

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

НАУЧНОЕ ОБОЗРЕНИЕ. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

№ 4

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 01.03.2015
Формат 60x90 1/8

Типография ИД
Издательский дом
«Академия Естествознания»,
440026, Россия, г. Пенза,
ул. Лермонтова, д. 3

Signed in print 01.03.2015
Format 60x90 8.1

Typography
Publishing House
«Academy Of Natural History»
440026, Russia, Penza,
3 Lermontova str.

Технический редактор Доронкина Е.Н.
Корректор Андреев А.М.

Тираж 1000 экз.
Заказ НО 2016/4

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. Старчигова (**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 по техническим наукам***

The issue contains scientific reviews, literary dissertation reviews,
problem and practical scientific articles, based on technical sciences

СОДЕРЖАНИЕ

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ БЕСПЛАТФОРМЕННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ <i>Волков В.Л., Жидкова Н.В.</i>	5
НАУЧНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ АВТОМОБИЛЯ, ОСНАЩЕННОГО СИСТЕМОЙ КУРСОВОЙ УСТОЙЧИВОСТИ <i>Денисов Ил.В., Терентьев И.А.</i>	13
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СУБЛИМАЦИОННОЙ СУШКИ В ПРОИЗВОДСТВЕ МЯСНЫХ ПРОДУКТОВ <i>Дондокова С.А., Битыева Э.Б., Антипов А.В.</i>	37
УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА И ДИФФУЗИИ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В ПРИЗЕМНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ <i>Равианов Н., Шарипов Д.К., Нарзуллаева Н.</i>	49
ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СЕЛИТЕЛЬНЫХ ЗОН КАК СОСТАВЛЯЮЩАЯ КАЧЕСТВА ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ <i>Саньков П.Н., Гилёв В.В., Макарова В.Н.</i>	60
ЭНДОГЕННОЕ ОБРАЗОВАНИЕ НАФТИДОВ В СВЕТЕ АБИОГЕННОЙ ТЕОРИИ ОБРАЗОВАНИЯ НЕФТИ <i>Симонян Г.С.</i>	77
НОВЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ НЕТОПЛИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА БУРЫХ И НЕКОНДИЦИОННЫХ УГЛЕЙ <i>Фазылов С.Д., Сатпаева Ж.Б., Нуркенов О.А., Карипова Г.Ж., Мулдахметов М.З., Животова Т.С., Мукашев А.Б.</i>	101
АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР РАБОТ ПО МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ, НА ПРИМЕРЕ СИСТЕМ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ <i>Юлдашев Б.Э.</i>	107
РОЛЬ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ В ФОРМИРОВАНИИ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ <i>Юров В.М., Гученко С.А., Лауринас В.Ч.</i>	124
РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА И ЕЕ СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ: НАУЧНЫЙ ОБЗОР 140 <i>Язвенко П.В., Воронов М.П.</i>	140

CONTENTS

FEATURES SIMULATION OF STRAPDOWN INERTIAL SYSTEMS <i>Volkov V.L., Zhidkova N.V.</i>	5
SCIENTIFIC BACKGROUND MANAGEMENT SYSTEM DEVELOPMENT OF TECHNICAL CONDITION OF VEHICLES EQUIPPED WITH VEHICLE STABILITY CONTROL <i>Denisov II.V., Terentyev I.A.</i>	13
THE USE OF FREEZE-DRYING FOR THE PRODUCTION OF MEAT PRODUCTS <i>Dondokova S.A., Bitueva E.B., Antipov A.V.</i>	37
THE MATHEMATICAL MODEL OF THE TRANSPORT AND DIFFUSION OF POLLUTANTS IN THE ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER <i>Ravshanov N., Sharipov D.K., Narzullaeva N.</i>	49
ENVIRONMENTAL SAFETY OF RESIDENTIAL AREAS AS PART OF THE QUALITY OF THE URBAN ENVIRONMENT <i>Sankov P.N., Hilyov V.V., Makarova V.N.</i>	60
THE ENDOGENIC FORMATION OF NAPHTHIDES IN THE LIGHT OF ABIOTIC THEORY OF OIL FORMATION <i>Simonian G.S.</i>	77
NEW PROSPECTS OF NON-FUEL USE OF CHEMICAL POTENTIAL OF BROWN AND SUBSTANDARD COAL <i>Fazylov S.D., Satpaeva Zh.B., Nurkenov O.A., Karipova G.Zh., Muldakhmetov M.Z., Zhivotova T.S., Mukashev A.B.</i>	101
ANALITICAL REVIEW OF THE WORK ON MATHEMATICAL MODELING OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS ON THE EXAMPLE OF GAS SUPPLY SYSTEMS <i>Yuldashev B.E.</i>	107
THE ROLE OF SURFACE TENSION IN THE FORMATION OF PLASMA COATINGS <i>Yurov V.M., Guchenko S.A., Laurinas V.Ch.</i>	124
QUALITY MANAGEMENT SYSTEM DEVELOPMENT AND ITS CONDITION NOWADAYS: SCIENTIFIC REVIEW <i>Yazvenko P.V., Voronov M.P.</i>	140

УДК 629.7.05

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ БЕСПЛАТФОРМЕННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Волков В.Л., Жидкова Н.В.

Арзамасский политехнический институт филиал Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, Арзамас, e-mail: vipvly@bk.ru

В научном обзоре представлена актуальная информация, полученная в результате изучения и систематизации большого количества первоисточников по тематике компьютерного моделирования бесплатформенных инерциальных систем. Математическая модель бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) использует кинематические уравнения Пуассона, характеризующие угловую ориентацию и уравнения интегрирования, определяющие местоположение подвижного объекта. Для организации алгоритмов инерциальных измерительных систем (ИМУ) наиболее эффективны кватернионы, использующие параметры Родрига-Гамильтона. В БИНС решена задача компенсации дрейфа показаний гироскопов и случайных шумов других датчиков на основе микро электромеханических систем (МЭМС). Симуляция алгоритмов инерциальных измерительных систем наиболее часто проводится путем компьютерного моделирования в среде *Matlab Simulink*. В качестве результатов моделирования рассматриваются численные результаты по ошибкам оценивания углов ориентации и координат навигации.

Ключевые слова: МЭМС, БИНС, ИМУ, параметры Родрига-Гамильтона, кватернионы, моделирование, эффективность.

FEATURES SIMULATION OF STRAPDOWN INERTIAL SYSTEMS

Volkov V.L., Zhidkova N.V.

Arzamassky polytechnic institute (branch) Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev, Arzamas, e-mail: vipvly@bk.ru

The scientific review provides current information obtained from study and systematization of a large number of primary sources on subject of computer simulation of strapdown inertial systems. Mathematical model of strapdown inertial navigation system (SINS) using Poisson's kinematic equations describing angular orientation and integrating equations that determine location of a moving object. To organize algorithms of inertial measurement unit (IMU) are most effective quaternions using Rodrigues-Hamilton parameters. The SINS solved problem of drift compensation readings gyroscopes and other random noise sensors based on micro-electromechanical systems (MEMS). The simulation algorithm of inertial measurement systems most often done by computer modeling in *Matlab Simulink*. As results of numerical simulation are considered results of estimation error angles of orientation and navigation coordinates.

Keywords: MEMS, SINS, IMU, the parameters of Rodrigues-Hamilton, quaternions, modeling, efficiency.

Введение

В работе [11] отмечено, что обзорно-аналитические тексты являются весьма эффективным методом решения задач по научной тематике. В данном обзоре представлена актуальная информация, полученная в результате изучения и систематизации большого количества первоисточников по тематике компьютерного моделирования бесплатформенных инерциальных систем. На основе анализа разрозненных сведений произведена оценка состояния научных проблем в данном направлении, а также выявлены тенденции и перспективы их решения.

Следует отметить, что бесплатформенный принцип построения инерциальных измерительных систем нашел свое широкое применение в связи с интенсивным развитием мобильных объектов, таких как беспилотные летательные аппараты, малогабаритные роботы, гидроциклы, управляемые ракеты. Принципы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) и их составных частей – бесплатформенных систем ориентации (БСО) стали особенно актуальны для техники мобильных подвижных объектов. БИНС предназначены для решения навигационных задач подвижных объектов, т.е. определения их пространственного положения относительно выбранной системы координат. Бесплатформенные системы ориентации решают автономные задачи по определению углового положения подвижных объектов. Бесплатформенный принцип исполнения БИНС и БСО стал практически основным при использовании в мобильных подвижных объектах в качестве датчиков первичной информации микро электромеханических систем (МЭМС) и микро ЭВМ.

Математическое представление инерциальных измерительных систем, как правило, реализуется в компьютерные модели с целью дальнейшей проверки работоспособ-

ности алгоритмов и с целью исследования их эффективности. Важнейшее значение при этом имеет применение алгоритмов компенсации нестабильности статических характеристик измерительных приборов и алгоритмов фильтрации случайных погрешностей с целью достижения необходимой точности измерительных систем. Компьютерное исследование алгоритмов инерциальных систем при этом наиболее удачно реализуется на основе инженерного программного обеспечения *Matlab Simulink*.

Обзор бесплатформенных инерциальных измерительных систем

Бесплатформенный принцип организации инерциальных навигационных систем и систем ориентации основывается на интегрировании угловых скоростей и ускорений. В системах ориентации используются три метода: на основе углов Эйлера-Крылова, на основе направляющих косинусов и на основе параметров Родрига-Гамильтона (кватернионов). Все навигационные методы и методы ориентации, так или иначе, обсуждаются в литературе и имеют право на применение в реальных подвижных объектах для определения их пространственного положения относительно Земли.

В настоящее время для информационного обеспечения подвижных объектов часто используется избыточность измерений. В этом случае применяются датчики первичной информации (ДПИ) частично дублирующие друг друга, использующие различные физические принципы для измерений. При этом погрешности датчиков часто имеют различные причины возникновения и могут быть разделены по частотным диапазонам. При наличии информационной избыточности традиционно применяются алгоритмы комплексной обработки информации. При этом часто удается минимизировать динамические составляющие ошибок при оценивании параметров движения объектов за счет взаимной компенсации ошибок избыточных источников информации.

Следует отметить, что при составлении алгоритмов функционирования инерциальных систем активно используется избыточность информации, получаемая с МЭМС приборов – микрогироскопов, микроакселерометров, магнитометров для компенсации опасной погрешности – дрейфа гироскопов. Основным источником информации инерциального алгоритма ориентации являются

проекция относительной угловой скорости, получаемые на основе сигналов трех датчиков угловых скоростей (ДУС) и проекция угловой скорости географического трехгранника, получаемые вычислительным путем. Выходом алгоритма ориентации являются оценки углов тангажа, крена и рыскания: ν , γ , ψ . Дополнительно с целью компенсации погрешностей, используется информация с акселерометров и магнитометров, устанавливаемых по осям связанной системы координат. В алгоритме БИНС, кроме того, используется интегрирование сигналов ускорений относительно земной системы координат, выделенных из показаний акселерометров с целью получения координат объекта – высоты полета и углов широты и долготы местоположения.

Использование МЭМС в инерциальных измерительных системах сдерживается их относительно невысокими точностными характеристиками [24]. Тем не менее, достижения в МЭМС технологии дают для военной, аэрокосмической техники и техники специального назначения датчики инерции уже с достаточно приемлемыми характеристиками. В последние годы точность инерциальных МЭМС датчиков неуклонно повышалась. Нестабильность смещения гироскопов у компании производителя *Silicon Sensing* теперь составляет не более 0,3 %/ч, а акселерометра – 50 мкг [2]. Более значительный эффект для инерциальных измерений дает применение инерциальных блоков, т.е. совмещение в одном корпусе 3-осевых датчиков угловых скоростей (ДУС) с акселерометрами, магнитометрами и датчиками температуры. В этом случае путем совместной калибровки их характеристик удается достичь достаточно высокой точности измерения инерциальных параметров. Однако в современных условиях, следует отметить недоступность зарубежных электронных компонентов, к которым относятся и МЭМС, для применения в военной технике и технике специального назначения, что заставляет искать альтернативные – прежде всего алгоритмические пути решения проблем точности инерциальных навигационных систем.

Основные сведения по математике при определении пространственной ориентации и местоположения подвижных объектов представлены в многочисленной отечественной литературе [4-10, 12-23, 25]. Популярными и широкодоступными источниками по данной теме являются [6, 13-23].

В последние годы появилось множество работ в области беспилотных инерциальных систем, это связано, в первую очередь с интенсивным развитием летательных аппаратов 4-го и 5-го поколений, беспилотных летательных аппаратов и робототехники. Здесь следует отметить фундаментальные работы Бранца В.Н. и Шмыглевского И.П. [4-6] по принципам построения БИНС. Следует также отметить современные учебные пособия и статьи Матвеева В.В. и Распопова В.Я. [13-16, 19-23], которые эффективно используются, как в учебном процессе, так и в науке и демонстрируют практическое использование математических и компьютерных моделей БИНС и БСО. Пользуются популярностью лекции по БИНС Мелешко В.В. [17].

Ежегодно по тематике беспилотных инерциальных систем в России защищается ряд диссертаций, так можно отметить диссертацию Шукалова А. В. на соискание ученой степени к.т.н. по БСО летательных аппаратов на инерциальных датчиках отечественного производства с микросистемными чувствительными элементами, выполненную в Тульском государственном университете [26]. Материал диссертации адаптирован к применению доступных МЭМС, гарантирующих работу БИНС и БСО подвижных объектов специального назначения в условиях замещения импортных МЭМС. Актуальна также диссертация Корнилова А.В. “Методы повышения точности измерений значений параметров полета летательного аппарата резервной системы ориентации”, выполненная в Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики в 2014 году [12]. В диссертации основным параметром эффективности БСО рассматривается точность оценивания параметров движения летательного аппарата, что является одним из основных вопросов, исследуемым в ряде статей и учебных пособий известных авторов [1, 16, 18, 19, 23, 24].

Следует отметить большой интерес к разработке математических моделей и исследованию точности инерциальных измерительных систем зарубежных авторов [26-38].

В своем отчете [38] *Woodman O.J.* представил анализ ошибок инерциальной навигации беспилотных систем, основанных на *MEMS* устройствах. Для изучения ошибок таких систем он использовал моделирование. В отчете показано, что средняя

ошибка в оценивании положения объекта возрастает более чем на 150 м после 60 секунд работы. Причиной такого дрейфа является возникновение ошибок ориентации, вызванных шумом возмущающих сигналов гироскопов. Для примера в отчете показано, что комплексирование гироскопов с магнитометрами дает среднюю ошибку в оценивании положения объекта после 60 секунд уже всего до 5 м. Автор пришел к выводу, что хотя МЭМС технологии БИНС быстро улучшаются, но пока нет возможности построить БИНС, которая бы дала точность определения местоположения всего около одного метра в течение более одной минуты.

