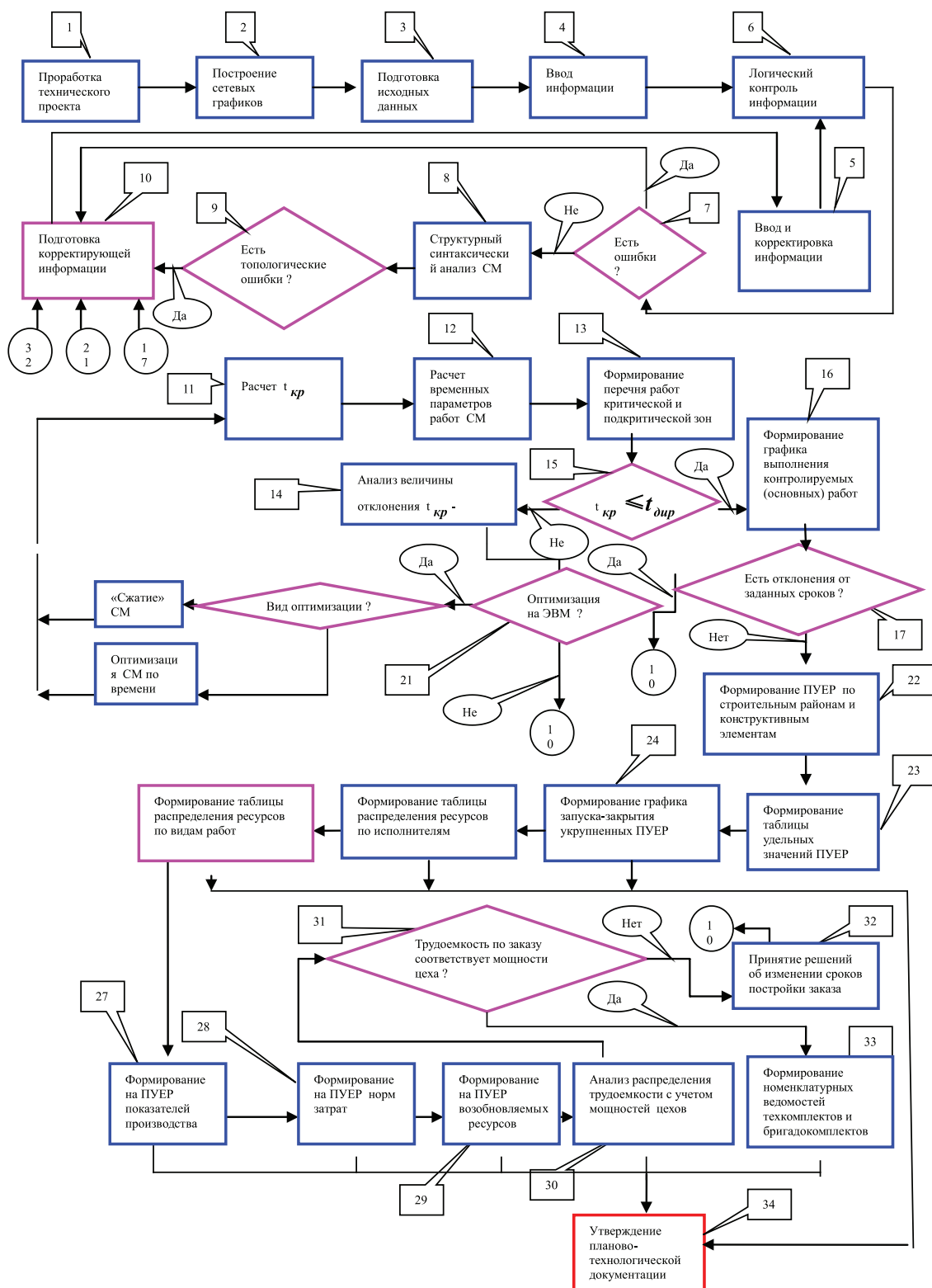


Рис. 8. Блок-схема основных организационных процедур ТПП

Специфической особенностью управления судостроительным производством является применение специальной системы планово-учетных единиц работ (ПУЕР). Создание в судостроении системы ПУЕР

обусловлено большой конструктивной сложностью и длительным циклом строительства судостроительных объектов, их необходимостью для организации планирования, учета, контроля и регулирования

производства. Система ПУЕР обеспечивает: охват всего количества работ по строительству заказов; технологическую последовательность и комплектность выполнения работ всеми подразделениями завода-строителя; планирование, контроль и учет выполнения работ; агрегацию информации по уровням управления; автоматизацию процессов информационной обработки производственных показателей. Задачи формирования календарных номенклатурных планов цехов решаются с использованием моделей, отображающих совокупности технологических комплектов строительства объектов [18, 20, 22]. Блок-схема основных организационных процедур при строительстве судостроительных объектов приведена на рис. 8.

Математически задачу технологической подготовки производства можно представить в виде формально-аналитической модели. В общем виде задача ТПП формулируется следующим образом: согласовать директивный срок и трудоемкость выполнения работ по строящемуся объекту с ресурсами цехов, чтобы выполнялось условие:

$$F = \left| L_j - \sum_{z=1}^z \sum_{T_0}^{T_{\text{дир}}} l_{iz} \right| \rightarrow \min \forall_i \in G(X, U);$$

$$X = \{x_i\}_{i=\overline{1,n}};$$

$$U = \{u_\alpha\}_{\alpha=\overline{1,p}}$$

при ограничениях:

$$1. t_j^{\text{кр}} \leq t_j^{\text{дир}};$$

$$2. \sum_{t=t_0}^{t=t_i} l_{iz} \leq l_j^z; \quad \forall_i \in [t_0, t_i];$$

$$3. t_i^{\text{н}}(k) < t_i(k) < t_i^0(k),$$

где $T_0, T_{\text{дир}}$ – сроки начала и окончания работ по объекту j соответственно; l_{iz} – плановая трудоемкость i -й работы сетевого графика $G(X, U)$; L_j – заданная трудоемкость постройки объекта j ; $t_j^{\text{кр}}$ – продолжительность критического пути объекта j ; $t_j^{\text{дир}}$ – продолжительность директивного пути объекта j ; l_j^z – допустимый уровень трудоемкости цеха z при выполнении работ по объекту j в интервале времени $[t_0, t_i]$; $t_i(k)$ – срок выполнения работы i , ограниченный интервалом времени $[t_i^{\text{н}}(k), t_i^0(k)]$.

В процессе реализации целей ТПП возможны различные постановки задач в зависимости от выбранного критерия оптимальности. Выбор критерия определяется технологией и характеристикой строящего-

ся плавучего сооружения. Выбранные критерии учесть одновременно невозможно, т.к. в этом случае задача ТПП становится неразрешимой. Формирование исходного графика строительства объекта представляет собой многошаговый процесс последовательного улучшения варианта распределения состава и трудоемкости работ по этапам строительства [20].

Проведены исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных плит понтона композитного дока с применением комплекса COSMOSWorks, ориентированного на выполнение на основе метода конечных элементов расчетного анализа конструктивно-однородных тел. При расчетах прочности плит стапель-палубы и днища понтона использована более уточненная расчетная схема по сравнению с применяемыми, учитывающая работу арматуры обоих направлений. Это позволило выработать обоснованные рекомендации по уменьшению диаметра арматуры, способствующие значительному снижению металлоемкости железобетонных конструкций и себестоимости дока [5, 17, 27].

Разработана не имеющая аналогов в мировой практике докостроения уникальная технология строительства композитных плавучих доков большой подъемной силы (от 8500 до 50000 т) и практически неограниченных размеров (длиной более 250 м, шириной более 50 м, высотой понтона до 7 м) из отдельных крупногабаритных частей с последующим бескессонным сращиванием железобетонного понтона по длине и ширине на плаву без подводно-технических работ. Такая технология может быть применена как на заводе-строителе доков, так и при необходимости на месте их эксплуатации [23].

Основным способом строительства доков является сборный метод формирования на стапелях частей железобетонного понтона из секций с последующим омоноличиванием стыков (рис. 9) и блочный метод формирования башен дока из заранее изготовленных секций с применением автоматической и полуавтоматической сварки под флюсом и в среде защитных газов. Повышение процента сборности (до 95%) корпуса железобетонного понтона и блочное формирование башен дока позволило перенести значительную часть работ в цехи и на предстапельную площадку, что существенно сократило объем стапельных работ, а также общую продолжительность и трудоемкость строительства доков [24].

С целью снижения толщины металла и возможной при этом потери устойчивости пластин, работающих на сжатие, на башнях

дока применена продольная система набора, что позволило значительно снизить металлоемкость конструкций и общий вес дока.

делений, помещения преобразователей дока предусмотрены укрупненные блоки массой до 50 т [23].



Рис. 9. Установка и раскрепление железобетонных элементов на понтоне плавучего дока подъемной силой 25000 т

Несмотря на экономическую целесообразность применения композитной конструкции плавучего дока, разработка и создание качественного конструктивного узла соединения металлической башни с железобетонным понтоном и эффективной технологии его изготовления явилось очень сложной задачей. Для отработки конструкции узла соединения металлической башни большой протяженности с железобетонным понтоном кроме вариантных расчетов было применено полунатурное моделирование, усовершенствована система анкерования закладных деталей и обеспечено повышенное сцепление бетона корпуса понтона с ними.

До установки на понтон блоков-секций в них устанавливают основное корпусное насыщение и производят испытание внутрисекционных соединений на непроницаемость. После проведения испытаний устанавливают механизмы, трубопроводы и оборудование. Основной принцип, заложенный в технологию механомонтажных и трубомонтажных работ, — максимальный перенос подготовительных работ с дока в цехи и на достроечную набережную, применение модульно-агрегатного метода монтажа энергетических комплексов дока. В районах машинного и компрессорного от-

При больших длине (150...250 м) и ширине (30...50 м) дока невозможно строительство цельного железобетонного понтона. Его строят из двух и более частей с последующим их сращиванием на плаву. В результате проведенных исследований разработана уникальная технология бесконечного сращивания на плаву частей железобетонного понтона практически неограниченных размеров без проведения подводно-технических работ [10, 15], заключающаяся в следующем. Конструктивно узел сращивания частей понтона дока на плаву состоит из плит днищевой обшивки, имеющей в районе стыка приливы, облицованные швеллерами, между которыми расположено эластичное уплотнение из профильной резины (рис. 10).

Сращивание на плаву понтона требует высокой точности изготовления и позиционирования его частей в районе стыка (высота понтона достигает 6...7 м). При проведении сращивания на плаву частей понтона на них устанавливают и закрепляют парные балки с разъемными замковыми соединениями, которые фиксируют положение частей понтона дока как в вертикальной, так и горизонтальной плоскостях. Части железобетонного понтона балластируют до занятия ими положения на ровный киль при одинаковой осадке [26].

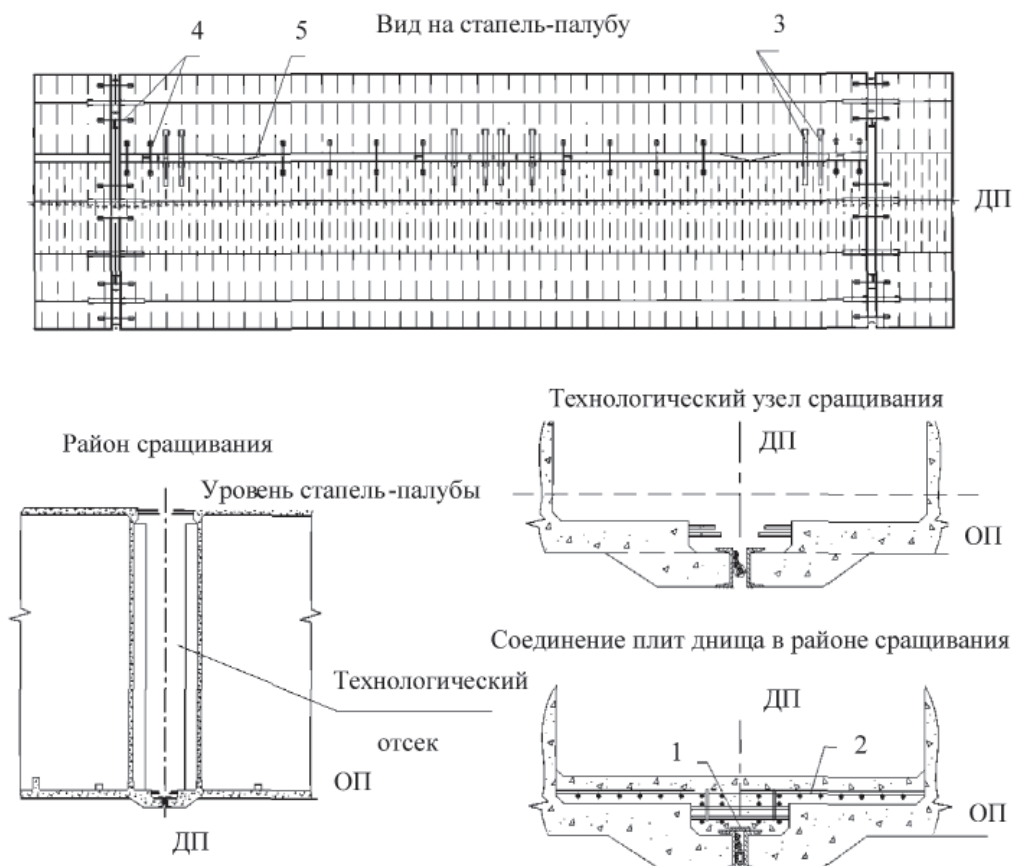


Рис. 10. Схема продольного срачивания полукорпусов железобетонного понтона
 1 – металлическая полоса, герметизирующая район срачивания;
 2 – арматурная сетка на стапель-палубе; 3 – парные центрующие балки с замковым соединением;
 4 – поперечные стяжки; 5 – продольные стяжки;
 ОП – основная плоскость; ДП – диаметральной плоскость

Устанавливают и закрепляют к достроенной набережной одну из частей дока, а к ней пришвартовывают вторую часть. Пришвартованную часть понтона балластируют до получения незначительного крена в сторону части дока, закрепленной к набережной (рис. 11). Затем балластируют обе части понтона до принятия ими проектного положения с учетом будущих смещений при проведении обжатия эластичного уплотнения. Для этого перед стыковкой частей

понтона в замковые соединения балок устанавливают специальные мерные прокладки.

Взаимное положение частей понтона регулируют с помощью поперечных и продольных стяжек. Для выполнения работ по сварке арматурных выпусков и бетонированию стыка в каждой из частей понтона предусмотрен специальный технологический отсек, который после стыковки превращается в единый отсек по всей длине. Обжатие эластичного уплотнения частей понтона

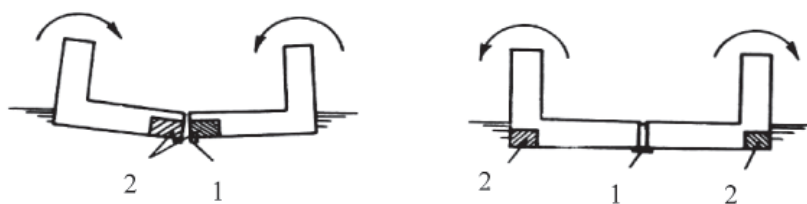


Рис. 11. Positioning of parts of a floating dock for jointing of the pontoon:
 а – предварительная установка частей дока перед срачиванием понтона;
 б – положение частей понтона при срачивании:
 1 – технологический узел срачивания частей понтона; 2 – балласт

по стыку днища осуществляют путем его вращения вокруг шарнира в результате откачки воды из отсеков понтона. Последующее обжатие стыка обеспечивают за счет принятия балласта в бортовые отсеки [26].

После бетонирования днищевых и торцевых стыков производят работы по омоноличиванию стыков стапель-палубы и поперечных переборок. Параллельно с бетонированием днищевых плит армируют и бетонируют диафрагмы в районе стыка, сваривают арматурные выпуски в районе стыка на стапель-палубе. После достижения бетоном в диафрагмах не менее 50 % марочной прочности демонтируют парные балки и бетонируют стапель-палубу.

Разработанный способ сращивания железобетонного понтона композитного плавучего дока на плаву требует минимальных затрат на герметизацию и выполнение небольшого объема осмотровых водолазных работ. Бескессонное сращивание на плаву железобетонных понтонов композитного плавучего дока может быть как продольным, так и поперечным, и выполняется на акватории завода-строителя дока. По разра-

ботанной технологии может быть изготовлен понтон практически для любых плавучих сооружений.

Построенные по разработанной конструкции и технологии доки в течение ряда лет поставлены на экспорт: в Алжир, Анголу, Болгарию, Вьетнам, Египет, Йемен, Катар, Россию, Северную Корею, Южную Корею, Турцию, Финляндию, Югославию, Японию.

На основе анализа возможности обслуживания судов различных типов и размеров разработан модульный принцип проектирования и строительства композитных плавучих доков различной подъемной силы из унифицированных конструкций (рис. 12). Для создания такого ряда определен док минимальной длины, на котором рационально размещены все функциональные помещения и механизмы. При необходимости строительства дока большей подъемной силы размеры (длина и ширина) основного дока могут быть увеличены с помощью дополнительных понтонов-приставок, которые сращиваются на плаву, и дополнительных участков башен [16, 25].

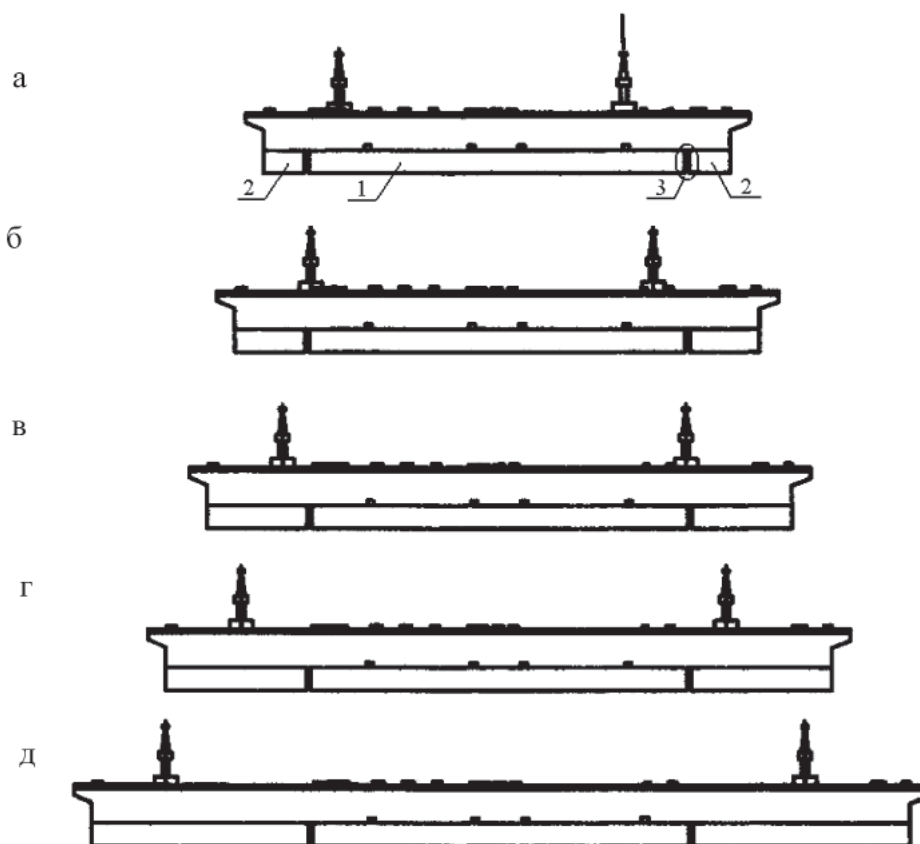


Рис. 12. Конструктивный ряд модульных композитных плавучих доков различной подъемной силы: а – 8500 т; б – 25000 т; в – 30000 т; г – 40000 т; д – 50000 т;

1 – базовый модуль; 2 – модуль-приставка;

3 – узел соединения понтонов модулей в единый понтон дока

Проведенные исследования и конструкторские разработки позволили создать новое поколение композитных плавучих доков, отвечающих всем современным требованиям мирового рынка продукции судостроения. Доки имеют автоматизированную систему управления механизмами, электронные системы определения уровня воды в балластных цистернах крена и дифферента, прогиба дока при перегоне и эксплуатации, являются экологически более безопасными, чем их предшественники. Применение таких решений выгодно отличает разработанную технологию строительства композитных плавучих доков от зарубежной.