В работе [34] *William Premerlani* в соавторстве с *Paul Bizard* предложил осуществлять компенсацию дрейфа показаний ДУ-Сов на основе использования в качестве фильтра ПИ-регулятор (пропорционально-интегрирующий регулятор). Это обосновано тем, что постепенно накапливающиеся ошибки смещения и дрейфа гироскопов проявляются в кватернионах и существенно ухудшают точность оценок. Для определения ошибки отклонения от курса *Premerlani* использует *GPS* измеритель, а акселерометры используются для обнаружения ошибок по крену и тангажу.

Базовые принципы инерциальных навигационных систем рассмотрены в материалах семинара [26].

В работе [27] приведены основные сведения по теории и практике БИНС. Авторы отмечают, что инерциальные блоки измерения (*Inertial Measuring Unit – IMU*) являются основными компонентами инерциальных систем наведения, используемых в воздушном пространстве и гидроциклов, а также в управляемых ракетах.

В статье «Мульти инерциальное измерительное устройство (*MIMU*) на платформе с открытым исходным кодом» [36] авторами рассматриваются принципы функционирования новой системной архитектуры платформы с использованием нового коммуникационного интерфейса.

В работе *Sieglwart R.* [35] по инерциальной навигации для беспилотных летательных аппаратов (*UAV*) и микро летательных аппаратов (*MAV*) рассматривается проблема разработки алгоритма определения местоположения. Обосновано применение МЭМС датчиков, имеющих недостатки, такие как шум и дрейф. Показана возможность компенсации ошибок с помощью программно-

го обеспечения. Применены датчики низкой стоимости и микропроцессор с ограниченной вычислительной мощностью. Здесь применены кватернионы и фильтры Калмана.

В диссертации [31] рассмотрены модели ошибок гироскопов и акселерометров. Ошибки инерциальной навигации компенсируются на основе фильтра Калмана.

В работе [30] отмечено, что система *FIS1100* является первым в мире комплексным 6D МЭМС. Инерциальный измерительный блок (*IMU*) с комплексным датчиком обеспечивает углы тангажа, крена, и рыскания. При использовании *FIS1100* в сочетании с прилагаемым *XKF3 9D* комплексным датчиком, обеспечивает точность ориентации на уровне $\pm 3^\circ$ тангажа, крена, и рыскания. *FIS1100* включает 3-осевой гироскоп и 3-осевой акселерометр, также может быть подключен внешний 3-осевой магнитометр. Цифровой сигнальный процессор (*DSP*) под названием *AttitudeEngine* дает в итоге очень низкую общую мощность системы в сочетании с высокой точностью, которые являются важными для многих портативных объектов с батарейным питанием.

Инерциальная навигационная система *LN-200S* [32] с твердотельными волоконно-оптическими гироскопами предназначена для космической техники. Здесь применены также МЭМС акселерометры.

В работе [33] показано, что мульти-сенсорная инерциальная навигационная система отличается низкой стоимостью, низкой мощностью потребления энергии, имеет малый вес и небольшой размер. В системе полностью компенсируются ошибки измерения угловых скоростей и линейных ускорений.

В работе [29] приведены данные по точности навигации в военных системах и обычной навигации. Так отмечено, что *IMU Honeywell HG1700* среднего качества имеет 3 акселерометра с точностью 1 *mg*, 3 кольцевых лазерных гироскопа, точностью 1 град/ч. Частота измерений составляет 100 Гц. Кроме этого, в [29] дано введение в инерциальную навигацию: отмечено основное назначение навигации по оценке положения, ориентации и скорости транспортного средства.

Компьютерное моделирование бесплатформенных инерциальных систем

Вопросам компьютерного моделирования инерциальных систем посвящено довольно мало работ. Отдельные вопросы мо-

делирования БИНС и БСО рассматривались в работах [3, 7-8, 10, 13]. В работе [13] показаны примеры моделирования БСО с помощью программного обеспечения *Matlab Simulink* без применения алгоритмов компенсации неустойчивости статических характеристик измерительных приборов. В работе [3] продемонстрировано также, как и в работе [13], моделирование с помощью *Matlab Simulink* измерительной системы БСО, основанной на углах Эйлера-Крылова без раскрытия каких-либо подробностей построения системы моделирования. Следует отметить, что реализация алгоритмов БСО на основе углов Эйлера-Крылова или направляющих косинусов предполагает решение нелинейных кинематических уравнений при наличии критических точек – так называемых шарнирных замков (*Gimbal Lock*), что ограничивает их применение в быстродействующих БСО. Большинство авторов БИНС и БСО отдают предпочтение алгоритмам на базе математических моделей с параметрами Родрига-Гамильтона. Кинематические уравнения, составленные в параметрах Родрига-Гамильтона линейны и интегрируемы при любых углах Эйлера-Крылова. В работах [7, 10] представлены математические модели и описано программное обеспечение *Matlab* для задачи моделирования БСО, основанной на кватернионах, и представлены результаты моделирования БСО.

В следующей статье по тематике моделирования БИНС [8], в продолжение научных исследований [7, 10], представлен материал по математическому моделированию и симуляции БИНС, использующей математику кватернионов. Реализация алгоритма БИНС является на порядок сложнее по сравнению с алгоритмом БСО, т.к. в этом случае, во-первых, алгоритм БСО уже является составной частью алгоритма БИНС, во-вторых, приходится создавать и использовать динамическую модель движения объекта по отношению к Земле. В статье [8] описано моделирование БИНС в инструментальной среде *Simulink* с целью проверки математических моделей и получения результатов исследования эффективности БИНС при их работе в различных динамических режимах. Исполнение математических моделей БИНС в *Simulink* позволило получить понятную визуальную модель системы и реализовать многочисленные операции дифференцирования и интегрирова-

ния более гибко на стандартных элементах. Практическая направленность статьи позволяет повторить предлагаемые модели и схемы, получить результаты симуляции и оценить эффективность алгоритмов БИНС.

В статье [37], опубликованной в 2015 г. в материалах журнала *International Journal Of Applied And Fundamental Research*, предпринималась попытка краткого обзора результатов компьютерного эксперимента по симуляции алгоритмов функционирования БСО и БИНС, использующих МЭМС гироскопы, акселерометры и магнитометры при реализации кинематических уравнений Пуассона с помощью кватернионов. Обсуждались результаты по значениям среднего квадрата ошибки (СКО) и предельной ошибки для навигационных параметров и углов ориентации при наличии значительного дрейфа гироскопов. Было показано, что применение предложенной методики компенсации дрейфа гироскопов в алгоритмах с помощью ПИ-регулятора дает приемлемые для практики ошибки. Ограниченный объем статьи [37] не позволил рассмотреть информацию по теме в полном объеме, не позволил систематизировать первоисточники и сделать анализ и практические выводы.

Далее здесь представлены некоторые выдержки из наиболее актуальной статьи по моделированию *IMU (Inertial Measuring Unit)* [8] для более полного понимания особенностей моделирования бесплатформенных инерциальных систем и доказательства эффективности сформированного алгоритма БИНС.

На рисунке 1 в виде структурной схемы представлен навигационный алгоритм

БИНС, основанный на кинематических уравнениях [8].

В схеме использован конвертор вектора кажущегося ускорения с акселерометров для пересчета в земную систему координат. Этот конвертор работает на основе кватернионного умножения $L*N*L$, где L, N – кватернионы соответственно углов Эйлера и ускорений. На вход конвертора поступает вектор ускорений в связанной системе координат (непосредственно с акселерометров, привязанным к трем осям) $N = [n_x, n_y, n_z]$, на выходе получается вектор ускорений в земной системе координат $Ng = [n_{xg}, n_{yg}, n_{zg}]$, необходимый для работы БИНС.

Математическая модель БСО, хотя и не включена в схему БИНС, является составной частью алгоритма БИНС, т.к. определение угловой ориентации подвижного объекта необходимо для решения задачи навигации.

Схема моделирования БИНС представлена на рис. 2.

Схема содержит следующие блоки.

1. Блок имитации параметров движения объекта, который осуществляет имитацию углового движения объекта с учетом изменения углов υ, γ, ψ по синусоидальным законам и с учетом движения объекта вдоль Земли с линейной скоростью. Также этот блок осуществляет имитацию абсолютного ускорения объекта с учетом эволюции ускорений по осям географической системы координат по синусоидальным законам;

2. Блок основных датчиков (ДУС и акселерометры), выдает три составляющих абсолютной угловой скорости ($\omega_{xS}, \omega_{yS}, \omega_{zS}$) и три компоненты кажущегося ускорения в связанной системе координат (n_x, n_y, n_z);

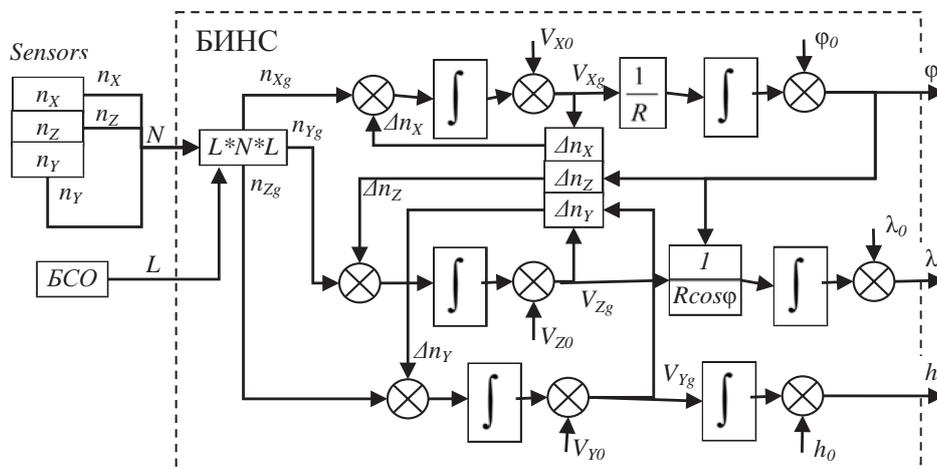


Рис. 1. Структурная схема алгоритма БИНС

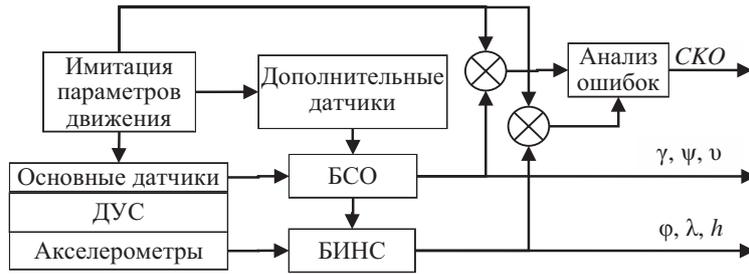


Рис. 2. Схема моделирования БСО и БИНС (γ, ψ, v – оценки углов; ϕ, λ, h – оценки координат)

3. Блок дополнительных датчиков, вычисляет данные об угловом движении объекта на основе избыточной информации (в данном случае с акселерометров и магнитометров);

4. Блок БСО, осуществляет решение кинематических уравнений углового движения объекта на основе информации, получаемой с ДУС и с дополнительных датчиков;

5. Блок БИНС осуществляет интегрирование скомпенсированных сигналов акселерометров и выдает координаты объекта в виде параметров ϕ, λ, h ;

6. Разностные элементы, вычисляют ошибки оценивания углов Эйлера и координат ϕ, λ, h ;

7. Блок анализа ошибок, вычисляет средние квадраты ошибок оценивания углов ориентации и координат объекта и их предельные значения. Кроме того, блок анализа позволяет получить графики оценок углов и

координат объекта на фоне их истинных значений для визуального анализа точности.

Для исследования работоспособности алгоритма БИНС в комплексе с БСО необходимо придерживаться схемы моделирования, разработанной для среды *Matlab Simulink* [8]. Такая схема представлена на рис. 3.

На схеме рис. 3 в качестве основных датчиков представлены ДУС и акселерометры, играющие основную роль в работе БИНС. В качестве дополнительных датчиков используются магнитометры и акселерометры (для алгоритма БСО).

На схеме рис. 1 была показана связь алгоритма БСО с алгоритмом БИНС. Эта связь необходима при реализации алгоритма БИНС на основе кватернионов. В этом случае легко выполняется пересчет показаний акселерометров в земную систему координат.

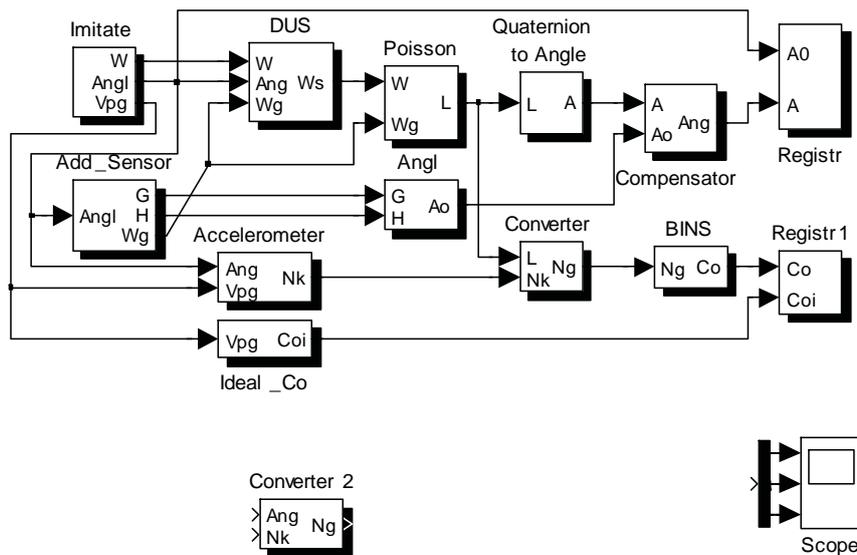


Рис. 3. Структурная схема моделирования БИНС и БСО

На схеме имеется блок имитации исходных данных для задания углов ψ , ν , γ и параметров ускорения объекта в земной системе координат (в данном случае по синусоидальным законам в разрешенных пределах). Задание других многочисленных параметров для функционирования БСО и БИНС осуществляется с помощью управляющей программы.