За создание, освоение производства и широкое внедрение новых конкурентоспособных на мировом рынке композитных плавучих сооружений отечественной конструкции группе ученых и специалистов присуждена Государственная премия Украины в области науки и техники 2007 года.

Список литературы

1. Арью А.Р. Комплексная подготовка производства в судостроении. – Л.: Судостроение, 1988. – 336 с.
2. Воленюк Л.С. Статическое исследование спуска судна на пневматических баллонах // Вестник СевНТУ, серия «Механика, энергетика, экология» – Севастополь: СевНТУ, 2014. – Вып. 147. – С. 109–114.
3. Воленюк Л.С. Исследование спуска судов на воду с помощью пневматических баллонов // MOTROL – Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – 2014. – Vol. 16. – № 2. – Р. 189–193.
4. Загайкевич Д.Н. Продольный спуск судов. – Л.: Судпромгиз, 1950. – 240 с.
5. Коростылев Л.И. Применение МКЭ при расчете прочности железобетонных конструкций понтона композитного плавучего дока / Л.И. Коростылев, С.Ю. Клименков, Н.Г. Слуцкий // 36. науч. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2009. – № 5 (422). – С. 19–25.
6. Курдюмов А.А. Спуск судов / А.А. Курдюмов, Ю.П. Белянин, А.А. Гайсенюк, М.К. Глоzman и др. – Л.: Судостроение, 1966. – 416 с.
7. Ловягин М.А. Плавучие металлические доки / М.А. Ловягин, В.М. Корсаков, Я.Б. Каганер // Судостроение – 1964. – 336 с.
8. Marine airbags [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://qingdaoyongtai.com>.
9. Мишутин А.В. Железобетонные плавучие сооружения и перспективы их использования // Вісник ОДАБА. – Одесса: «Астропрінт», 2002. – № 6. – С. 181–187.
10. Рашковский А.С. Проектирование, технология и организация строительства композитных плавучих доков большой подъемной силы: монография / А.С. Рашковский, Н.Г. Слуцкий, А.В. Щедролов, А.Н. Узлов; под ред. проф. А.С. Рашковского. – Николаев: Изд-во «Атолл», 2008. – 382 с.
11. Проективання, технологія і організація побудови композитних плавучих доків: навчальний посібник / О.С. Рашковський, О.В. Щедролов, Д.В. Єрмаков, О.М. Узлов; під заг. ред. проф. О.С. Рашковського. – Миколаїв: РАЛ-поліграфія, 2015. – 320 с.
12. Рашковский А.С. Усовершенствование спуска судов со стапеля «О» Публичного акционерного общества «Черноморский судостроительный завод» [Электронный ресурс] / А.С. Рашковский, Л.С. Смирнова // Электронное видання «Вісник НУК». – Миколаїв: НУК, 2012. – № 1.
13. Рашковский А.С. Исследования по созданию плоской поверхности продольных наклонных стапелей для спуска судов на пневматических баллонах / А.С. Рашковский, Л.С. Смирнова // 36. науч. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2013. – № 1. – С. 11–15.
14. Rashkovskiy S.A. Rolling resistance of marine airbags at the longitudinal inclined slipway during ship launching / S.A. Rashkovskiy, A.S. Rashkovskiy // International Shipbuilding Progress – Amsterdam The Netherlands. – 2014. – № 61. – С. 41–59.
15. Рашковский А.С. Инновационные технологии в строительстве композитных плавучих доков / А.С. Рашковский, Д.В. Ермаков // Судостроение и морская инфраструктура. – Николаев: НУК, 2014. – № 2 (2). – С. 93–104.
16. Рашковский А.С. Модульное формирование композитных плавучих доков / А.С. Рашковский, Д.В. Ермаков, Д. Син // 36. науч. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2014. – № 3. – С. 4–11.
17. Рашковский А.С. Совершенствование расчета прочности железобетонного понтона композитного плавучего дока / А.С. Рашковский, Л.И. Коростылев, Д.В. Ермаков // 36. науч. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2014. – № 5. – С. 27–36.
18. Рашковский А.С. Специфика подготовки производства для строительства композитных и железобетонных плавучих сооружений / А.С. Рашковский, Н.В. Цыкало, А.В. Щедролов // Судостроение и морская инфраструктура. – Николаев: НУК, 2015. – № 2(4). – С. 63–75.
19. Риммер А.И. Подготовка производства в судостроении. – Л.: Судостроение, 1976. – 253 с.
20. Слуцкий Н.Г. Разработка математической модели процесса строительства судов и композитных плавучих сооружений / Н.Г. Слуцкий, В.Ф. Ажищев // 36. науч. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2005. – № 1 (400). – С. 74–81.
21. Слуцкий Н.Г. Экономическая эффективность строительства и эксплуатации композитных плавучих доков большой подъемной силы / Н.Г. Слуцкий, А.С. Рашковский, Д.В. Ермаков // 36. науч. праць «Економіка: проблеми теорії та практики». – Дніпропетровськ: ДНУ, 2007. – Вип. 232. – Т. III – С. 614–621.
22. Слуцкий Н.Г. Комплексная подготовка производства при строительстве композитных плавучих доков на ХГЗ «Паллада» / Н.Г. Слуцкий, А.С. Рашковский // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научн. трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2007. – Вып. 33. – С. 276–28.
23. Слуцкий Н.Г. Разработка технологии строительства композитных плавучих доков большой подъемной силы // 36. науч. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2007. – № 3 (414). – С. 3–10.
24. Слуцкий Н.Г. Опыт строительства композитных плавучих доков большой подъемной силы на ХГЗ «Паллада» / Н.Г. Слуцкий, А.С. Рашковский // Рибне господарство України. – Керчь: КГМТИ, 2007. – № 3–4. – С. 44–46.
25. Слуцкий Н.Г. Модульное формирование композитных плавучих доков больших габаритных размеров / М.Г. Слуцкий, В.Н. Коннов, А.С. Рашковский // Materiały II międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Perspektywiczne opracowania nauki i techniki – 2007». T. 10. Techniczne nauki. – Przemysł: Nauka i studia, 2007. – Р. 31–34.
26. Слуцкий Н.Г. Бескессонное сращивание частей железобетонного понтона на плаву // Современные направления теоретических и прикладных исследований 2008: сб. научных трудов по материалам международной научно-практической конференции. Том 1. Транспорт. – Одесса: Черноморье, 2008. – С. 27–31.
27. Слуцкий Н.Г. Оптимизация железобетонных конструкций понтона композитного плавучего дока // 36. науч. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2009. – № 4 (421). – С. 78–83.
28. Смирнова Л.С. Совершенствование спуска судов на воду с наклонных продольных стапелей на судостроительных заводах г. Николаева // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали II міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2011. – С. 50–51.
29. Смирнова Л.С. Совершенствование технологии спуска судов с продольных наклонных стапелей // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. – Миколаїв: НУК, 2013. – С. 48–51.
30. Смирнова Л.С. Перспективы совершенствования спуска судов с наклонных продольных стапелей / Л.С. Смирнова, Н.Б.Т. Фам, Н.З. Дао // Перспективна техніка і технології – 2013: матеріали IX міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. – Миколаїв: МНАУ, 2013. – С. 184–187.
31. Смирнова Л.С. Анализ спуска судов с наклонных продольных стапелей // Матеріали IV міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2013. – С. 62–64.

УДК 550.34: 551.5

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ

Ярошевич М.И., Ингель Л.Х., Лысенко Д.А.

*Научно-производственное объединение «Тайфун», Обнинск,
e-mail: yarosh@rpatyphoon.ru, lev.ingel@gmail.com, lysenko@rpatyphoon.ru*

Давно известно, что атмосферные процессы, вообще говоря, приводят к генерации сейсмических сигналов. Однако в течение длительного времени сейсмологи рассматривали их только в качестве шума. В последние годы, появились дополнительные причины для исследования таких сигналов. Представляют интерес два различных аспекта: 1. Использование сигналов с малой амплитудой. Сейсмические сигналы, как источник информации (оперативная регистрация опасных явлений, мониторинг, системы предупреждения, прогнозирования для очень коротких периодов времени). 2. Сильные эффекты – возможное влияние атмосферных процессов на сейсмическую активность. Таким образом, необходимо исследовать сейсмические проявления атмосферных процессов как в качестве полезных сигналов так и в качестве помех. В обзоре представлены некоторые из относящихся сюда результатов авторов за последние годы.

Ключевые слова: сейсмика, интенсивные атмосферные процессы, грозы, конвективные облака, торнадо, тропические циклоны

SEISMIC MANIFESTATIONS OF THE ATMOSPHERIC PROCESSES

Yaroshevich M.I., Ingel L.Kh., Lysenko D.A.

*Research and Production Association «Typhoon», Obninsk,
e-mail: yarosh@rpatyphoon.ru, lev.ingel@gmail.com, lysenko@rpatyphoon.ru*

It is known long ago that atmospheric processes lead to generation of the seismic signals. But for a long time seismologists considered that only as a noise. In the recent years, the additional motivations appeared for study of such signals. There are two different aspects: 1. Using of signals with a low amplitude. Seismic signals as a source of information (prompt recording of hazardous phenomena, monitoring, warning system, forecasting for very short periods). 2. Dramatic effects – possible influence of atmospheric processes on a seismic activity. So, seismic manifestations of atmospheric processes are needed to investigate – both as such useful signals and as a noise. The article presents some of the relevant results of the authors of recent years.

Keywords: seismic, intensive atmospheric processes, thunderstorms, convective clouds, tornadoes, tropical cyclones

На первый взгляд, может показаться, что атмосферные процессы, как правило, слишком слабы, эфемерны, для того, чтобы заметно воздействовать на твердую земную кору. Но чувствительность современных сейсмических приборов позволяет достаточно уверенно регистрировать многие типы таких воздействий. Вероятно, первым, кто обратил внимание на сейсмические сигналы «атмосферного» происхождения, был российский академик Б.Б. Голицын, один из основоположников сейсмологии.

В течение долгого времени сейсмологи рассматривали сигналы гидрометеорологического происхождения как досадные помехи в их основной работе. Сейсмические приборы до сих пор, как правило, сознательно конструируются таким образом, чтобы такие сигналы «не замечать». Если они и изучались, то, обычно, лишь затем, чтобы лучше их отфильтровывать [1].