На схеме использованы блоки: *Imitate*, *DUS*, *Add_Sensor*, *Poisson*, *Quaternion to Angle*, *Angi*, *Compensator*, *Registr*, *Accelerometer*, *Ideal_Co*, *Converter*, *BINS*, предназначенные для реализации алгоритма БИНС и его моделирования. В блоке *Imitate* заложена схема моделирования ускорений объекта в земной системе координат. На схеме использованы синусоидальные датчики, выдающие параметры ускорений V_{px} , V_{py} , V_{pz} , которые настроены на конкретные амплитуды, начальные значения и частоты.

Моделирование алгоритма БИНС в работе [8] проведено с помощью программной среды *Matlab Simulink*. В качестве результатов моделирования приведены графики основных процессов и численные результаты по ошибкам оценивания углов ориентации. Результаты компьютерного эксперимента подтвердили эффективность алгоритма БИНС в системах определения пространственного положения маневренных подвижных объектов в широком диапазоне сигналов и шумов. В итоге, компенсация дрейфа гироскопов, применяемая в алгоритме оценивания на основе кватернионов дает высокую точность оценок (не хуже 0,000005%), что доказывает эффективность компенсации ошибок дрейфа гироскопов.

Выводы

Авторы данной работы проводили исследование на основе многочисленных источников информации, некоторые из которых отражены в списке литературы, и на основе собственных разработок.

Была показана эффективность и практическая ценность современных алгоритмов БСО и БИНС, основанных на использовании параметров Родрига-Гамильтона (кватернионов).

Компьютерное исследование БСО и БИНС большей частью реализуется в инженерной среде *Simulink Matlab*, что дает визуальную наглядность схем, возможность их повторения и модификации математических моделей.

В качестве основных результатов математического и компьютерного моделирования в алгоритмах БСО и БИНС рассматриваются средние квадраты ошибок (СКО) и их предельные значения.

Отмечено, что для достижения приемлемых значений СКО необходимо использовать схемы компенсации дрейфа гироскопов и фильтрации шумовых составляющих датчиков. С этой целью особенно эффективным оказывается применение компенсационных схем с ПИ-регулятором и использованием фильтра Калмана.

Список литературы

1. Алешкин В.В. Оценка влияния погрешностей датчиков на точность комплексной системы ориентации и навигации на грубых инерциальных датчиках / В.В. Алешкин, П.Н. Голованов // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2010. – № 50. – С. 58-65.
2. Бакмачев А. МЭМС-гироскопы и акселерометры Silicon Sensing: английские традиции, японские технологии // Компоненты и технологии. – 2014. – № 4. – С. 18-26.
3. Белочкин П.Е. Особенности моделирования бесплатформенной системы ориентации по уравнениям Эйлера в среде Matlab и Mathcad / П.Е. Белочкин, Д.А. Кацай // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 5. – С. 18-20.
4. Бранец В.Н. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела / В.Н. Бранец, И.П. Шмыглевский. – М.: Наука, 1973. – 320 с.
5. Бранец В.Н. Введение в теорию БИНС. – М.: Наука, 1992. – 280 с.
6. Бранец В.Н. Лекции по теории бесплатформенных инерциальных навигационных систем управления: учебное пособие. – М., 2009. – 338 с.
7. Волков В.Л. Обработка информации в системе ориентации на основе МЭМС / В.Л. Волков, Н.В. Жидкова: Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2015. – № 110. – С. 279-286.
8. Волков В.Л. Моделирование бесплатформенной навигационной системы / В.Л. Волков, Н.В. Жидкова // Современные наукоемкие технологии. – 2015. – № 7. – URL: http://www.rae.ru/snt/?section=content&op=show_article&article_id=10003663.
9. Голубев Ю.Ф. Алгебра кватернионов в кинематике твердого тела // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. – 2013. – № 39. – URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-39>.
10. Жидкова Н.В. Моделирование бесплатформенной системы ориентации / Н.В. Жидкова, В.Л. Волков // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – URL: <http://www.science-education.ru/121-17099>.
11. Курзанов А.Н. Научный обзор: роль и место в системе информационно-аналитических текстов, подготовка в формате журнальной статьи. – URL: <http://science-review.ru/Articles1.html>.
12. Корнилов А.В. Методы повышения точности измерений значений параметров полета летательного аппарата резервной системы ориентации: дис. ... канд. тех. наук. – СПб.: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2014. – 143 с.
13. Матвеев В.В. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В.В. Матвеев,

- В.Я. Расповов / под ред. В.Я. Расповова. – СПб.: ГИЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электрон», 2009. – 280 с.
14. Матвеев В.В. Бесплатформенная система ориентации с акселерометрической коррекцией // Датчики и системы. – 2011. – № 8. – С. 12-15.
15. Матвеев В.В. Инерциальные навигационные системы: учебное пособие. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. – 199 с.
16. Матвеев В.В. Алгоритм ориентации для вращающегося по крену летательного аппарата / В.В. Матвеев, А.П. Шведов, С.И. Серегин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. – № 9 (138). – С. 5-9.
17. Мелешко В.В. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы: учеб. пособие / В.В. Мелешко, О.И. Нестеренко. – Кировоград: Полимед Сервис, 2011. – 171 с.
18. Погорелов М.Г. Анализ точностных характеристик магнитометрической системы ориентации / М.Г. Погорелов, А.П. Шведов, Д.М. Малютин // Датчики и системы. – 2011. – № 8. – С. 21-24.
19. Расповов В.Я. Микросистемная авионика: учебное пособие. – Тула: Изд-во «Гриф и К», 2010. – 248 с.
20. Расповов В.Я. Бесплатформенные системы ориентации и навигации на микромеханических чувствительных элементах / В.Я. Расповов, В.В. Матвеев. – Тула: ГОУ ВПО «Тульский государственный университет», 2008. – 221 с.
21. Расповов В.Я. Микросистемы угловой ориентации беспилотных летательных аппаратов // Датчики и системы. – 2011. – № 8. – С. 3-12.
22. Расповов В.Я. Микросистемы ориентации беспилотных летательных аппаратов / под ред. В.Я. Расповова. – М.: Машиностроение, 2011. – 184 с.
23. Расповов В.Я. Метод коррекции бесплатформенной системы ориентации малоразмерного беспилотного летательного аппарата / В.Я. Расповов [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. – № 9 (138). – С. 10-14.
24. Сысоева С.С. Тенденции рынка High-end МЭМС датчиков инерции. Новые уровни характеристик и исполнения // Компоненты и технологии. – 2014. – № 4. – С. 41-46.
25. Шукалов А.В. Информационно-измерительная бесплатформенная система ориентации летательных аппаратов на инерциальных датчиках отечественного производства с микросистемными чувствительными элементами: дис. ... канд. тех. наук. – Тула: ТГУ, 2014. – 165 с.
26. Basic Principles of Inertial Navigation. Seminar on inertial navigation systems ampere University of Technology. – URL: <http://aerostudents.com/files/avionics/InertialNavigationSystems.pdf>, 2014. – 22 p.
27. Hazry D. Study of Inertial Measurement Unit Sensor / D. Hazry, M. Sofian, A. Azfar. Proceedings of the International Conference on Man-Machine Systems (ICoMMS), 2009. Batu Ferringhi, Penang, MALAYSIA.
28. Osquldas vag 10, 2015. – URL: http://www.openshoe.org/wp-content/uploads/2014/02/mimu_platform.pdf
29. Introduction to Inertial Navigatio / FFI forsvarsrets, forskningsinstitut. URL: http://www.navlab.net/Publications/Introduction_to_Inertial_Navigation.pdf, 2015. – 20 p.
30. FIS1100 – 6D inertial measurement unit with motion co-processor end sensor fusion library. / Fairchild Semiconductor corporation. FIS1100, rev. 1.0. – URL: <https://www.fairchildsemi.com/datasheets/FI/FIS1100.pdf>, 2015. – 51 p.
31. Flenniken I.V. Modeling inertial measurement units and analyzing the effect of their errors in navigation applications. – Auburn, Alabama, 2005. – 151 p. – URL: http://gavlab.auburn.edu/uploads/Flenniken_thesis.pdf
32. LN-200S Inercial mesurement munit (IMU). – California, USA: Northrop grumman systems corporation, 2013. – URL: <http://www.northropgrumman.com/Capabilities/LN200sInertial/Documents/Ln200s.pdf>
33. Multisensor Inertial Measurement Unit. / UTC Aerospace Systems. Sensors & Integrated systems. – Connecticut, USA. – URL: www.utcaerospacesystems.com
34. Premerlani W. Direction Cosine Matrix IMU: Theory / W. Premerlani, P. Bizard. – URL: <http://gentlenav.googlecode.com/files/DCMDraft2.pdf>, 2009. – 30 p.
35. Siegwart R. Development of a planar low cost Inertial Measurement Unit for UAVs and MAVs. – Zurich: Swiss federal institute of technology – Autonomous Systems Lab, 2008. – 94 p. – URL: [http://www.sky-sailor.ethz.ch/docs/Development_of_a_Planar_Low_Cost_Inertial_Measurement_Unit_for_UAVs_and_MAVs_\(Fux2008\).pdf](http://www.sky-sailor.ethz.ch/docs/Development_of_a_Planar_Low_Cost_Inertial_Measurement_Unit_for_UAVs_and_MAVs_(Fux2008).pdf)
36. Skog I. An Open-source Multi Inertial Measurement Unit (MIMU) Platform / I. Skog, J-O. Nilsson, P. Handel. – Stockholm, Sweden: Department of Signal Processing, ACCESS Linnaeus Centre KTH Royal Institute of Technology.
37. Volkov V.L. Mathematical modeling of inertial measurement systems // International Journal Of Applied And Fundamental Research. – 2015. – № 2. – URL: www.science-sd.com/461-24795
38. Woodman O.J. An introduction to inertial navigation. Technical reports published by the University of Cambridge Computer Laboratory are freely available via the Internet. – URL: <http://www.cl.cam.ac.uk/techreports/> ISSN 1476-2986, 2007. – 37 p.

УДК 629.33

НАУЧНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ АВТОМОБИЛЯ, ОСНАЩЁННОГО СИСТЕМОЙ КУРСОВОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

Денисов Ил.В., Терентьев И.А.

*Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых,
Владимир, e-mail: Denisoviv@mail.ru*

Поднята проблема высокой дорожно-транспортной аварийности на дорогах РФ из-за неисправного технического состояния автомобилей, 70% отказов из которых приходится на ходовую часть, тормозную систему и рулевое управление. Установлена доля автотранспортных средств в автомобильном парке, оснащенных системой курсовой устойчивости. Доказано, что наличие данной системы у транспортной машины в большинстве случаев положительно влияет на исход аварийной ситуации. Проведён анализ конструкции системы курсовой устойчивости автомобиля, на основании которого построена структурная и информационная схемы. Представлены существующие методики диагностирования данной системы.

Ключевые слова: автомобиль, система курсовой устойчивости, управление техническим состоянием, диагностирование технического состояния.

SCIENTIFIC BACKGROUND MANAGEMENT SYSTEM DEVELOPMENT OF TECHNICAL CONDITION OF VEHICLES EQUIPPED WITH VEHICLE STABILITY CONTROL

Denisov I.V., Terentyev I.A.

Vladimir State University behalf A.G. and N.G. Stoletovs, Vladimir, e-mail: Denisoviv@mail.ru

Raised the problem of high traffic accident rate on roads of Russia due to bad technical condition of vehicles, 70% of failures which occur in the chassis, brake system and steering. The share of installed vehicles in a car park with a system of exchange rate stability. It is proved that the presence of this system in transport vehicles, in most cases, positively affects the outcome of an emergency situation. The analysis of the structure of the system of exchange rate stability, which is built on the basis of structural and information scheme. Presents current methods of diagnosing this system.

Keywords: car, vehicle stability management, technical state, diagnostics of technical condition.

Неисправное техническое состояние АТС, как фактор риска возникновения ДТП

Основной чертой, присущей любому развивающемуся государству, стало усовершенствование транспорта и транспортной логистики, на которых базировалась вся инфраструктура. Страна не может иметь экономического благополучия без использования различных видов транспорта (автомобильного, железнодорожного, морского, трубопроводного и т.д.). Увеличение скорости транспортировки товаров позволяет быстрее высвободить денежные средства из оборота и направить их на другие важные цели. Всё это стимулирует совершенствовать ныне существующие виды транспорта и подталкивает создавать новые, более скоростные, вместительные и безопасные.

Важнейшей отраслью народного хозяйства на сегодняшний день является автомобильный транспорт, обеспечивающий население и хозяйствующие субъекты в перевозках. В Российской Федерации (РФ) наблюдается стабильный рост потребности в транспортных услугах, вследствие чего тре-

буется увеличение парка автотранспортных средств (АТС) и повышение эффективности его эксплуатации. На долю транспортных машин в России приходится три четверти грузовых и более половины объёма пассажирских перевозок. Из-за хорошей мобильности, приспособленности к транспортировке грузов различных размеров и массы, возможности организации перевозок в короткие сроки – использование автомобилей нашло широкое применение в транспортном процессе.

В России, как и во многих странах мира, наблюдается устойчивый рост парка АТС. По данным Государственной инспекции безопасности дорожного движения Министерства внутренних дел (ГИБДД МВД) РФ [15] на начало 2015 года на учёте состояло 40,85 млн. автомобилей, а это означает, что на тысячу жителей приходится более 340 транспортных машин.

В [1] приводятся данные об устойчивой тенденции ежегодного увеличения в автомобильном парке России доли иномарок, которая на данный момент составляет 22,5 млн. АТС, что превышает 55% (рис. 1).

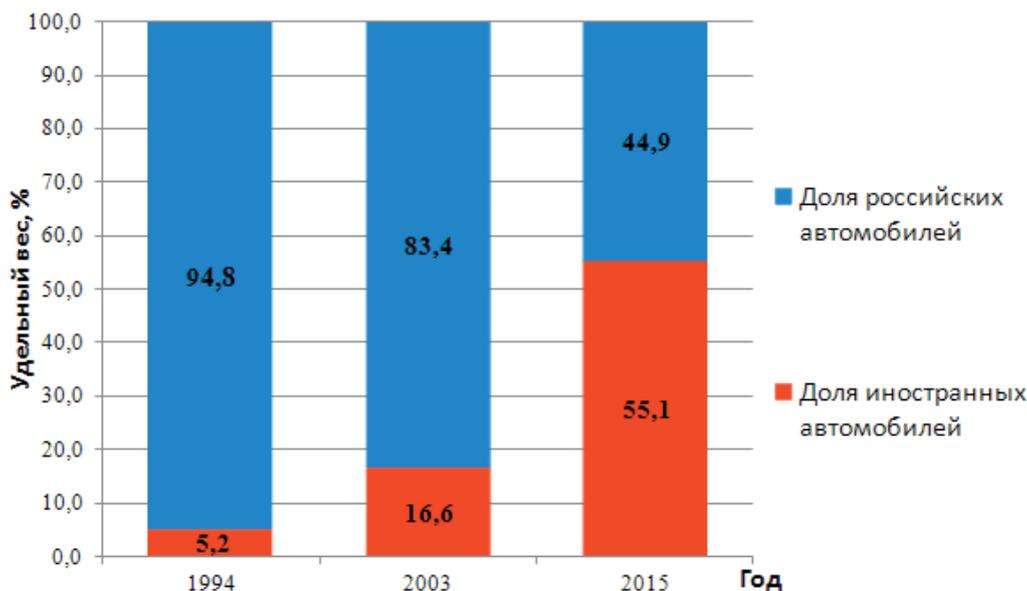


Рис. 1. Изменение структуры автомобильного парка РФ с 1994 по 2015 гг.

По прогнозам [1] парк транспортных машин РФ к 2019 году увеличится до 47 млн. автомобилей, из которых более 60% будут занимать иномарки. Уже сейчас абсолютным лидером среди них является *Toyota*, которая занимает 8,8% (3,61 млн. АТС) парка транспортных машин России и к 2019 году только укрепит свои позиции.

В [6] содержатся данные о распределении парка российских АТС РФ и приведён их средний возраст, который составляет 14,9 лет (рис. 2).

Также в [6] указаны сведения о распределении парка иномарок России и приведён их средний возраст – 9,0 лет (рис. 3).

Следует отметить, что приблизительно половина парка транспортных машин России эксплуатируется за границей моторесурса, т.к. имеет возраст свыше 10 лет (рис. 4).

Ситуация усугубляется тем, что износ пассажирского и грузового транспорта очень высок, а предприниматели зачастую пренебрегают техникой безопасности в погоне за выгодой. Всё это неизменно приводит к увеличению количества дорожно-транспортных происшествий (ДТП), которое растёт год от года. Поэтому повышение безопасности дорожного движения (БДД) на автомобильных дорогах требует принятия кардинальных мер [21].

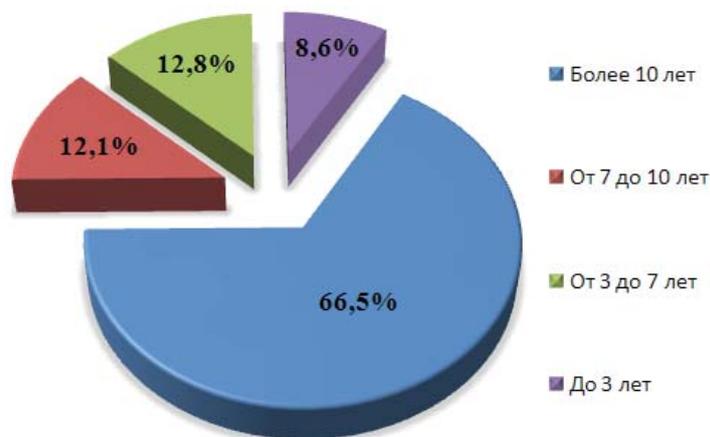


Рис. 2. Распределение парка российских автомобилей РФ по возрасту на 1 октября 2013 г.

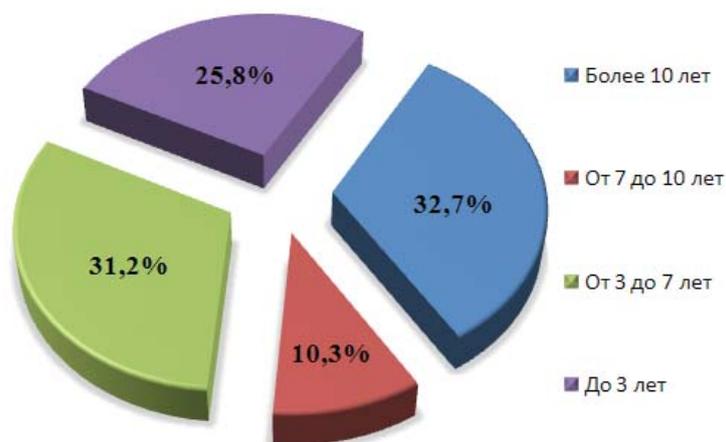


Рис. 3. Распределение парка зарубежных автомобилей РФ по возрасту на 1 октября 2013 г.

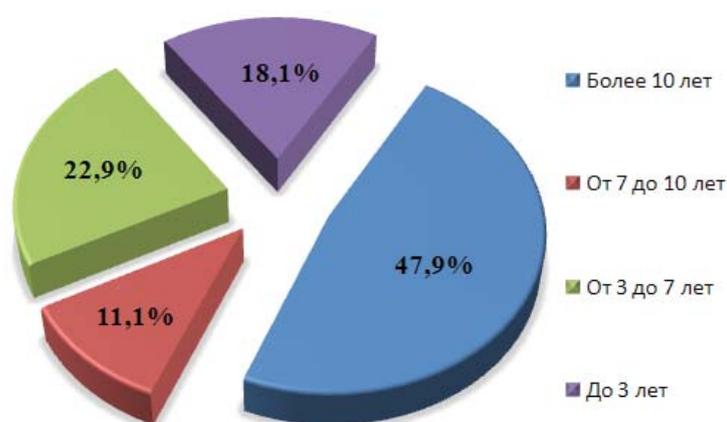


Рис. 4. Общее распределение автомобильного парка РФ по возрасту на 1 апреля 2015 г.

Ежегодно в мире, несмотря на все реализуемые мероприятия по предотвращению вероятности возникновения ДТП, на дорогах гибнут более 500 тыс. и получают увечья различной степени тяжести более 10 млн. человек. В результате автоаварий в РФ ежедневно гибнут около 90 человек [10]. По оценкам специалистов наблюдается ежегодный рост ущерба экономике страны от ДТП, который уже приближается к отметке 2,5% от валового внутреннего продукта (ВВП) [31].

Проблема высокой дорожно-транспортной аварийности поставлена в ряд наиболее актуальных, в связи с высоким темпом автомобилизации населения в стране. Поэтому снижение количества ДТП является одной из наиболее приоритетных задач, поставленных перед современным обществом.

В России существует недопустимо высокий уровень аварийности, о чём свиде-

тельствуют полученные в работе [24] результаты. Особое внимание следует уделить тому, что число пострадавших и погибших в дорожных инцидентах чрезмерно велико. Всё это указывает на то, что эксплуатируемые в парке РФ транспортные машины обладают крайне низким уровнем безопасности и не могут защитить водителей и пассажиров от увечий в случае неблагоприятного исхода ДТП. Следовательно, требования к техническому состоянию таких АТС должны быть в полной мере выдержаны в условиях эксплуатации, чтобы уменьшить риск возникновения дорожных инцидентов.

В работе [19] автор отмечает, что основными причинами ДТП являются: технические неисправности транспортных машин; неверные действия водителя, которые не соответствуют требованиям безопасности; тяжёлые дорожные условия.

При анализе автомобильной аварийности особое внимание было уделено мировой статистике. Она свидетельствует о том, что эксплуатация АТС с неисправностями систем, которые влияют на активную безопасность, является причиной более 15% дорожных инцидентов от общего количества. По причине отказов тормозной системы (ТС), ходовой части (ХЧ) и рулевого управления (РУ) происходит приблизительно 70% ДТП, вызванных техническими неисправностями автомобилей [21]. Информация по дорожно-транспортной аварийности, предоставленная ГИБДД МВД РФ [15] также подтверждает данные цифры и даёт процентное соотношение дефектов систем и узлов АТС, которые распределяются следующим образом: ТС – 45%, подвеска – 19,2%; РУ – 16%, приборы освещения – 11%, шины – 8%, прочие – 14% [26; 73].

При выполнении технического обслуживания АТС необходимо обратить пристальное внимание на указанные системы, т.к. его эксплуатация с граничными значениями параметров их технического состояния может спровоцировать потерю устойчивости и управляемости. Для уменьшения риска линейного отказа следует поддерживать системы, непосредственно влияющие на БДД, в технически исправном состоянии в течение всего периода эксплуатации. Это является одним из важнейших условий, которое поможет снизить уровень аварийности на автомобильных дорогах всего мира [19].

В докладе [62] было отмечено, что по данным исследований, около 35% транспортных машин в России, которые участвуют в дорожном движении, не соответствуют установленным требованиям к их техническому состоянию. Зачастую автомобили имеют по одной и более неисправности, которые не редко вызваны рядом характерных причин (табл. 1).

По причине неудовлетворительного технического состояния, связанного с предельным износом или старением элементов конструкции транспортных машин, происходит 68,9% дорожных инцидентов. Также следует обратить внимание на значимость причин неисправностей эксплуатационного характера, доля которых составляет 27,3% от общего количества ДТП. Причины конструкционного и производственного характера имеют незначительную долю – 3,8% автоаварий [20].

В работе [73] есть ссылка на данные официальной статистики, где утверждается, что из-за технической неисправности АТС происходит около 5% всех дорожных инцидентов. Авторы делают вывод о том, что общее количество ДТП по техническим причинам составляет 10-12 тыс. случаев, т.к. в России ежегодно регистрируются порядка 200 тыс. автоаварий.

По предоставленным ГИБДД МВД РФ [15] данным, авторы работы [20] составили гистограммы динамики дорожных инцидентов (рис. 5 и 6).

Анализируя рисунок 5, можно сделать вывод, что за период времени с 2012 по 2014 гг. средний уровень аварийности в России составлял около 202,5 тыс. ДТП в год. По рисунку 6 видно, что за указанный отчётный период среднее количество дорожных инцидентов в РФ по причине неисправностей АТС составляло 1490 случаев в год. Очевидно, что показатель дорожно-транспортной аварийности по техническим неисправностям автомобилей за период времени с 2005 по 2012 гг. снизился более чем в 3 раза. Однако с 2012 по 2014 гг. этот показатель вновь начал повышаться и к концу 2014 года вырос почти в 2 раза, что подтверждает отсутствие должного контроля технического состояния автомобилей в эксплуатации и снижение его качества.

Таблица 1

Причины возникновения технических неисправностей АТС, вовлеченных в автоаварии

Характер технической неисправности	ДТП с автомобилями, %		
	Легковыми	Грузовыми	Всех типов
«Естественный» (изменение параметров)	76,8	66,5	68,9
Эксплуатационный	18,2	30,0	27,3
Конструкционный и производственный	5,0	3,5	3,8

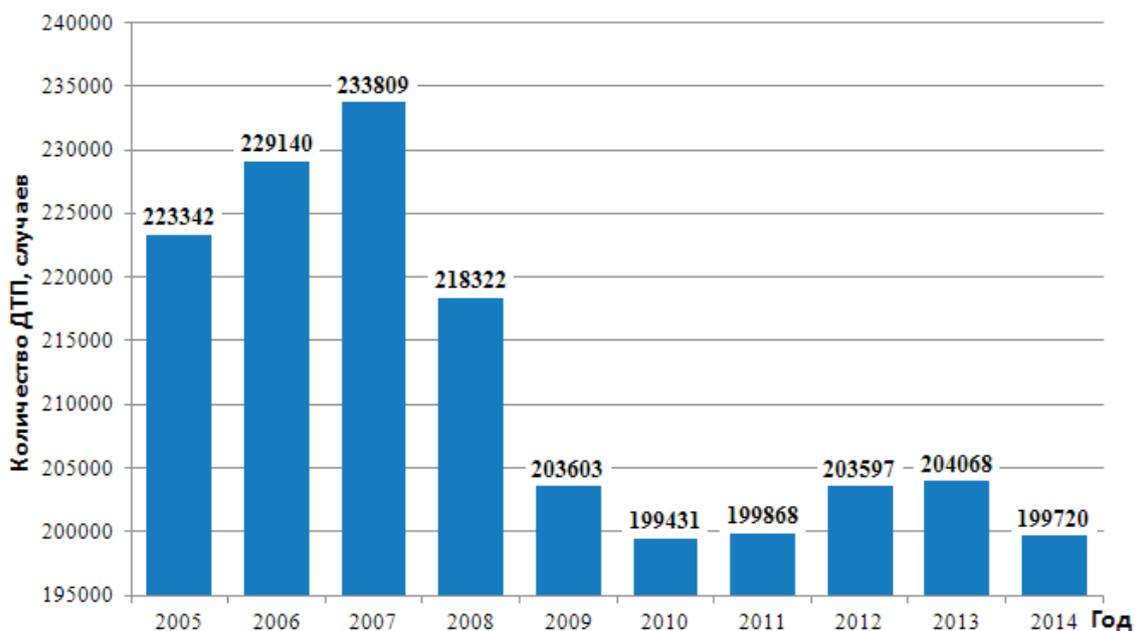


Рис. 5. Динамика дорожно-транспортной аварийности в РФ за период времени с 2005 по 2014 гг.

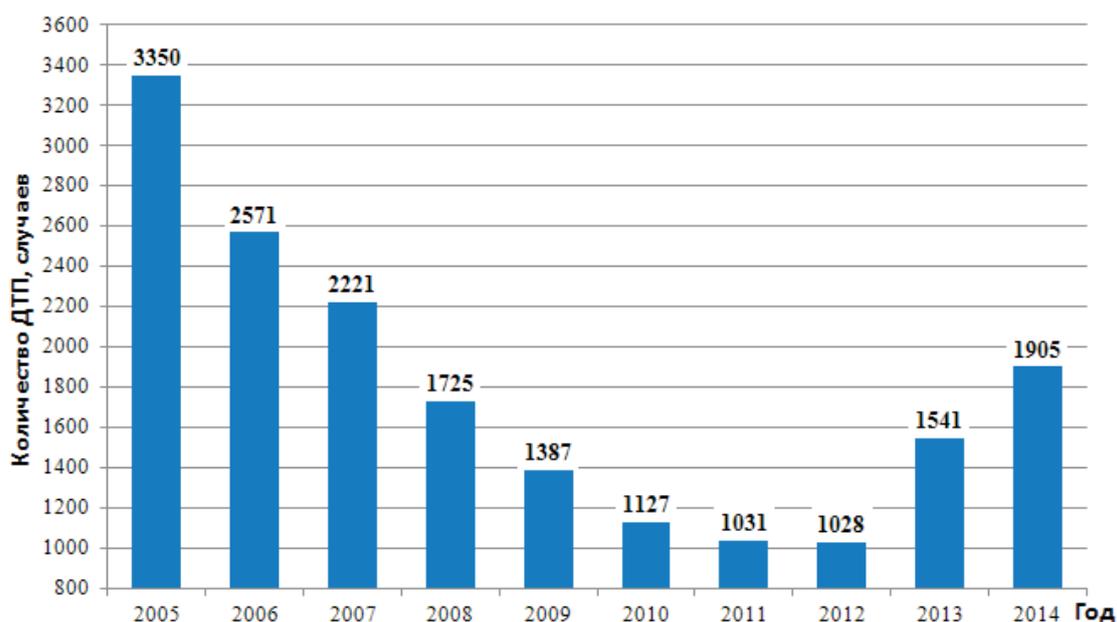


Рис. 6. Количество ДТП по причине технических неисправностей автомобилей в РФ за период времени с 2005 по 2014 гг.