Но в последнее время становится все более понятным, что взаимодействием геосфер не следует пренебрегать. В частности, сейсмические сигналы в каких то случаях могут нести полезную информацию о гидрометеорологических процессах. Еще более интересно то, что воздействие таких процессов

на земную кору бывает не таким уж незначительным. Накапливается все больше свидетельств того, что земная кора бывает уязвимой по отношению к таким воздействиям, которые, таким образом, вообще говоря, могут влиять и на сейсмический режим – на частоту и силу землетрясений.



Б.Б. Голицын (1862–1916)

Относящимся сюда вопросам посвящена уже довольно обширная литература. Не претендуя здесь на всестороннее ее освещение, мы предполагаем рассказать лишь о некоторых современных исследованиях и результатах. На базе институтов г. Обнинска имеются уникальные возможности одновременного анализа и сопоставления данных метеорологических наблюдений и сейсмических сигналов, связанных с атмосферными явлениями. Здесь располагается Геофизическая Служба РАН с сейсмической станцией и обширным архивом сейсмических данных, непрерывно пополняемым данными мировой сети. Следует упомянуть также Институт экспериментальной метеорологии (ИЭМ), входящий в «НПО «Тайфун», располагающий Высотной (300 м) метеорологической мачтой (ВММ) и ВНИИГ-МИ (Институт гидрометеорологической информации Росгидромета) с соответствующим архивом. Использование этих возможностей позволило в последние годы получить ряд относящихся к данной проблеме полезных результатов. В соответствии с вышесказанным, можно говорить о двух существенно разных направлениях исследований:

- 1) регистрация и анализ слабых сейсмических сигналов, как источника информации об атмосферных процессах;
- 2) исследование влияния интенсивных атмосферных явлений на сейсмическую активность.

Облака как источники сейсмических сигналов

Наибольший интерес могли бы представлять перспективы оперативной регистрации сейсмических сигналов от достаточно интенсивных, опасных, атмосферных явлений, таких как смерчи или шквалы (см. ниже). Одна из наиболее трудных проблем на этом пути – выявление полезных сигналов на фоне помех. Если тот же смерч проходит, скажем, в 10 км от сейсмостанции, то гораздо ближе к ней, может происходить, например, гроза или просто «проплывать» интенсивные облака. А есть ещё внутренние гравитационные волны, распространяющиеся в атмосфере на большие расстояния от тех же гроз и других интенсивных конвективных явлений [2]. Будут ли заметны сейсмические сигналы от удаленного смерча на фоне «шума» от более слабых, но зато более близких источников? В этой ситуации требуется изучать не только полезные сигналы, но и возможные источники помех.

Сейсмическая станция «Обнинск» находится на окраине города примерно в двух километрах от института, в котором работают авторы. Регистрируемые ею сейсмические сигналы можно отслеживать в Интернете в режиме реального времени. Авторы давно заметили, что когда за окном темнеет (над городом «проплывает» густая туча), это обычно сразу отражается на сейсмограммах. Для интенсивных конвективных облаков характерны горизонтальные размеры порядка 3–5 км (разброс их масштабов вообще-то очень велик). Характерная скорость ветра – порядка 10 м/с. Таким образом, время прохождения облака над сейсмостанцией получается порядка 5–10 минут. Соответствующая изменчивость сигналов при прохождении конвективных облаков часто видна на сейсмограммах даже без специальной обработки – «невооруженным глазом».

Некоторое время назад авторы выполнили более подробное исследование [3]. Известно, что под интенсивными облаками атмосферное давление несколько отличается от «фона». Причина, прежде всего, в том, что облачная среда с отклонениями ее температуры, влажности, наличием капель и др. приводит к некоторым вариациям веса столба воздуха. А связанные с этим вариации давления, вообще говоря, приводят к горизонтально-неоднородным деформациям поверхности грунта. Естественно предположить, что это и является простейшей причиной низкочастотных сейсмических сигналов, регистрируемых при прохождении интенсивных облаков.

Пусть, например, температура столба воздуха высотой h превышает температуру окружающей среды на величину ΔT . Тогда вес такого столба меньше, чем в окружающей среде на величину порядка

$$\Delta p \approx gh\Delta\rho \approx \rho_0 g\alpha\Delta T, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения; α – термический коэффициент расширения воздуха ($\alpha = 1/T_0$); $\Delta\rho$ – амплитуда отклонения плотности в рассматриваемом столбе (использовано так называемое приближение Буссинеска [4], согласно которому $\Delta\rho \approx \rho_0\alpha\Delta T$), ρ_0 и T_0 – отсчетные значения плотности и абсолютной температуры соответственно. Если $\Delta T = 1$ К, $h = 3$ км, то получаем значение $\Delta\rho$ около 1 миллибара (100 Пс). В конвективных облаках амплитуды ΔT бывают и значительно большими; соответственно и амплитуды возмущений приземного давления, по литературным данным, могут достигать нескольких миллибар [5]. Наши расчеты с использованием теории упругости показали, что порядки

амплитуд вертикальных деформаций грунта u можно грубо оценивать по формуле, внешне напоминающей закон Гука:

$$u \sim \frac{L \Delta p}{E}, \quad (2)$$

где L – горизонтальный масштаб области, в которой отклонено давление; E – модуль Юнга (почвы). Оценки показывают, что в случае интенсивных облаков амплитуда u может достигать и превышать несколько микрон, а это более чем достаточно для сейсмической регистрации. Имеются, конечно, и более «медленные» источники колебаний давления и деформаций грунта, например, атмосферные фронты и циклоны.

На сейсмостанциях используются датчики, регистрирующие смещения почвы в трех измерениях («вертикальный» и два «горизонтальных» сейсмографа). Интересно отметить, что низкочастотные сейсмические сигналы, о которых идет речь, более эффективно регистрируются не вертикальными, а горизонтальными сейсмографами [3]. Последние, в силу особенностей своей конструкции, на низких частотах действуют как относительно чувствительные наклонометры, регистрирующие, в частности, наклоны поверхности грунта, связанные с упомянутыми вариациями давления при перемещении облаков. Поэтому, если на высоких частотах (которые, в основном, интересуют сейсмологов) эти приборы призваны регистрировать горизонтальные смещения грунта, то на низких частотах они достаточно эффективно регистрируют вертикальные деформации.

В сейсмологической литературе нередко упоминается о сигналах «ветрового» происхождения [1]. Мы полагаем, что во многих таких случаях истинная причина сигналов – не ветер, а вариации давления. Дело в том, что горизонтальные градиенты давления, возникающие, например, под интенсивными облаками, приводят к возникновению воздушных течений (ветра). Когда ощущается этот ветер и одновременно регистрируются сейсмические сигналы, легко начинает казаться, что ветер и является причиной этих сигналов. В действительности, нередко деформации почвы и ветер коррелируют потому, что вызваны одними и теми же отклонениями давления. В то же время, достаточно сильный ветер, может, вообще говоря, генерировать и дополнительные сейсмические сигналы, не связанные непосредственно с отклонениями давления. Это может быть связано, например, с турбулентностью воздушных течений, воздействием ветра на сооружения и растительность. Разрушения, вызываемые сильными ветрами (например, падение деревьев), также могут

приводить к заметной генерации сейсмических сигналов, но сигналы различной природы, вообще говоря, сильно различаются не только по амплитуде, но и по частоте.

Грозы

В случае грозы к колебаниям давления и порывам ветра добавляются и некоторые другие, прежде всего, акустические эффекты. Остановимся на относительно недавнем эпизоде, подробно исследованном нами [6].

Вечером 28 декабря 2012 г. в г. Обнинске наблюдалось редкое явление – зимняя гроза. Во время сильного снегопада после 19 ч 30 м по местному времени, с интервалом примерно 2–3 минуты, дважды сверкнули молнии, сопровождавшиеся раскатами грома. В данном случае, поскольку молниевых разрядов зарегистрировано всего два (причем второй – относительно слабый) и имеется зафиксированная в ИЭМ магнитограмма, позволяющая указать время разрядов с точностью до секунды, существует редкая возможность точной «привязки» по времени и сопоставления метеорологических и сейсмических наблюдений. К тому же, в отличие от летних гроз, сопровождаемых сильными порывами ветра, в данном эпизоде ветер был относительно слабый, около 5 м/с. Это дает особые возможности изучения акустосейсмических эффектов при отсутствии сильных помех.

На Обнинской сейсмостанции регистрируются три проекции сейсмических сигналов (в вертикальном и в двух горизонтальных направлениях – север-юг и восток-запад) с частотой 20 опросов в секунду. Спектр регистрируемых сигналов, вообще говоря, очень широкий. Чтобы выявить и проанализировать сигналы различной природы, имеет смысл отдельно изучать различные участки этого спектра.

На рис. 1 приведены три проекции сейсмического сигнала (на всех сейсмограммах по оси ординат представлена амплитуда в относительных единицах) в области спектра 5–7 Гц за несколько десятков секунд до и после разряда молнии (верхняя сейсмограмма – вертикальная компонента, вторая – компонента восток-запад, третья – север-юг). Видны достаточно четко выраженные сигналы, несомненно, связанные с этим событием. Их продолжительность порядка 10 секунд.

Другого типа сигналы хорошо видны, если выделить низкочастотную часть спектра (рис. 2). Относительно сильные низкочастотные сигналы продолжительностью порядка 10 минут зарегистрированы преимущественно горизонтальными сейсмографами. Но заметный сигнал наблюдается в течение нескольких десятков минут, причем не только после разряда молнии, но и до него.