По предоставленным ГИБДД МВД РФ [15] данным автором работы [22] составлена гистограмма изменения количества дорожных инцидентов в России и Владимирской области по причине эксплуатации технически неисправных АТС (рис. 7).

Согласно официальной информации ГИБДД МВД РФ [15] из-за неисправностей транспортных машин с 2012 по 2014 гг. произошло приблизительно 0,75% от общего

количества автоаварий, что, несомненно, можно считать занижением показателей.

Но даже по предоставленной статистике можно проследить увеличение количества ДТП с 1 января 2012 года после вступления в действие Федерального закона (ФЗ) РФ от 1 июля 2011 года № 170-ФЗ «О техническом осмотре транспортных средств и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

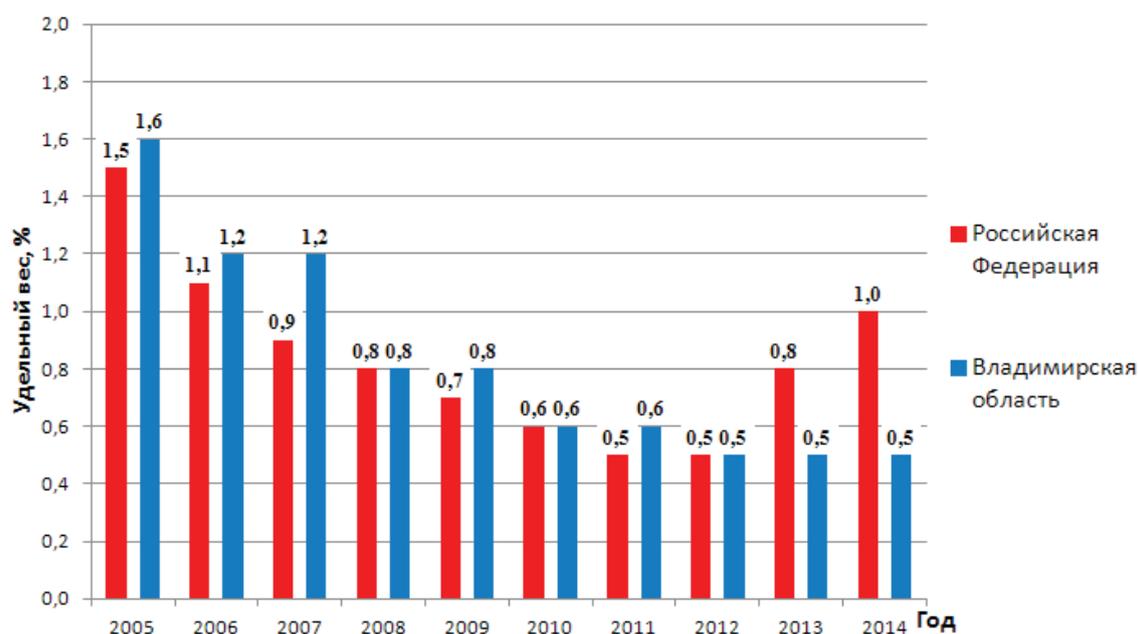


Рис. 7. Удельный вес ДТП по причине эксплуатации технически неисправных автомобилей от общего количества дорожных инцидентов по данным ГИБДД МВД РФ

На основании № 170-ФЗ функция обязательного государственного технического осмотра (ТО) автомобилей из ведения ГИБДД МВД РФ передана юридическим лицам и произведена замена талонов государственного ТО на диагностические карты, на основании которых выдается полис ОСАГО [66].

Уже в 2012-2014 гг. наблюдается резкий рост количества дорожных инцидентов, причиной которых стали технические неисправности и отказы АТС. Все факты свидетельствуют о том, что данный ФЗ оказался неэффективным и требует значительной доработки, т.к. не решил задачу ограничения допуска неисправных транспортных машин к эксплуатации. Его применение в нынешнем виде ухудшает безопасность на дорогах России.

С принятием данного ФЗ автовладельцы получили возможность пройти инструментальный контроль технического состояния своих АТС без очередей, но отсутствие персональной ответственности операторов пунктов технического осмотра (ПТО) и некорректные действия страховых компаний не дают возможности полностью исключить неисправные транспортные машины из эксплуатации.

Проделанные автором [22] исследования показали, что передача функций по контролю работоспособности автомобилей

операторам от соответствующих подразделений в ГИБДД МВД РФ привела к снижению числа АТС, признанных по результатам проверок технически неисправными с 30% до 17%.

Авторы работ [4; 55] также не согласны с приведенными ГИБДД МВД РФ [15] сведениями, характеризующими дорожно-транспортную аварийность из-за неисправностей АТС. Во-первых, это связано с невозможностью, во многих случаях, определить реальное техническое состояние автомобилей в момент наступления ДТП. Такая проблема существует вследствие частичного или полного разрушения узлов и агрегатов, техническая неисправность которых явилась причиной дорожных инцидентов. Во-вторых, дополнительное влияние на статистические данные оказывает существующая практика проведения экспертизы, которая имеет недостатки: сложность проведения, высокая стоимость, отсутствие необходимых контрольных приборов и запаздывание результатов исследования. По этим причинам, в более чем 75% автоаварий из-за неработоспособного состояния АТС, виновным признают водителя. В официальной статистике фигурируют лишь те ДТП, которые вызваны явными техническими неисправностями: отрыв колеса, разрыв шины или тормозного шланга.

Стоит отметить, что проблема занижения действительных показателей дорожно-транспортной аварийности из-за неработоспособного состояния автомобилей была поднята ещё в 70-х годах прошлого века. В работе [34] отмечается, что при изучении ДТП, зачастую, в качестве главной причины дорожных инцидентов, выступает нарушение водителем правил дорожного движения (ПДД). Рассматриваются случаи наезда автомобилей на пешеходов, которые объясняются поздним применением тормозов или превышением скорости. Однако падение давления в тормозном приводе или износ тормозных колодок не затрагиваются. Вследствие чего, в работе [20] выдвигается гипотеза, утверждающая, что фактическое количество ДТП, вызванное техническими неисправностями, значительно выше статистического.

Судя по проведённому анализу научных публикаций современных авторов, можно с уверенностью сказать, что данной проблеме уделяется повышенное внимание.

Версия неисправного технического состояния транспортных машин представлена как основная причина возникновения около 20% автоаварий в работе [26]. В [55] автор утверждает, что неработоспособное состояние АТС является причиной 20-25% ДТП от общего количества. В докладе [69] установлено, что при оценке реального показателя дорожно-транспортной аварийности по причине технических неисправностей автомобилей погрешность составляет приблизительно 57%.

В работе [41] указано, что официальной статистикой фиксируется менее 20% дорожных инцидентов, произошедших из-за неработоспособного состояния АТС. В [19] автор уделяет особое внимание тому, что около 15% автоаварий происходит вследствие эксплуатации транспортных машин с неисправностями систем, влияющими на их активную безопасность.

Для того, чтобы оценить мировой показатель удельного веса ДТП из-за неисправного технического состояния АТС, были приведены исследования зарубежных учёных. По данным работы [41] он составляет: во Франции около 20%, в Венгрии 18-20%, в США 15-20%, в Германии 10-20%, в Дании 11-12% от общего количества дорожных инцидентов.

На основании проведённого анализа можно сделать вывод, что фактический по-

казатель аварийности по техническим неисправностям автомобилей в России может достигать уровня 20%.

Совершенствование существующих и разработка новых методик проведения послеаварийной экспертизы транспортных машин позволит получать более достоверные сведения о причинах ДТП. Ввиду усложнения конструкции АТС требуется расширить перечень систем, которые следует контролировать при их ТО с использованием средств инструментального диагностирования, например, подвеску. Оснащение автомобилей системами видеофиксации дорожной обстановки и конструирование необходимых контрольных приборов позволит более объективно подойти к установлению количественных и качественных показателей аварийности [20].

Конструкция СКУ и её особенности в эксплуатации

В последние несколько десятилетий основным направлением в развитии науки и техники является усовершенствование электроники и внедрение её во все сферы жизнедеятельности. Транспортные машины не стали исключением [57]. С каждым годом увеличивается количество и улучшается качество создаваемых для облегчения жизни водителей АТС электронных помощников. Массовое производство электроники способствует её удешевлению и это приводит к тому, что всё больше автомобилей выпускаются с подобными системами серийно. В сложившейся ситуации оправданно надеяться на такие электронные помощники функциями по диагностированию транспортных машин и расширять функциональные возможности систем бортового диагностирования (СБД) или самодиагностирования (ССД). Это особенно актуально в условиях роста парка АТС, принадлежащих гражданам, и увеличения межсервисных интервалов эксплуатируемой на дороге техники.

Устойчивость и управляемость являются важнейшими эксплуатационными свойствами транспортной машины, которые определяют её активную безопасность [21].

Система курсовой устойчивости (СКУ) препятствует потере автомобилем устойчивости и управляемости при его движении в сложных дорожных условиях и некорректных воздействиях водителя на органы управления Система осуществляет динамическую коррекцию параметров движения

АТС, позволяя удерживать транспортную машину в пределах заданной траектории.

СКУ – одна из наиболее важных частей комплекса активной безопасности автомобиля, содействующая благополучному выходу из сложившейся критической ситуации, в которой среднестатистический водитель на обычной транспортной машине попал бы в ДТП. Благодаря данной системе навыки экстремального вождения отходят на второй план. От водителя требуется вести АТС, в то время как ЭБУ СКУ самостоятельно принимает решение в складывающейся дорожной обстановке, ведь главный принцип системы – выравнивать автомобиль в том направлении, куда повернуты передние колёса [63].

Разработчики с полной уверенностью заявляют, что не может быть таких ситуаций, когда система навредит, бывают исключительно безвыходные случаи. Эксперты называют СКУ важнейшим изобретением в области автомобильной безопасности после ремней безопасности. Но возможности СКУ по исправлению опасной ситуации не беспредельны, ведь законы физики обмануть нельзя.

В техническом регламенте Таможенного союза (ТР ТС) 018/2011 от 9 декабря 2011 года № 877 «О безопасности колёсных транспортных средств» прописано, что с 1 января 2016 года становится обязательным оснащение автомобилей АБС, если заявка на проведение оценки их соответствия впервые подавалась после 4 января 2008 года. При этом оборудование таких автомобилей СКУ останется на усмотрение изготовителей [65].

В [45] приведена официальная статистика, утверждающая, что ещё в 2010 году во всём мире 41% новых легковых АТС были оснащены СКУ, а в 2013 году уже 59%. Эта цифра будет ежегодно увеличиваться и в недалёкой перспективе приблизится к 100%.

По данным [5] в 2012 году на дорогах России эксплуатировалось 62% транспортных машин, оснащённых АБС, и только 23% с СКУ. Это свидетельствует о том, что РФ по этим показателям отстаёт от средних мировых. К примеру, в аналогичный период времени в Европейском союзе (ЕС) у 90% автомобилей была установлена АБС, а у 68% и СКУ.

Интересен и тот факт, что все выпускаемые в Европе транспортные машины кате-

гории М1 с 1 ноября 2014 года обязаны оборудоваться СКУ [45].

Такое решение стран ЕС было обусловлено результатами проведённых исследований, которые показали, что около 80% ДТП по причине неуправляемого заноса можно было бы избежать, если бы на АТС была установлена СКУ [1].

Insurance Institute for Highway Safety (IIHS) проводил исследования по безопасности различных электронных систем автомобилей. Выяснилось, что оснащение транспортных машин системами активной безопасности, в том числе и СКУ, приводит к снижению смертности до 43% в ДТП с участием нескольких автомобилей и на 56% в дорожных инцидентах с участием одного АТС.

Наибольший интерес представляют аварии с участием одной транспортной машины, т.к. чаще всего они происходят по причине того, что водитель не справился с управлением.

Тот же институт привёл данные о вероятности переворота автомобиля со смертельным исходом. Оказалось, что при использовании систем активной безопасности такая вероятность снижается почти на 80%.

На основании проведённых исследований немецкие страховщики выяснили, что 35-40% дорожных инцидентов со смертельным исходом могли бы закончиться благополучно, если бы на АТС были установлены СКУ [59].

В работе [16] проведён анализ «механических» дорожных инцидентов без пострадавших людей. По результатам которого, было выявлено, что примерно 14% водителей совершали контраварийное действие в момент наступления ДТП. В такой ситуации большое значение имеет оснащённость и техническое состояние транспортных машин.

Также замечено, что автомобили, оснащённые СКУ, имеют лучшую курсовую устойчивость на высоких скоростях, нежели подобные АТС без СКУ.

Выводом исследований стало то, что СКУ более чем в 30% случаев является полезной при маневрировании транспортных машин на скорости от 40 до 60 км/ч, и более чем в 50% случаев при маневрировании автомобилей на скорости от 60 до 80 км/ч.

По результатам анализа «механических» дорожных инцидентов выяснилось, что установка СКУ на АТС способствует

уменьшению числа ДТП, которые связаны с контраварийным воздействием водителя, более чем на 8%.

В работе [16] тяжёлым и особо тяжёлым дорожным инцидентам было уделено особое внимание. Практика дорожно-патрульной службы (ДПС) показывает, что тяжёлыми признаются автоаварии, в которых пострадало не менее 5 человек, но при этом число погибших не превышает 5. Особо тяжёлыми ДТП являются те, в которых погибло более 5 человек и более 5 получили различные увечья. Зачастую такие дорожные инциденты возникают по причине того, что водители совершали манёвры, которые без СКУ были довольно затруднительными для выполнения.

Результаты исследований говорят о том, что около 56% тяжёлых и особо тяжёлых автоаварий можно было бы предотвратить или уменьшить тяжесть их последствий, если бы на транспортных машинах была установлена СКУ (рис. 8, 9).