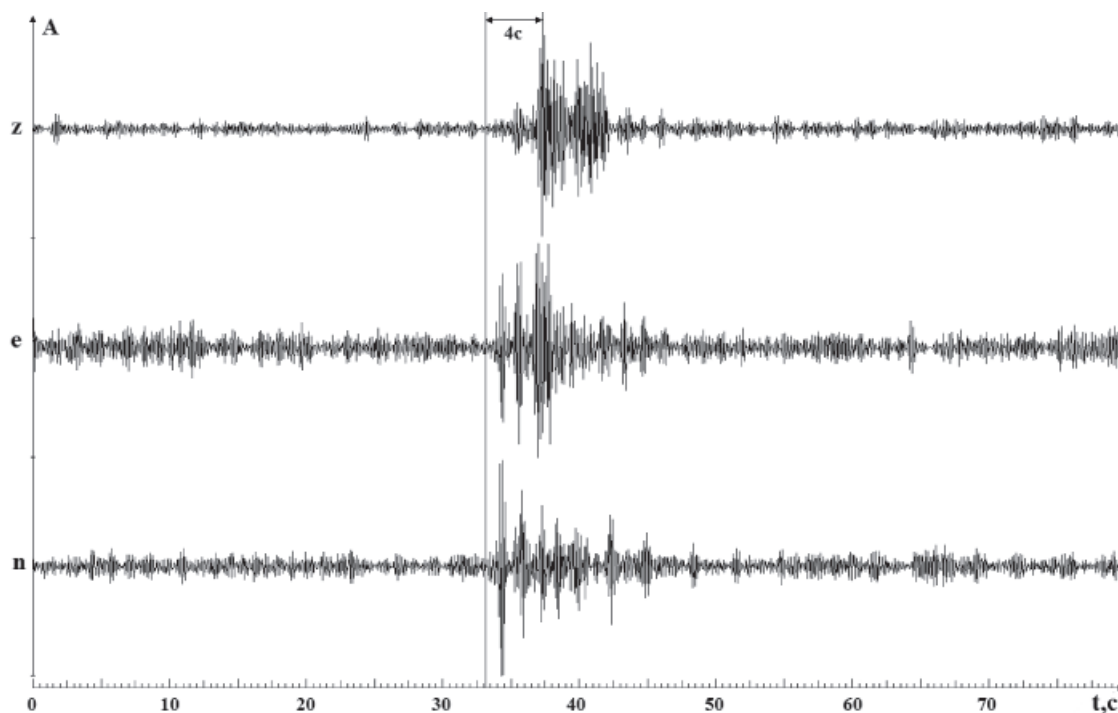


Рис. 1. Сейсмический сигнал при молниевом разряде. Левая вертикальная линия – момент разряда

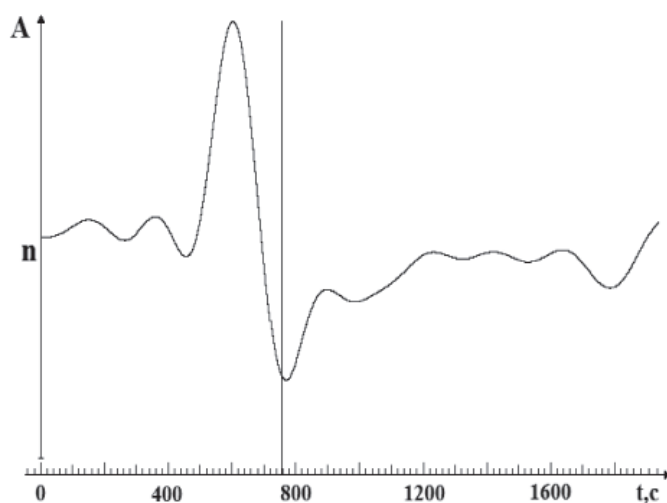


Рис. 2. Меридиональная проекция сейсмического сигнала в низкочастотной области (0,001–0,005 Гц)

В этот же период на Высотной метеорологической мачте ИЭМ зарегистрированы существенные вариации метеорологических параметров (рис. 3).

Весьма резкое (и сохранившееся затем) изменение температуры воздуха в период грозы зарегистрировано на всех уровнях измерений Высотной метеорологической мачты (8, 25, 73, 121, 217, 301 м). Поэтому имеются веские основания говорить о смене воздушных масс – гроза, по всей видимости,

была связана с прохождением атмосферного фронта. Это согласуется с известными и понятными представлениями о том, что грозы в зимних условиях могут происходить только при весьма резко выраженных атмосферных возмущениях достаточно больших масштабов и амплитуды. Насколько известно авторам, сведения о сейсмических проявлениях атмосферных фронтов к настоящему времени практически отсутствуют в литературе, за редким исключением [7].

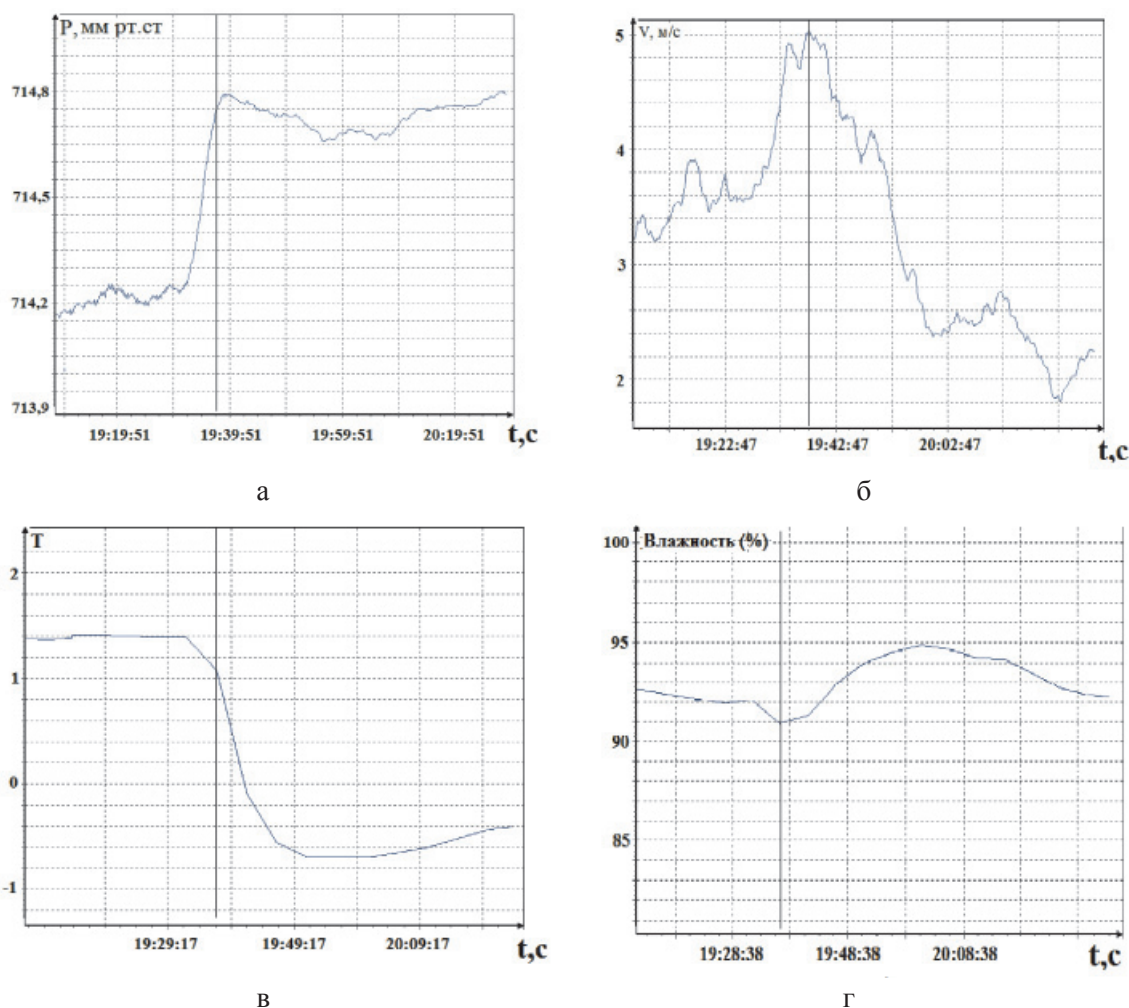


Рис. 3. Вариации метеопараметров на уровне 8 м:
а – атмосферного давления; б – скорости ветра; в – температуры; г – влажности.
Вертикальной чертой отмечено время разряда

Вариации давления (рис. 3, а) превышают 0,5 мм рт.ст., т.е. порядка 1 мб. Как отмечалось в предыдущем разделе, вариации давления такой амплитуды и продолжительности могут приводить к заметным низкочастотным сейсмическим сигналам, которые регистрируются, прежде всего, «горизонтальными» сейсмографами. Зарегистрированные сигналы согласуются с этими представлениями и численными оценками.

Высокочастотные и непродолжительные сейсмические сигналы, представленные на рис. 1, имеют, по всей видимости, существенно иную природу. Они, вероятно, отражают непосредственное воздействие акустических сигналов (гром) на поверхность грунта. Отметим, что в ряде недавних работ (например, [8]) сообщалось об экспериментальном обнаружении «эффекта акустосейсмической индукции» – воздействий инфразвука на поверхность Земли, реги-

стрируемых сейсмоприемниками в десятках километров от источников инфразвука.

Сигналы несколько запаздывают после разряда молнии (это, видимо, исключает их непосредственную связь с электромагнитными явлениями при разряде). Отметим, что времена запаздывания у вертикального и горизонтальных сейсмографов немного различаются (примерно на 4 с). В этой связи полезно иметь в виду, что регистрируемые ими сигналы складываются, как минимум, из двух различных составляющих. Одна из них – сигналы, связанные с непосредственным воздействием акустических волн на грунт вблизи сейсмодатчика. Другая – сейсмические волны, пришедшие из областей, более близких к месту молниевых разрядов (эти области раньше подвергались акустическому воздействию и от них распространяются сейсмические волны – гораздо быстрее звука в атмосфере).

Вертикальные и горизонтальные сейсмографы могут, вообще говоря, быть в разной степени чувствительными к этим двум типам воздействий.

Итак, анализ показывает, что существуют по меньшей мере два разных типа сейсмических сигналов и физических механизмов их генерации при подобных процессах. Один связан с относительно медленными (по сравнению с характерными временами обычно изучаемых сейсмических процессов) вариациями давления под облаками или при прохождении атмосферного фронта. Соответствующие деформации почвы столь же медленны и поэтому локализованы – практически не распространяются в виде сейсмических волн. Другой механизм генерации, видимо, связан с акустическими воздействиями.

Летние грозы характеризуются еще более сильными вариациями давления, и, как следствие, более интенсивными низкочастотными сигналами. Интенсивность молниевой активности также возрастает, и проанализировать отдельный удар грома становится затруднительно. Кроме того, летние грозы обычно сопровождаются сильными ветрами, которые вызывают сильные высокочастотные помехи, маскирующие сигналы от ударов грома.

Задача регистрации смерчей

Особое значение сейсмические сигналы «атмосферного» происхождения могут иметь в связи с проблемой регистрации смерчей и шквалов – интенсивных и опасных метеорологических явлений. Вследствие локальности и быстротечности таких

явлений, традиционными средствами очень часто не удается своевременно зарегистрировать даже сам факт их возникновения. Тем более затруднена задача прогноза их развития и перемещения после возникновения.

Смерчи (на Западе их обычно называют торнадо) представляют собой перемещающиеся интенсивные атмосферные вихри с вертикальной в первом приближении осью вращения (рис. 4). Горизонтальные размеры их обычно относительно малы – десятки метров (иногда на один-два порядка больше, иногда – на порядок меньше). Но перепады давления и концентрация кинетической энергии ветра в этих вихрях бывают очень велики, с чем и связаны жертвы и разрушения. Результаты прямых измерений в смерчах, как правило, отсутствуют (в частности, из-за того, что измерительные приборы не выдерживают таких ветровых нагрузок и разрушаются). Но по косвенным данным, скорости ветра могут достигать и превышать 100 м/с. Поэтому жертвы и разрушения бывают весьма значительными. Имеется много свидетельств не только о разрушенных, но и о поднятых в воздух домах, грузовых автомобилях, перевернутых вагонах и др. Продолжительность приземных ураганных ветров нередко составляет считанные минуты, но может быть и значительно больше, а в отдельных случаях достигает нескольких часов. Скорость перемещения смерчей чаще всего порядка нескольких десятков км/час (наблюдались существенные отклонения в ту или иную сторону). Соответственно, длина полосы разрушений бывает от десятков метров до (в отдельных случаях) сотен километров.



Рис. 4. Торнадо в шт. Небраска, США (заимствовано из [9])

Когда речь идет о столь быстротечных локальных явлениях, очевидно, особенно остро стоит вопрос об оперативном реагировании – прогнозе, регистрации, оповещении. Предупреждения, поступившие за одну или несколько минут до прихода ураганного ветра, уже может быть достаточно для заметного уменьшения числа жертв и ущерба. Но существующие методы пока очень далеки от решения подобных проблем. Из-за небольших горизонтальных масштабов и внезапности возникновения, рассматриваемые явления часто не удается своевременно обнаружить с помощью обычных средств – метеорологических локаторов (МРЛ) и спутниковых наблюдений. Например, широко известные «Ивановские» смерчи 9 июня 1984 г., приведшие к значительным жертвам и разрушениям, не были обнаружены МРЛ, хотя один из смерчей прошел вблизи от аэропорта Шереметьево. Не был обнаружен челябинский смерч 15 июня 1991 г., прошедший в 18 км от аэродромного локатора. Даже в США, где регистрации и прогнозу торнадо уделяется очень большое внимание и существует специальная служба, оснащенная современными доплеровскими радиолокаторами, одним из основных источников информации о появлении торнадо являются сообщения случайных наблюдателей. Но и в случаях, когда торнадо все же наблюдаются радиолокаторами, далеко не всегда удается зафиксировать важнейший факт соприкосновения интенсивного вихря с подстилающей поверхностью. (Торнадо чаще всего «спускаются» к поверхности из мощного «материнского облака», и основные разрушения начинаются не раньше их соприкосновения с подстилающей поверхностью). Если с момента этого соприкосновения начинается генерация сейсмических волн, которые с большой скоростью (до 3–5 км/с) распространяются по земной поверхности, то анализ сейсмических сигналов мог бы быть перспективным и даже уникальным способом дистанционной регистрации взаимодействия интенсивных локальных ветров с твердой поверхностью. Заметим, что такая регистрация в принципе может осуществляться сразу на ряде сейсмостанций.

В американской работе [10], вышедшей в середине 90-х годов было приведено около десятка свидетельств очевидцев торнадо, ощущавших колебания почвы иногда на существенных расстояниях от смерча. В частности, приводятся свидетельства профессионального метеоролога, занимающегося преследованием торнадо в качестве «хобби». Он дважды непосредственно ощущал колебания почвы, находясь на расстояниях порядка

мили от торнадо. Другой очевидец даже оценивает период колебаний почвы – в его случае он составлял порядка 10 с. Естественно предположить, что использование современной техники регистрации сейсмических сигналов должно давать возможность обнаружить подобные колебания заблаговременно и на достаточных расстояниях от источника. Имея в виду большую скорость распространения сейсмических сигналов, это означало бы заметное расширение возможностей своевременного обнаружения и оповещения о соответствующих опасных явлениях.

В работе [10] и некоторых последующих работах [11, 12] был выражен большой энтузиазм в связи с этими новыми возможностями. Оказалось, что еще в давней работе [13] проявления торнадо были обнаружены на сейсмограммах 1927 г.! В [11, 12, 14] был упомянут ряд эпизодов с сейсмическими сигналами, совпадающими по времени с торнадо в США, и в какой-то степени проанализированы некоторые из этих эпизодов. Авторы работы [10, 11] даже сообщили о создании коммерческой фирмы, призванной обеспечивать всех желающих недорогими портативными сейсмографами, способными оперативно сигнализировать о приближении торнадо. Но затем публикационная активность в этой области заметно упала. Мы не исключаем, что сейсмические сигналы, совпадающие по времени с торнадо, могли в каких-то случаях быть вызваны не непосредственно самими вихрями, а порождающими торнадо (или соседними) облачными системами, как это описано в первом разделе настоящей статьи. В таких случаях прогнозистическая ценность этих сигналов может быть невелика, поскольку, как упоминалось выше, медленные деформации грунта локализованы под соответствующими облаками и не генерируют достаточно интенсивные распространяющиеся сейсмические волны.

В конце февраля 2012 г. произошло событие, которое на некоторое время вызвало новый всплеск энтузиазма. Интенсивный торнадо прошел в США через большую и плотную сеть сейсмостанций (приготовленную для решения некоторых других сейсмологических задач). В течение одной-двух недель марта 2012 г. это вызвало множество сообщений и комментариев в Интернете (см., например, [15]). Сообщалось, в частности, о «необычных сигналах, зарегистрированных тремя сейсмостанциями». Но, возможно, в итоге это событие не привело к появлению какой-либо качественно новой информации: после многих поверхностных комментариев, пока не появились, насколько нам известно, серьезные научные публикации, относящиеся к этому эпизоду.

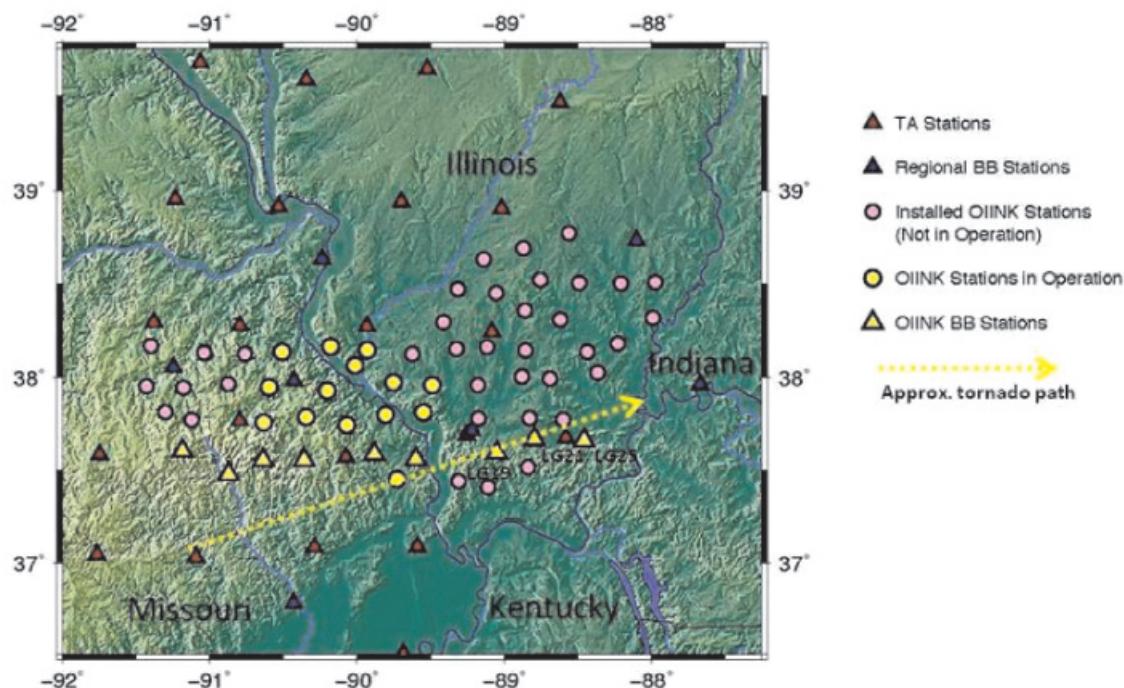


Рис. 5. Траектория торнадо, прошедшего 29 февраля 2012 г. через сеть сейсмостанций Университета штата Индиана (различные типы сейсмостанций обозначены разными треугольниками и кружками) [15]

Относительно недавно, 23 мая 2013 г., смерч прошел через г. Обнинск в 2–3 километрах от сейсмостанции (рис. 6). Появилась редкая возможность непосредственно оценить перспективы сейсмической регистрации смерчей. Авторы исследовали зарегистрированные сейсмические сигналы в период «жизни» смерча в различных частотных диапазонах (от 0,001 до 18 Гц). Заметные сигналы удалось обнаружить лишь на одной из «горизонтальных» сейсмограмм в частотном интервале 5–7 Гц (рис. 7).

В других частотных интервалах не удалось обнаружить заметные сигналы. Поэтому с точки зрения перспектив практического использования сейсмической регистрации смерчей, в целом, результат по этому эпизоду приходится расценивать, скорее, как отрицательный. В нашей стране, где повторяемость и интенсивность смерчей намного меньше, чем в США, вероятно, не стоит прилагать большие усилия для организации их сейсмического мониторинга.