С большой долей вероятности можно говорить о том, что данные, предоставляе-

мые ДПС, не позволяют однозначно определить те случаи, в которых СКУ была бы эффективна или нет. Понимая это, можно предположить, что информация о пользе СКУ носит скорее вероятностный характер и не может считаться абсолютно достоверной. Но, безусловно, она позволяет продемонстрировать возможный положительный эффект, ожидаемый при использовании СКУ на АТС [16].

Следовательно, система повышает активную безопасность транспортной машины и устраняет недостатки системы «водитель – автомобиль – дорога – среда» (ВАДС) [53].

СКУ контролирует не только продольную динамику движения АТС, но и поперечную, при критических величинах сцепления, например при скольжении. Управление автомобилем, близкое к пределу физических возможностей, должно учитывать три степени свободы транспортной машины на плоскости дорожного полотна (поворот вокруг вертикальной оси, поперечную и продольную составляющие движения) [32].

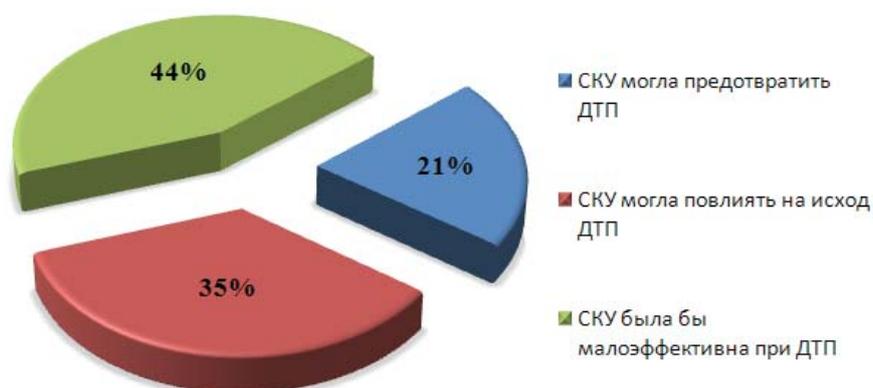


Рис. 8. Возможная эффективность срабатывания СКУ при различных ДТП

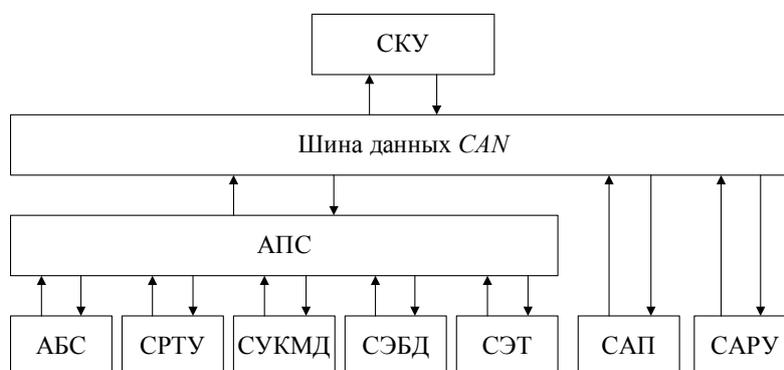


Рис. 9. Информационная схема СКУ

СКУ является наиболее сложной, т.к. управляет работой антиблокировочной системы (АБС), антипробуксовочной системы (АПС), системы активной подвески (САП), системы активного рулевого управления (САРУ), системы распределения тормозных усилий (СРТУ), системы управления крутящим моментом двигателя (СУКМД), системы электронной блокировки дифференциала (СЭБД), системы экстренного торможения (СЭТ). Данную систему можно рассматривать как расширенный вариант АБС и АПС, т.к. многие их узлы объединены (рис. 9).

В работе [32] приведены преимущества АБС и АПС, которые развиваются СКУ по средствам повышения активной безопасности движения во время управления АТС по следующим пунктам:

- обеспечение водителя активной помощью в любых критических динамических ситуациях;

- увеличение курсовой устойчивости транспортной машины даже в предельно затруднённых условиях движения при различных режимах эксплуатации, таких как частичное или полное торможение, движение накатом, торможение двигателем, разгон и выполнение контраварийных манёвров;

- лучшее использование потенциала сцепления между шинами и дорожным покрытием в зависимости от условий движения по сравнению с АБС и АПС.

- улучшение управляемости при максимально сложных условиях движения;

По своей сути, это единая система, работающая комплексно и обеспечивающая целый набор вспомогательных контраварийных действий. Электронный блок управления (ЭБУ) СКУ получает сигналы от датчиков, которые отслеживают различные па-

раметры поведения автомобиля, и оценивает ситуацию.

Для определения намерений водителя в системе используется выключатель педали тормоза (ВПТ) и следующие датчики: положения педали акселератора (ДППА), угла поворота рулевого колеса (ДУПРК). Для оценки фактического поведения транспортной машины установлены датчики: давления в главном тормозном цилиндре (ДД в ГТЦ), крутящего момента на рулевом колесе (ДКМ на РК), положения дроссельной заслонки (ДПДЗ), положения коленчатого вала (ДПКВ), поперечного ускорения (ДПпоУ), продольного ускорения (ДПроУ), уровня кузова (ДУК), угловой скорости (ДУС), частоты вращения колёс (ДЧВК) (рис. 10).

ДУС определяет скорость вокруг вертикальной оси, а ДПроУ устанавливается только на полноприводные АТС, т.к. на переднеприводных или заднеприводных транспортных машинах продольное ускорение оценивается косвенным путём (давление в главном тормозном цилиндре, частота вращения колёс, режим работы двигателя).

Датчики контролируются в три этапа:

1) При проверке важнейших датчиков применяется активный тест. ДУПРК обладает активной схемой самоконтроля. После подачи возбуждения на чувствительный элемент ДУС приходит ответный сигнал. Такая проверка называется тестом самодиагностики. В процессе активных тестов исполнительных механизмов и торможения происходит анализ правильности показаний ДД в ГТЦ.

Все ответные сигналы с датчиков поступают в ЭБУ СКУ, где происходит их постоянный анализ и на его основе вырабатывается общий сигнал исправности данной системы;

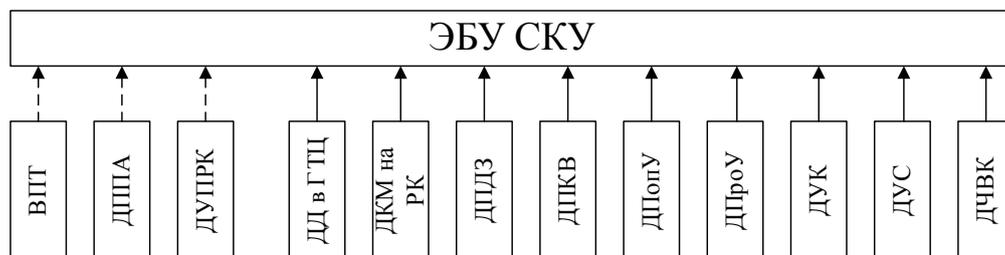


Рис. 10. Взаимодействие входных устройств с ЭБУ СКУ

→ – сигналы, по которым ЭБУ СКУ оценивает действия водителя;

→ – сигналы, по которым ЭБУ СКУ оценивает фактические параметры движения автомобиля

2) Во время движения АТС осуществляется контроль по программе постоянного наблюдения. При нём используются алгоритмы для определения величины рассогласования сигналов датчика и его калибровки;

3) Регистрируется искажение сигналов или их выход за допустимые пределы (нарушение формы). Осуществляется проверка на короткое замыкание соединительных проводов и внутренних соединений или их разрыв.

Все этапы обеспечиваются бортовой системой самодиагностики, интегрированной в ЭБУ СКУ. ССД частично или полностью отключает СКУ исходя из влияния неисправности на безопасность движения АТС и её вида [46].

ЭБУ СКУ использует информацию от датчиков, и в соответствии с заложенным программным обеспечением формирует управляющие воздействия на исполнительные механизмы.

Обмен данными между ЭБУ СКУ, ЭБУ АБС, ЭБУ двигателя внутреннего сгорания (ДВС), ЭБУ автоматической коробки переключения передач (АКПП), ЭБУ РУ с электроусилителем (ЭУ) и ЭБУ активной подвески происходит по мультисистемной шине данных CAN (рис. 11).

Входные устройства и исполнительные механизмы различных ЭБУ взаимодействующих с СКУ занесены в таблицу 2.

При трогании с места и во время движения ЭБУ СКУ вычисляет теоретическую скорость автомобиля путём считывания сигналов с каждого из ДЧВК с частотой до 30 раз в секунду. Силы, стремящиеся увести АТС с заданной траектории, рассчитываются на основе получаемых данных о скорости вращения колёс и поперечном ускорении. ЭБУ СКУ распознаёт ситуацию, как неконтролируемую, при наличии различий в намерениях водителя и реальным движением автомобиля [11].

Система начинает взаимодействие с ЭБУ АБС и вычисляет нужное тормозное воздействие на одно или несколько колёс, передавая сигнал на исполнительные механизмы. При блокировке одного или нескольких колёс во время торможения ЭБУ СКУ начинает процесс регулировки тормозного усилия в три фазы, подобно АБС: создание, поддержание и сброс давления. Самой современной и эффективной конструкцией считается раздельная регулировка на задних колёсах, так называемая 4-канальная АБС. В том случае, если ЭБУ СКУ распознает пробуксовку одного или двух ведущих колёс, он работает аналогично АПС, воздействуя на ТС и ДВС. Взаимодействие ЭБУ СКУ с ЭБУ ДВС позволяет корректировать мощность и обороты коленчатого вала, положение дроссельной заслонки и производить торможение двигателем.



Рис. 11. Взаимодействие ЭБУ СКУ с другими ЭБУ

→ – передача данных по шине CAN; → – сигналы, поступающие от датчиков;
 → – управляющие воздействия на исполнительные механизмы
 (после обработки сигналов с датчиков в соответствии с заложенными алгоритмами)

Таблица 2

Входные устройства и исполнительные механизмы различных ЭБУ взаимодействующих с СКУ

ЭБУ взаимодействующие с СКУ	Входные устройства	Исполнительные механизмы
ЭБУ АБС	ВПТ, ДД в ГТЦ, ДУПРК, ДЧВК, датчик уровня тормозной жидкости, реле нагрузки на педаль	Электромагнитные клапаны, электродвигатель насоса обратной подачи гидравлического блока
ЭБУ АКПП	ВПТ, датчик частоты вращения на входе коробки передач, датчик частоты вращения на выходе коробки передач, датчик температуры рабочей жидкости, датчик положения рычага селектора, датчик положения паркинга/нейтрали	Распределительный модуль с электромагнитными клапанами и золотниками-распределителями с механическим приводом
ЭБУ активной подвески	ДПопУ, ДПроУ (устанавливается только на полноприводные автомобили), ДУПРК, ДУК, переключатель режимов работы	Регулировочные электромагнитные клапаны или электромагнитные катушки, компрессор, привод амортизаторов
ЭБУ ДВС	ДПДЗ, ДПКВ, ДППА, датчик давления топлива, датчик давления масла, датчик температуры масла, датчик детонации, датчик массового расхода воздуха (при наличии расходомера воздуха), датчик температуры воздуха на впуске, датчик давления во впускном коллекторе, датчики температуры охлаждающей жидкости, кислородные датчики, датчики положения впускного распределительного вала, датчики положения выпускного распределительного вала	<i>В топливной системе:</i> электрический топливный насос, перепускной клапан; <i>в системе впрыска:</i> форсунки, клапан регулирования давления; <i>в системе впуска:</i> привод дроссельной заслонки, привод впускных заслонок; <i>в системе зажигания:</i> катушки зажигания, свечи зажигания, клапан изменения фаз газораспределительного механизма; <i>в системе охлаждения:</i> термостат, ЭБУ вентиляторов радиатора, вентиляторы радиатора; <i>в системе рециркуляции отработавших газов:</i> электромагнитный клапан управления подачей вторичного воздуха, клапан рециркуляции отработавших газов; <i>в системе улавливания парами бензина:</i> электромагнитный клапан продувки адсорбера
ЭБУ РУ с ЭУ	ДКМ на РК, датчик угла поворота двигателя ЭУ	Двигатель ЭУ

ЭБУ СКУ постоянно проверяет наличие необходимости воздействия на двигатель и при восстановлении автомобилем устойчивости тут же его прекращает. Расчёт необходимого воздействия на исполнительные механизмы ДВС производится с учетом включенной передачи в АКПП, которую сообщает ЭБУ АКПП. Одновременно с этим дается запрет ЭБУ АКПП на переход на пониженную передачу. Также ЭБУ СКУ производит воздействие на исполнительные механизмы АКПП, САП и САРУ [60].

У СКУ имеется кнопка отключения для увеличения сцепления, путём пробуксовки ведущих колёс, в некоторых случаях. В это время система функционирует только путём тормозного воздействия до скорости 40 км/ч. Если условия для её работы сохраняются при разгоне более 40 км/ч, она действует до 60 км/ч.

После того, как зажигание включено, контрольная лампа СКУ горит. При пуске двигателя ЭБУ СКУ 2-3 секунды производит проверку системы и электрических ком-

понентов. Если проверка не выявила неисправностей, лампа СКУ гаснет. В случае обнаружения неисправностей, предупреждающая лампа продолжает гореть. При недостаточной зарядке аккумуляторной батареи (АКБ) контрольная лампа может погаснуть позже, чем через 2-3 секунды, т.к. СКУ функционирует при напряжении АКБ от 10,7 до 18,0 В.

Если на щитке приборов горит лампа СКУ, это свидетельствует об отключении системы из-за какой-либо неисправности в ней самой или в связанных с ней ЭБУ. Возможность движения в нормальном режиме (без СКУ) при этом сохраняется. Если в это время контрольная лампа АБС не горит, то АБС находится в исправном состоянии и торможение с ней возможно. Если существует отказ в АБС, то СКУ тоже перестаёт функционировать.

Загорание предупреждающей лампы СКУ во время движения АТС информирует водителя о потере курсовой устойчивости и начале функционирования системы. Это свидетельствует о различном числе оборотов колёс или потере управляемости транспортной машиной, например при заносе, которое зафиксировал ЭБУ СКУ [60].

СКУ может привести к дорожному инциденту или серьёзно ограничить возможность эффективного торможения и управления при движении или подскоке автомобиля на траве, бездорожье, неоднородном льду и асфальте с налётом сухого песка. Это обусловлено тем, что АТС находится в постоянной смене условий движения, а информация, приходящая на ЭБУ СКУ, поступает с небольшой задержкой. В такой ситуации система может принять решение, которое будет кардинально неверным в сложившихся дорожных условиях.

При проверке транспортной машины с СКУ на беговых барабанах, система должна быть отключена. Для этого следует вынуть предохранитель, снять разъем с гидравлического блока или ЭБУ СКУ или соединить клемму диагностического разъема с массой (для отключения системы достаточно выполнить один из приведённых вариантов).

При наличии СКУ буксировка АТС с поднятыми передними колёсами допускается только при неработающем двигателе, а на всех 4 колёсах возможна без ограничений.

Если отключалась АКБ, нужно проинициализировать ДУПРК. После замены ЭБУ СКУ следует выполнить его кодирование [60].

Существующий большой спектр экспериментальных методик оценки устойчивости и управляемости превращает проведение испытаний в дорогостоящий и длительный процесс, что ограничивает сферу их применения сертификационными испытаниями. Усложнение конструкции систем активной безопасности автомобиля и их развитие до уровня мехатронных, позволяет автоматизировать процесс управления транспортной машиной и обеспечить помощь водителю в аварийной ситуации. Мехатронные системы, которые используются в конструкции автомобилей, являются электронными помощниками при управлении АТС, и как любые системы, могут иметь технические неисправности и отказы. Поскольку СКУ осуществляет управление ТС, РУ, а так же силовым агрегатом, её неисправности в эксплуатации влияют на активную безопасность транспортных машин и зачастую приводят к фатальным последствиям [21].

Заблаговременный вывод из эксплуатации автомобилей с неисправностями систем, влияющими на их активную безопасность, сможет способствовать снижению риска возникновения ДТП [22].

Внедряемые в конструкцию АТС бортовые диагностические комплексы, осуществляющие мониторинг технического состояния систем активной безопасности, позволят предупредить линейные отказы транспортных машин и зафиксировать имеющиеся неисправности в момент возникновения аварийной ситуации [20]. Данная мера даст возможность реализовать имеющийся потенциал для уменьшения высокого уровня дорожно-транспортного травматизма в России.

Снижение количества автоаварий, намеченное Постановлением Правительства РФ от 3 октября 2013 года № 864 «О федеральной целевой программе «Повышение безопасности дорожного движения в 2013-2020 годах», реально добиться с помощью усовершенствования механизма контроля и надзора за деятельностью по обеспечению безопасности парка АТС [49].

Следует отметить, что и по сей день не существует стандартизированной методики диагностирования АБС и СКУ транспортных машин в эксплуатации, хотя научные исследования в этой области не прекращаются [21]. Таким образом, в системе технической эксплуатации автомобилей отсут-

ствуют нормативы и методики, позволяющие управлять техническим состоянием СКУ и обеспечивать её безотказность.

Методы диагностирования СКУ и её элементов

Результатом применения электроники стала автоматизация управления различными системами и адаптация их работы под разнообразные дорожные условия. Успешное внедрение электронных систем управления привело к значительному улучшению активной безопасности АТС. Уже сейчас стоимость электрооборудования транспортных машин превышает 10% от их общей стоимости.

При всём положительном эффекте от появления и усовершенствования электронных систем автомобилей появились новые сложные задачи: диагностирование и устранение их неисправностей [57].

В [47] приведены данные, что приблизительно в 70% случаев выход автомобилей из строя обусловлен отказом электроприборов или электронных систем управления. Это вызвано тем, что современные автомобили эксплуатируются в условиях целого ряда дестабилизирующих факторов, которые зачастую носят случайный характер и изменяются в широком диапазоне.

Диагностирование – не требующий разборки процесс оценки технического состояния различных по сложности объектов, подразумевающий в себе получение данных об их надёжности. Осуществляется путём измерения различных параметров, которые характеризуют состояние объекта, и дальнейшего сравнения их с нормативами. Диагностирование входит в систему технического обслуживания и ремонта, являясь наиболее совершенной по качеству формой контрольных работ. Благодаря ему происходит комплексное управление техническим состоянием автомобиля:

- оптимизация режимов регламентного контроля;
- оперативное выявление потребности транспортной машины в техническом обслуживании и ремонте с дальнейшей проверкой качества их выполнения [7].

Диагностирование – основной элемент для управления долговечностью и надёжностью АТС [47]. Его результатом является диагноз, который бывает положительным – обуславливается работоспособным состоянием автомобиля (требует подкрепления

информацией об остаточном ресурсе), и отрицательным – неработоспособным (нуждается в конкретизации и устранении неисправностей).

В [57] утверждается, что по замыслу конструкторов при решении задачи по выявлению неисправностей электронных систем управления важная роль отводится ССД ЭБУ. Она производит анализ входных и выходных сигналов, проверяя их соответствие эталонным аналогам, которые заложены в память. При выходе сигнала за уровень допустимого предела в память записывается информация о неисправности соответствующей системы АТС. Регистрация каждого сбоя в работе фиксируется в энергонезависимой памяти в виде «кода неисправности» [76]. Когда «код неисправности» зарегистрирован, СБД сосредотачивается на отдельных системах или их элементах и если в последующей работе неисправность больше не появляется, информация о ней стирается. Также в память в виде «стопкадра» вносится дополнительная информация о режиме работы и условиях окружающей среды в момент наступления сбоя, а также о виде неисправности (единичная погрешность в работе, постоянный дефект и т.д.).

Зачастую информации от ССД достаточно для нахождения неисправности. Но иногда данная система может функционировать не корректно из-за различных повреждений цепей или программных ошибок, которые происходят вследствие повреждения ячеек памяти [57].

В [3] упоминается, что одним из первых производителей, устанавливающим СБД на свои АТС, стала автомобильная корпорация *Toyota*.

Стандарт *OBD-II* стал единым для всех автопроизводителей. Он определяет протокол связи, тип и распиновку диагностического разъёма и формат передаваемых данных. Только 4 (корпус) контакта стандартного разъёма *Diagnostic Link Connector (DLC)* из 16 не могут менять своего назначения. Остальная часть контактов отводится для уникальных тестов производителей и не описывается стандартом.

Для исключения пуска двигателя с неисправностями при каждом запуске ДВС происходит полный цикл бортового диагностирования (БД) или самодиагностирования (СД). Мигание соответствующих контрольных ламп оповещает о результате БД и даёт возможность выявить систему, в которой

возникла неисправность. Сеанс СД можно провести только при включённом зажигании [71].

Часто СБД не может выявить неисправности самого ЭБУ. В этом случае для обнаружения неисправности следует использовать методику, описанную в [57], которая отличается от стандартных, используемых в большинстве ситуаций.

Определить неисправность ЭБУ можно по наличию механических повреждений, отсутствию связи с диагностическим прибором, пропаже сигналов управления исполнительными механизмами и отсутствию реакций на сигналы от датчиков.

В [57] предложен алгоритм проведения диагностирования ЭБУ:

- считывание «кодов неисправностей» из памяти;
- осуществление визуального осмотра;
- проверка значений фактических параметров;
- проведение теста исполнительных механизмов;
- замена ЭБУ на заведомо исправный (является наиболее достоверной, но сопровождается большим риском, т.к. возможен выход из строя исправного ЭБУ).

Осуществление последнего пункта алгоритма зачастую невозможно по причине отсутствия в наличии у станций технического обслуживания автомобилей (СТОА) запасных ЭБУ. С помощью этого метода можно только оценить неисправность ЭБУ в целом, а не устранить её, что тоже указывает на его недостатки.

Если несколько десятилетий назад для диагностирования неисправностей можно было обойтись простейшими инструментами и приборами (ключами, монтировками, вольтметром, амперметром, индикаторной лампой, компрессор, тестером и т.д.), то процесс диагностирования в наши дни уже нельзя представить без сложных электротестеров, автосканеров и диагностических стендов [57].

В [72] указано, что при СД РУ с электро-механическим усилителем (ЭМУ) происходит проверка на работоспособность и поиск неисправностей его основных компонентов. Недостатком СБД РУ с ЭМУ считается отсутствие возможности контроля его механической части [13]. Также возможно диагностирование с помощью различных сканер-тестеров. Динамика изменения технического состояния РУ с ЭМУ в эксплуата-

ции не может контролироваться с помощью «кодов неисправностей», которые считываются сканер-тестерами, т.к. значительное число ошибок возникает при полной потере его работоспособности [25]. Но из-за отсутствия гидравлических шлангов и жидкости РУ с ЭМУ всё же считается более надёжным, нежели РУ с электрогидравлическим усилителем (ЭГУ) и намного чаще используется в конструкции автомобилей. Поэтому исследования в области разработки новых методов диагностирования РУ с электромеханическим усилителем актуальны в наше время [52].

Авторы работы [23] утверждают, что на сегодняшний день методы контроля технического состояния АТС с АБС подразделяются на три вида: ССД, дорожные и стендовые испытания ТС.

Согласно методике дорожных испытаний содержащихся в ГОСТ Р 51709-2001 [14] транспортная машина должна двигаться по ровной горизонтальной дороге со скоростью выше 40 км/ч (порог отключения АБС) с дальнейшим затормаживанием путём однократного нажатия на орган управления в режиме экстренного торможения. В это время происходит оценка эффективности срабатывания тормозов по длине тормозного пути до полной остановки АТС и проверка равномерности их действия по отсутствию следов юза и прямолинейности траектории.

Метод диагностирования тестером, подключённым к диагностическому разъёму ЭБУ АБС до начала дорожных испытаний, который даёт возможность зафиксировать моменты начала сброса давления в приводе тормозов, рассмотрен авторами патента [39]. Процедуру, описанную в ГОСТ Р 51709-2001 [14] повторяют не менее 5 раз. При помощи фиксации тестером порядка начала сбрасывания давления в каждом приводе тормозных механизмов колёс контролируется их работоспособность, техническое состояние системы в целом, а также появляется возможность обнаружения неисправностей датчиков и электрических цепей входящих в систему.

Методика оценки работоспособного состояния АБС транспортных машин категории М1 в дорожных условиях согласно нормативам ГОСТ Р 51709-2001 [14] создана авторами работы [8]. Ими выбран комплексный оценочный параметр – проскальзывание колёс при торможении АТС. Также ими

был разработан комплекс для определения работоспособного состояния АБС автомобилей категории М1, который описан в работе [36] и включает в себя: ДЧВК, датчик скорости транспортной машины для определения эффективности торможения, динамометрическая педаль для оценки усилия оператора на органе управления ТС, шестиканальный аналого-цифровой преобразователь, преобразователь напряжения для питания шестиканального аналого-цифрового преобразователя и портативный компьютер (ПК) для записи и обработки полученных данных.

Авторами работы [23] утверждается, что широкое распространение в наши дни получили стендовые испытания АБС в условиях эксплуатации.

Метод диагностирования АБС с установкой одной оси автомобиля на роликовый стенд, для прокрутки его заторможенных колёс и измерения силы торможения, разработан авторами патента [67]. Со специального устройства на ЭБУ АБС направляется сигнал для имитации вращения тех колёс, которые при стендовых испытаниях неподвижны. Это сделано для улучшения качества результатов стендовых испытаний и их максимального приближения к реальным условиям дорожных испытаний на тормозную эффективность автомобиля.

Метод контроля эффективности торможения колёс и устойчивости АТС, оборудованных АБС, при проведении диагностирования на инерционных роликовых стендах, получил своё теоретическое обоснование в работе [48]. Системы стенда измеряют усилие на органе управления, силы торможения, угловые скорости опорных роликов и нагрузки на оси, а ДЧВК измеряют угловые скорости тормозящих колёс транспортных машин. Далее эта информация анализируется, что является основой данного метода.

Содержащий неподвижную и подвижную платформу с опорными и следящими роликами испытательный стенд предлагается авторами патента [38]. За счёт моделирования различных покрытий дорожного полотна с разным коэффициентом сцепления для любого выбранного оператором числа колёс стенд позволяет проводить диагностирование АТС, оборудованных АБС.

Комплексные моделирующие установки, дающие возможность определить закономерности функционирования в процессе

торможения элементов АБС и системы в целом созданы автором работы [51].

В работе [28] указано, что на сегодняшний день существует два поколения экспертных систем. Первое поколение – компьютерные системы, не имеющие накопителя предыдущего опыта и способные повторить диагноз диагноста, апеллируя лишь его знаниями. Их методы и модели представления знаний описывают только статические предметные области.

Ко второму поколению относят экспертные системы, усиливающие интеллектуальные способности человека. Их ещё называют партнёрскими. Они используют не поверхностные, а глубинные знания и имеют возможность эволюционировать. Такие системы способны решать задачи в сфере динамической базы данных предметной области [28].

Авторы работы [29] предлагают экспертную систему первого поколения для диагностирования АБС и СКУ, которая построена на основе модели «граф-дерево». В начале процесса диагностирования проходит визуальный осмотр и анализ поведения транспортной машины во время дорожных испытаний. При отсутствии неисправности разборка не требуется, а система делает запрос информации от измерительных приборов. Если неисправность обнаружена, то для её локализации происходит снятие показаний измерительных приборов с разборкой механизмов и агрегатов для дальнейшего диагностирования. Результатом теста является нахождение искомой неисправности.

Данная экспериментальная система применима на стандартных диагностических постах. Для этого необходимо иметь подъёмник, универсальный набор инструментов, мультиметр, автомобильный осциллограф и персональный компьютер (ПК).

Методика тестирования, при достижении оператором пункта «Диагностирование АБС», основана на поиске неисправностей датчиков системы, электрических цепей и гидравлического блока. А при достижении пункта «Диагностирование СКУ» производится тестирование для выявления отказов клапанов и гидравлического блока за счёт прикрепления диагностического модуля. Происходит разделение неисправностей ЭБУ и гидравлического блока. Данный диагностический комплекс универсален.

В работе [23] указано, что исследования по разработке стендовых методов испыта-

ния автомобилей с АБС на сегодняшний день приобрели наибольшую популярность. Хотя достоверность полученного в ходе таких исследований диагноза зачастую не даёт возможность оценить работоспособность системы в целом.

В работе [19] содержится информация об эксплуатации автомобилей с АБС, и утверждается, что 30% неисправностей данной системы в процессе диагностирования не обнаруживаются. Методы контроля работоспособного состояния АБС, существующие на сегодняшний день, позволяют водителю узнать о неисправностях данной системы лишь во время экстренного торможения на дорожном покрытии с низким коэффициентом сцепления.

Авторы работы [23] утверждают, что благодаря высокому уровню развития телематических систем возможно отслеживать техническое состояние АБС во время эксплуатации по показателям работоспособности.