а



б

Рис. 6. Любительская фотография обнинского смерча 23.05.13 (слева – Высотная метеорологическая мачта ИЭМ) (а); пни от поваленных деревьев у дома одного из авторов статьи, на расстоянии 2–3 км от сейсмостанции (б)

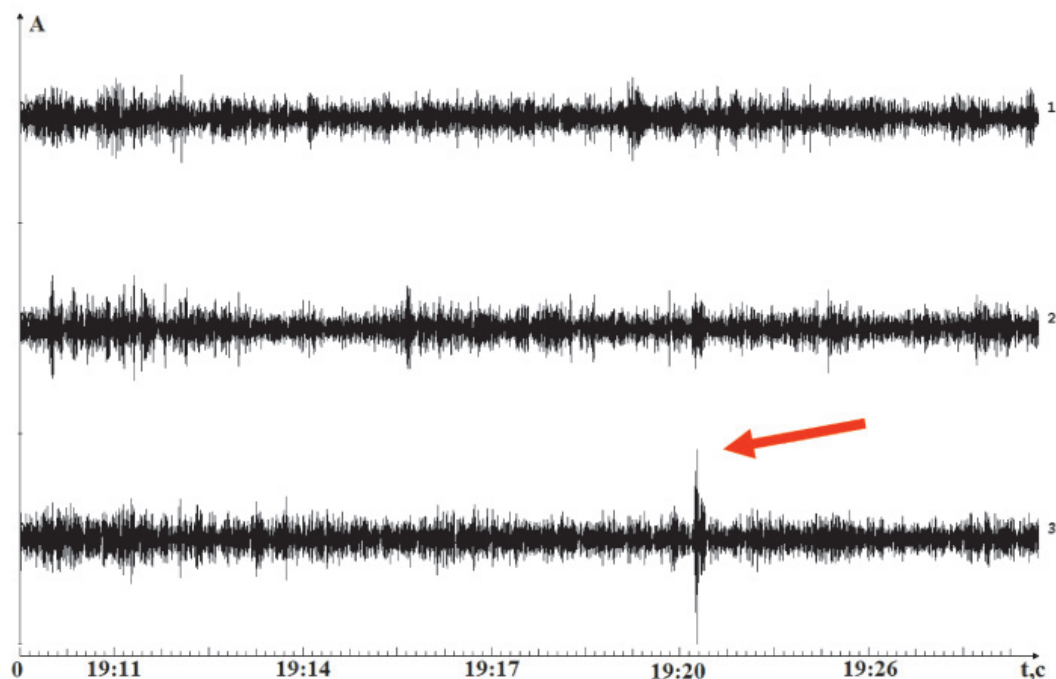


Рис. 7. Три проекции сигнала (сейсмостанция «Обнинск») в интервале 5–7 Гц.
Стрелкой обозначен сигнал, отвечающий времени прохождения смерча.
По горизонтальной оси отложено московское время

Тропические циклоны влияют на сейсмическую активность?

Уже несколько десятилетий изучаются «штормовые микросейсмы» – слабые сейсмические сигналы, связанные со штормами над большими акваториями. Во многих случаях генерацию штормовых микросейсм связывают с тропическими циклонами (ТЦ). Это – гигантские атмосферные вихри со

скоростями ветра до нескольких сотен километров в час (рис. 8). ТЦ относятся к числу наиболее опасных стихийных бедствий, отличаясь от циклонов умеренных широт несколько меньшими горизонтальными размерами, но гораздо большей интенсивностью (скоростью ветра, горизонтальными перепадами давления и осадками). В тихоокеанском регионе их принято называть тайфунами, а в Атлантике – ураганами.



Рис. 8. Тропический циклон Катарина, наблюдавшийся 26 марта 2004 г. на юге Атлантического океана около Бразилии. Фото Международной космической станции NASA

Физические механизмы генерации штормовых микросейсм – вопрос до сих пор во многом дискуссионный. Эти слабые, но далеко распространяющиеся сигналы не без успеха пытаются использовать в качестве одного из источников информации о тропических циклонах [16]. Объем настоящей статьи не позволяет на этом подробно останавливаться. Ниже речь пойдет о другом: не могут ли такие исключительно интенсивные процессы как ТЦ влиять на земную кору более существенно, например, «провоцировать» землетрясения. Тем более, что под Тихим океаном земная кора – относительно тонкая и «уязвимая». Здесь уместно отметить, что кинетическая энергия одного тропического циклона оценивается величиной в 10^{18} Дж – того же порядка, что суммарная годовая энергия всех землетрясений на земном шаре [18]!

К настоящему времени имеется ряд статистических исследований, которые поддерживают такие предположения [17–20]. Остановимся на некоторых относящихся сюда результатах.

Тропические циклоны возникают и «живут» над теплым океаном, поэтому их активность зависит от сезона (меняется и от сезона к сезону) и, конечно, от географических условий. Например, в Северном и Южном полушариях она, естественно, «находится в противофазе». Влияние циклонов на сейсмическую активность было бы подтверждено, если бы удалось выявить аналогичные зависимости и для землетря-

сений. Это сделано в ряде недавних работ одного из авторов [17–19].

Чтобы сопоставлять временные и пространственные вариации сейсмической и «циклонической» активности, необходимо, прежде всего, иметь количественные показатели того и другого. Показатели интенсивности сейсмической активности, основанные на энергии землетрясений разных классов, выработаны давно. В последние годы в работах автора [17–19] предложена система количественных показателей «циклонической» активности, основанная на интегральных оценках кинетической энергии циклонов. Это позволило сравнивать с ней сейсмическую активность в тех же регионах. На рис. 9 сопоставлен сезонный ход активности тропических циклонов и сейсмической активности в северо-западной части Тихого океана [18] для землетрясений различных классов (различных диапазонов магнитуды M^1). Нормировка разных количественных показателей активности различна и выбрана из соображений удобства сопоставления всех результатов на одном рисунке. Видно, что сейсмическая активность заметно скоррелирована с циклонической.

На рис. 10 сопоставляются вариации сейсмической и циклонической активности в течение 20 лет (перед 2007 г.) [19]. Результаты дают основания предполагать, что тропические циклоны, воздействуя на земную кору, «провоцируют» слабые землетрясения. Тем самым, они «разряжают обстановку», так что интенсивных землетрясений становится меньше.

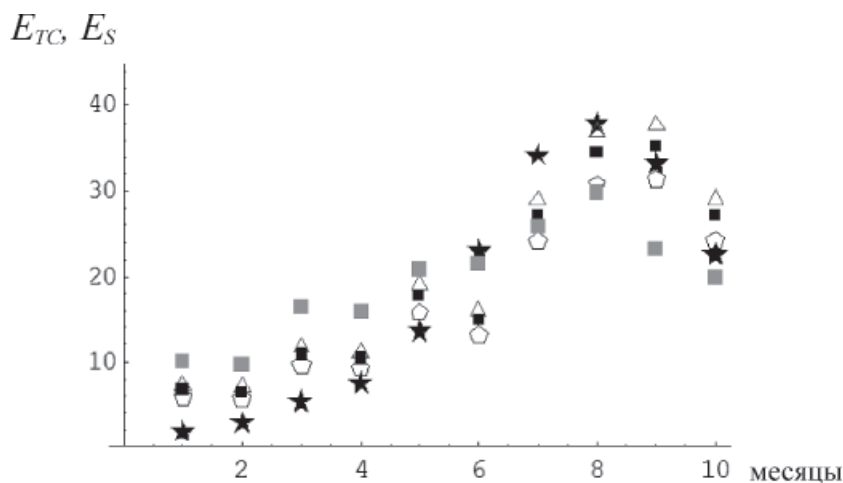


Рис. 9. Сглаженные графики среднемесячных значений циклонической активности E_{TC} рассчитанной по 1945–2007 гг. (обозначено звездами) и сейсмической энергии E_s для различных диапазонов интенсивности землетрясений: $M > 5$ (за период 1980–2007 гг., треугольники, $k = 5$); $M > 5.5$, (1980–2007 гг., черные квадраты, $k = 4.7$); $M \geq 6.0$ (1980–2007 гг., пятиугольники, $k = 4.2$); $M \geq 6.0$ (1963–2007 гг., серые квадраты, $k = 4.3$)

¹ Магнитуда землетрясения – условная величина пропорциональная логарифму энергии землетрясений.

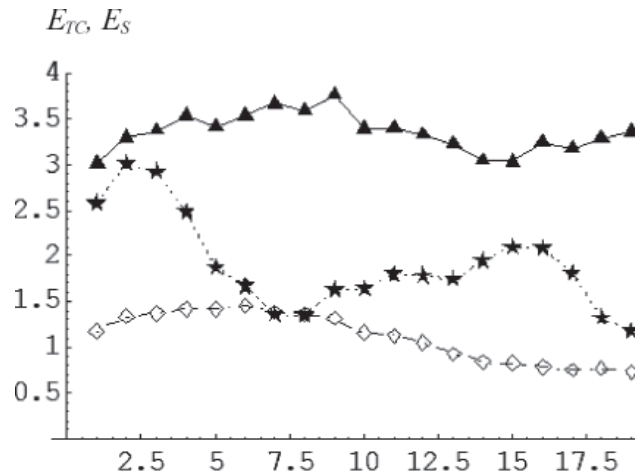


Рис. 10. Сглаженные графики различным образом нормированных сезонных значений циклонической активности E_{TC} (треугольники) и годовых значений сейсмической энергии E_S ($6 \leq M < 7$ – звезды, $4 \leq M < 5$ – ромбы)

Еще одно свидетельство влияния ТЦ на сейсмическую активность – заметная сезонная изменчивость последней над тропическим океаном по сравнению с аналогичными вариациями над континентом [19]. На рис. 11 представлены отношения суммарной сейсмической энергии за период с 1 июля по 30 сентября ($E_{S(7-9)}$) к той же величине за период с 1 января по 31 марта ($E_{S(1-3)}$). Значения суммарных энергий задаются диапазоном магнитуд до величины магнитуды, обозначенной на горизонтальной оси рисунка. Здесь максимальная магнитуда равна 6,2. Эти отношения сейсмических энергий, рассчитаны по территориям, ограниченными координатами: $[(15-45)^\circ N - (130-155)^\circ E]$ (кривая 1); $[(10-40)^\circ N - (120-150)^\circ E]$ (кривая 2; обе эти кривые относятся к области значительной циклонической активности над океаном); $[(25-40)^\circ N - (60-90)^\circ E]$ – (кривая 3 – Таджикистан, Афганистан, Па-

кистан и юго-восточные районы Туркмении и Узбекистана); $[(20-50)^\circ N - (55-100)^\circ E]$ (кривая 4 – восточная часть Туркмении, Узбекистан, Таджикистан, Киргизия, восточный Иран, Афганистан, Пакистан, частично Северная Индия, западный Китай, Монголия, юг Казахстана). Большая «изрезанность» графиков отношений энергий связана с тем, что с каждым шагом роста верхней границы диапазона магнитуд быстро падает число добавляемых землетрясений, но одновременно и сильно растет их энергетический «вес». Из графиков рис. 11 следует, что, по крайней мере, в диапазонах обозначенных магнитуд, в зонах действия тропических циклонов, в июле – сентябре, то есть в период интенсивной циклонической активности, сейсмическая активность увеличивается. Для континентальных же районов в эти месяцы сейсмическая активность, наоборот, понижается.

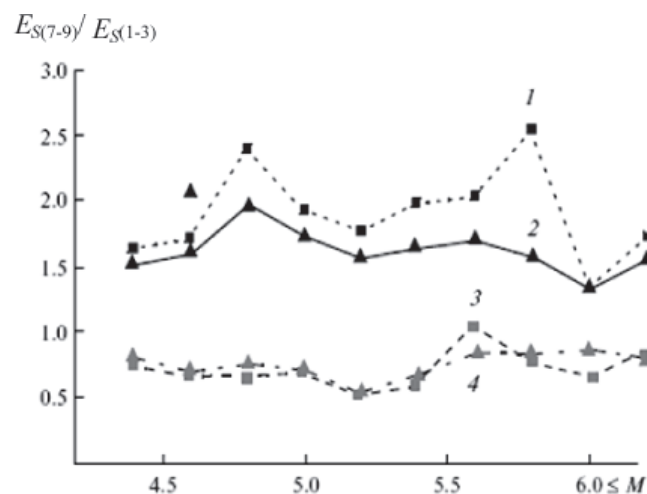


Рис. 11. Отношения суммарных сейсмических энергий землетрясений в зависимости от диапазона значений магнитуд и территорий

Другое показательное сравнение – зависимость сейсмической активности от широты при постепенном переходе от Южного полушария к Северному [18]. Исследовалась внутрисезонная динамика среднемесячных значений сейсмических энергий для одинаковых по площади акваторий, для разных широт. На рис. 12 приведены сглаженные графики среднемесячных энергий для шести акваторий, каждая размером $25 \times 25^\circ$. У этих областей одинаковые границы по долготе -120° Е, 145° Е. По широте самая южная территория ограничена 10° S и 15° N. Далее каждая последующая область смещается на север с шагом в 5° . В данном случае учитывались только землетрясения с $M \leq 6.5$, произошедшие в 1999–2008 гг. По мере смещения рассматриваемых областей на север заметно меняется характер графиче-

сков – все сильнее проявляется рост сейсмической активности в летне-осенние месяцы (кривые 4, 5, 6). В областях, в которых южные широтные границы расположены южнее экватора и на экваторе наблюдаются два усиления сейсмической активности: в летне-осенние месяцы и в начале года (кривые 1, 2, 3). При этом по мере «ухода» из Южного полушария на север сейсмическая активность в начале года постепенно ослабевает и усиливается летне-осенняя сейсмическая активность. Иначе говоря, рис. 12 демонстрирует, что сезонный ход сейсмической активности в Северном и Южном полушариях находится в противофазе, как и активность тропических циклонов.

В наших работах [21, 22] обсуждаются некоторые физические механизмы воздействия циклонов на сейсмическую активность.

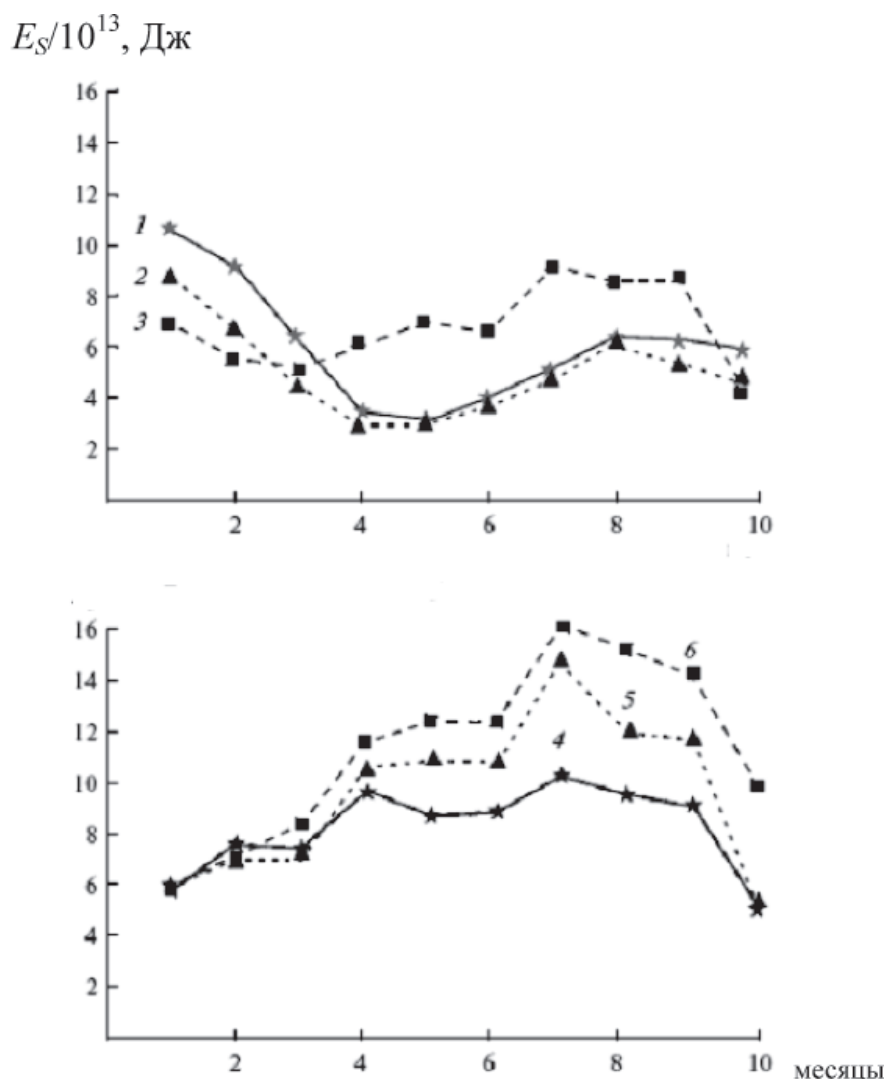


Рис. 12. Сглаженные годовые графики среднемесячных значений сейсмической энергии, рассчитанных по землетрясениям с $M \leq 6.5$, произошедшим в период 1999–2008 гг. [18]

Приведенные выше результаты позволяют сделать вывод, что атмосферные процессы не только приводят к генерации сейсмических сигналов, доступных для регистрации, но, видимо, могут влиять и на сейсмическую активность. Это представляет не только научный интерес – просматриваются перспективы и практического использования сейсмических сигналов, вызванных воздействиями атмосферных процессов, а также потребности учета воздействий таких процессов на сейсмическую активность – энергию землетрясений, их распределение по пространству и времени.

Список литературы

1. Феофилактов В.Д. Помехи в длиннопериодной сейсмометрии. – М.: Наука, 1977. – 100 с.
2. Природные опасности России. Т.5. Гидрометеорологические опасности / под ред. Г.С. Голицына и А.А. Васильева. – М.: Крук, 2001. – 296 с.
3. Ингель Л.Х., Ярошевич М.И., Бабкина В.Ф. О сейсмических проявлениях конвективной облачности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2004. – Т. 40. – № 5. – С. 689–695.
4. Гилл А. Динамика атмосферы и океана. – М.: Мир, 1986. – Т. 1. – 396 с.
5. Шметер С.М. Термодинамика и физика конвективных облаков. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 287 с.
6. Yaroshevich M.I., Ingel L.Kh., Lysenko D.A. On seismic manifestations of intensive atmospheric processes In: «Fluxes and Structures in Fluids». Proc. Intern. Conf. S.-Petersburg, June 2013. – М.: МАКС Пресс, 2013. – Р. 333–335.
7. Локтев Д.Н. Воздействие атмосферных фронтов на структуры земной коры // Сейсмоакустические эффекты при грозовой активности // Геофизика межгеосферных взаимодействий; под. ред. В.В. Адушкина. – М.: ГЕОС. 2008. – С. 79–86.
8. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками. – Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2004. – 387 с.
9. Пашицкий Э.А. Вихри вокруг нас // Природа. – 2011. – № 10. – С. 3–13.
10. Tatom F.B., Knupp K.R., Witton S.J. Tornado detection based on seismic signal // J. Appl. Meteorol. – 1995. – Vol. 34. – № 2. – P. 572–582.
11. Tatom F.B., Witton S.J. The transfer of energy from tornado into the ground // Seism. Res. Lett. – 2001. – Vol. 72. – № 1. – P. 12–21.
12. Vincent R.K. et al. Wavelet-packet transformation analysis of seismic signals recorded from a tornado in Ohio // Bull. Seism. Soc. Amer. – 2002. – Vol. 92. – № 6. – P. 2352–2368.
13. Kisslinger C. Seismograms associated with the near passage of tornadoes // J. Geophys. Res. – 1960. – Vol. 65. – № 2. – P. 721–728.
14. Ингель Л.Х., Феофилактов В.Д., Ярошевич М.И. Регистрация сейсмических сигналов, связанных с торнадо // Докл. РАН. – 2002. – Т. 386. – № 6. – С. 813–817.
15. <http://www.redorbit.com/news/science/1112490869/tornadoes-and-seismic-activity>.
16. Ebeling C.W. Inferring ocean storm characteristics from ambient seismic noise: A historical perspective // Advances in Geophysics. – 2012. – Vol. 53. – P. 2–32.
17. Ярошевич М.И. Некоторые особенности динамики циклонической и сейсмической активности в северо-западной части Тихого океана // Докл. РАН. – 2008. – Т. 421. – № 1. – С. 787–791.
18. Ярошевич М.И. Тропические циклоны как возможный фактор, влияющий на сейсмическую активность циклонической зоны северо-западной части Тихого океана // Изв. РАН. Физика Земли. – 2011. – № 7. – С. 80–85.
19. Ярошевич М.И. Тропические циклоны и сейсмическая активность циклонической зоны северо-западной части Тихого океана // Исследование Земли из космоса. – 2012. – № 3. – С. 66–77.
20. Соболев Г.А., Закржевская Н.А., Соболев Д.Г. К вопросу о влиянии циклонов на сейсмичность // Вулканология и сейсмология. – 2012. – № 2. – С. 27–38.
21. Гарагаш И.А., Ингель Л.Х., Ярошевич М.И. Об одном возможном механизме влияния атмосферных процессов на сейсмическую активность вблизи берегов океанов // Физика Земли. – 2004. – № 8. – С. 91–96.
22. Ингель Л.Х., Ярошевич М.И., Петрова Л.И. О механизме воздействия тропических циклонов на земную кору // Докл. РАН. – 2009. – Т. 425. – № 5. – С. 674–677.