В работе [46] утверждается, что безопасность эксплуатации СКУ обеспечивается её повышенной надёжностью и БД неисправностей отдельных компонентов и системы в целом. ССД СКУ контролирует все компоненты, которые электрически соединены с ЭБУ. Программное обеспечение СБД АБС и АПС, контролирующее сигналы и действия электрических соединений, легло в основу повышения надёжности и поиска неисправностей СКУ. Наряду с этим в СКУ внедрены дополнительные средства и программное обеспечение.

Стремление повысить надёжность СКУ предъявляет дополнительные высокие требования к методам и процессам производства компонентов, их сроку службы и функциональному взаимодействию друг с другом, а также на методы диагностирования неисправностей самой системы. В процессе работы СКУ должны быть минимизированы риски возникновения неисправностей. Любые отказы должны быть оперативно локализованы при первом же их появлении [46].

Современное оборудование для диагностирования выступает в роли интерфейса между ЭБУ и диагностом [2]. С помощью него диагност получает доступ к тестам исполнительных механизмов и памяти неисправностей, а также в удобном для себя виде (числовом или графическом) может узнать фактические значения параметров [61].

Неоценимую помощь при проведении диагностирования оказывают базы данных, записанные в памяти диагностических стоек, в которых находится информация о расположении и типе диагностических разъемов, эталонных значениях фактических параметров и бортовом оборудовании большинства марок и моделей автомобилей. Процесс диагностирования без неё был бы весьма затруднён [57].

В [3] приводятся условия, которые следует соблюдать при проведении диагностирования:

- ДВС прогрет до нормальной рабочей температуры;
- напряжение АКБ не менее 11 В;
- рычаг переключения передач в нейтральном положении;
- дополнительное оборудование отключено.

Аппаратура, применяемая при диагностировании ЭБУ различных марок и моделей автомобилей [74, 75]:

1) Компактный мультимарочный сканер *Launch CReader VIII (CRP 129)* предназначен более чем для 40 марок транспортных машин, произведённых в различных странах.

2) Мультимарочный сканер *Bosch KTS 520* используется для детальной расшифровки «кодов неисправностей» и доступа к необходимой диагностической информации по автомобильному оборудованию. Совместим более чем с 2000 моделей около 100 марок АТС и способен продиагностировать около 160 систем автомобилей, включающих в себя приблизительно 20000 разновидностей ЭБУ.

3) Универсальный мультимарочный сканер *ScanDoc* используется для диагностирования различных электронных систем управления. Взаимодействует с большинством автомобилей Европейских, Китайских, Корейских и Японских марок, а также с некоторыми моделями транспортных машин российских производителей.

В работе дилерских центров корпорации *Toyota* используется следующее универсальное диагностическое оборудование, с помощью которого можно проводить диагностирование всех ЭБУ установленных на различные модели АТС марок *Toyota* и *Lexus* [75]:

1) Профессиональный адаптер *Toyota TIS Mini VCI (TechStream)* предназначен для всех электронных систем транспортных машин, выпущенных корпорацией *Toyota* с

1996 года. Совместим со всеми моделями автомобилей марок *Lexus*, *Scion* и *Toyota*.

2) Адаптер *Toyota Mongoose MFC (TechStream)* применяется как на профессиональной СТОА, так и в небольшом частном гараже на несколько АТС. Имеет схожий функционал с профессиональным сканером *Toyota Denso Diagnostic Tester II*. Используется для всех моделей транспортных машин марок *Lexus*, *Scion* и *Toyota*, выпущенных с 2002 года.

3) Профессиональный сканер *Toyota Denso Diagnostic Tester II (Toyota Intelligent Tester II)* осуществляет диагностирование и проверку параметров всех ЭБУ. Предназначен для проведения полного диагностирования всех моделей автомобилей марок *Lexus*, *Scion* и *Toyota*.

4) Оригинальный сканер *MongoosePro Toyota (TechStream)* применяется для полномасштабного диагностирования и работы с любыми моделями АТС марок *Lexus*, *Scion* и *Toyota*. Является современной разработкой и заменой профессионального сканера *Toyota Denso Diagnostic Tester II*. Рекомендован автомобильной корпорацией *Toyota* к использованию с адаптером *Toyota Mongoose MFC (TechStream)*.

Использование сложной аппаратуры для диагностирования современных транспортных машин не исключает применение простейших инструментов и приборов, что позволяет максимально быстро обнаружить и ликвидировать неисправность. Этот вариант диагностирования считается комбинированным и является наиболее эффективным.

Такой метод контроля технического состояния АБС приведён в работе [58]. Он осуществляется путём совмещения диагностирования АТС на тормозных стендах с беговыми барабанами и мультимарочным сканером *Bosch KTS 520* [74].

Но, не следует забывать, что применение комбинированных средств по-прежнему только диагностику высокого уровня, с хорошими знаниями в сфере устройства автомобиля, электроники, а также законов химии и физики. Также диагност не может знать все нюансы электронных систем, т.к. на современных транспортных машинах различных марок и моделей встречается множество вариантов диагностических разъёмов и программного обеспечения [57].

В [17] приводится статистика компьютерного диагностирования всех систем, ко-

торая утверждает, что в ходе диагностирования приблизительно 20% от общего числа неисправностей составляют отказы ЭБУ и около 40% системы связи. Не редко результаты компьютерного диагностирования не подтверждаются поэлементным.

Научные работы в сфере повышения надёжности и активной безопасности АТС

Проблемой обеспечения устойчивости и управляемости транспортных машин занимались многие учёные, в их числе: Е.В. Балакина, А.В. Бочаров, М.В. Гурьянов, И.А. Долгов, В.Г. Дыгало, И.В. Колосов, В.В. Королев, Р.П. Кушвид, С.А. Морозов, В.Н. Нгуен, Т.М. Нгуен, Ч.К. Нгуен, А.А. Ревин, В.З. Русаков, В.И. Рязанцев, Д.А. Соцков, И.В. Ходес, С.С. Шадрин и другие. В рамках литературного обзора более подробно рассмотрены работы указанных учёных.

Основной целью исследования Е.В. Балакиной стало улучшение устойчивости движения автомобиля в режиме торможения без потери тормозной динамики на основе предпроектного выбора параметров элементов шасси, осуществление которого даёт возможность их комплексного определения, как конструктивных, так и эксплуатационных.

Для решения поставленных целей в её работе создана математическая модель и программный комплекс. Модель включает уточнённые зависимости: динамики заторможенного колеса, явления угловых колебаний управляемых колёс, явления увода эластичных колёс, упругих свойств шин [9].

В своей работе А.В. Бочаров занимался вопросом разработки экспериментально-расчётной методики оценки параметров, характеризующих управляемость и устойчивость АТС со всеми управляемыми колёсами и внедрением её в практику полигонных испытаний.

Им создана одномассовая пространственная математическая модель с тремя степенями свободы, а также разработана структурная схема критериев управляемости и устойчивости для получения взаимосвязи между параметрами, оцениваемыми водителем-экспертом и величинами, измеряемыми в ходе испытаний [12].

Целью исследования М.В. Гурьянова явилась разработка частотного метода оценки курсовой устойчивости транспортной

машины на основе её моделей в виде систем со многими степенями свободы с учётом характеристик грунта и нелинейным взаимодействием шин с дорожным покрытием, а также комплексная оценка качества переходных процессов в боковом движении.

Автором впервые построены математические модели автомобиля, позволяющие учитывать неограниченное число степеней свободы его упругой системы и неголономную связь шин с дорожным покрытием, в различных системах координат. Разработан программный комплекс для оценки устойчивости АТС и решения задач динамики в боковом движении [18].

В научной работе И.А. Долгова проведена разработка алгоритмов действия систем управления и расчётных методик моделирования курсового движения транспортной машины, а также анализ управляемого движения АТС в системе «водитель – автомобиль – дорога» математическими методами.

По итогам исследования предложено описание процесса управления движением транспортной машины на основе следящей системы с оптимизацией целевой функции управления [27].

В диссертации В.Г. Дыгало разработана методология альтернативных (виртуально-физических) испытаний автоматизированных тормозных систем АТС и технология моделирования, позволяющая исследовать рабочий процесс систем активной безопасности автомобиля и их эксплуатационные свойства в режиме торможения на стадии проектирования и производства для повышения качества, сокращения сроков и экономии ресурсов.

Итогом данной работы явилось решение проблемы создания основ альтернативной методики испытаний тормозной системы транспортной машины с АБС и сокращение процесса проектирования за счёт повышения качества доводочных испытаний систем активной безопасности АТС. Выделены основные классы моделей: «Колесо», «Шасси», «Шасси с водителем». Разработана технология создания лабораторных комплексов для проведения виртуальных испытаний как автомобиля в целом, так и его элементов при оснащении системой активной безопасности в соответствии с отечественными и международными нормативными требованиями [30].

Целью работы И.В. Колосова стала разработка расчётно-теоретических оценоч-

ных показателей управляемости двухосного АТС в режиме подруливания, а также методики их количественного определения и выявления конструкционных причин, вызывающих отклонение транспортной машины от прямолинейного курса.

Автором предложена математическая модель прямолинейного движения двухосного автомобиля в режиме подруливания, задаваемых кинематически поворотом РК по синусоидальному закону и основанная на жёсткостных и демпфирующих свойствах эластичных шин в поперечном направлении. Впервые предложено определение поперечного смещения и аналитическая зависимость для поперечной жёсткости шин на основе известной величины коэффициента их увода. Введено понятие – коэффициент конструкционной дестабилизации [33].

Исследование В.В. Королева было направлено на выявление закономерностей в системе электромеханического усилителя РУ транспортной машины, которые позволяют оценить её воздействие на показатели РУ, характеризующие эксплуатационные свойства АТС в целом.

Итогом работы стала разработка обобщённой модели системы электромеханического усилителя РУ, учитывающая конструктивные параметры автомобиля, условия движения и тип электропривода [35].

В своей научной работе Р.П. Кушвид затронул тематику прогнозирования показателей управляемости и устойчивости автомобиля с использованием комплекса экспериментальных и теоретических методов. Целью исследования являлось развитие теории и методов исследования управляемого движения транспортной машины, направленное на сокращение сроков проектирования и доводки АТС за счёт прогнозирования их показателей управляемости и устойчивости.

По итогам исследования разработана новая пространственная математическая модель автомобиля, учитывающая такие факторы, как эластокинематику подвески, изменение кинематических характеристик при силовом воздействии, изменение положения оси и центра бокового крена подвесочной массы транспортной машины, механику шин, кинематику и жёсткость РУ. Её применение даёт возможность с высокой степенью точности прогнозировать показатели управляемости и устойчивости АТС.

Автором создан новый комплексный метод определения связей конструктивных систем автомобиля с его управляемостью и устойчивостью, сочетающий экспериментальные исследования и теоретические, на базе пространственных математических моделей [37].

В своей работе С.А. Морозов определял угловые параметры качения управляемых колёс, как фактор повышения устойчивости движения и снижения нагруженности передней оси грузового автомобиля. Целью его исследования стало повышение устойчивости криволинейного движения транспортной машины, снижение уровня нагрузок, воспринимаемых элементами передней оси АТС, и уменьшение интенсивности бокового проскальзывания шин управляемых колёс путём выбора рационального соотношения углов наклона и поворота управляемых колёс.

Автором сформирована динамическая модель автомобиля для исследования устойчивости транспортной машины против опрокидывания, учитывающая влияние наклона плоскостей управляемых колёс, боковой и радиальной податливости шин [40].

Научная работа В.Н. Нгуена была направлена на повышение эффективности диагностирования технического состояния подвески АТС на вибростендах. Целью стало повышение безопасности автомобиля в условиях эксплуатации, на основе высокоэффективного стендового метода контроля влияния технического состояния подвески на качество сцепления шин с опорной поверхностью.

Итогом его работы стала разработка математической модели системы «кузов – подвеска – шина – стенд». На основе аналитического и экспериментального исследования данной системы обоснован метод диагностирования технического состояния подвески на вибростендах [42].

Целью исследования Т.М. Нгуена явилось повышение безопасности транспортной машины на основе методики комплексной расчётной оценки свойств траекторной управляемости по относительным боковым смещениям и ускорениям.

Автором разработан метод расчётной оценки влияния подвески, шин и рулевого привода на управляемость АТС, а также программа для оценки управляемости двухосной транспортной машины, позволяющая выбирать геометрические параметры для

достижения наилучшего свойства управляемости автомобиля [43].

Главной задачей в работе Ч.К. Нгуена стало повышение устойчивости движения АТС с использованием системы активного управления схождением колёс совместно с другими системами активной безопасности.

Результатом его труда стала разработка математических моделей взаимодействия шины с дорогой при использовании модифицированной зависимости (диаграммы) горизонтальной силы, действующей в пятне контакта, от коэффициента скольжения и транспортной машины с применением модифицированной диаграммы скольжения на базе известной диаграммы скольжения [44].

В своей работе А.А. Ревин занимался решением проблемы повышения эффективности, устойчивости и управляемости при торможении автомобиля.

Автором осуществлено математическое описание динамики торможения двухосного АТС и математическая формализация динамики системы «привод – тормоз – колесо – дорога», а также создана модель транспортной машины при исследовании тормозных свойств на комплексной установке. Это удалось реализовать благодаря использованию имитационного моделирования на основе детерминированных пространственных многомассовых моделей, при учёте закономерностей планирования многофакторных искусственных экспериментов, с последующей графо-аналитической обработкой результатов для определения оптимальных зон изменения факторов [50].

Целью научной работы В.З. Русакова стало повышение безопасности автомобиля в эксплуатации. До его исследования не были систематизированы требования к оценке устойчивости и управляемости АТС в эксплуатации, не определена научно-методическая и техническая база для оценки отдельных свойств активной безопасности транспортной машины в эксплуатации, не выявлена необходимость развития полэлементной диагностики АБС.

Для решения данных задач автором разработана 4-массовая, 7-ми степеней свободы и 14-го порядка математическая модель на основе матричной структуры дифференциальных уравнений курсового движения автомобиля. Предложены вычислительные алгоритмы реализации моделей и прикладные программы «Курсовое движение», «Устойчивость движения» и «Прямолиней-

ное движение». Созданная база данных позволяет, на основе имитационной модели, уточнять методики расчёта манёвра для практики расследования и экспертизы ДТП с тяжёлыми последствиями в штатных и нештатных режимах движения с учётом изменения технического состояния систем активной безопасности АТС в эксплуатации [54].

Исследование В.И. Рязанцева было направлено на прогнозирование устойчивости движения транспортной машины с применением активной системы управления схождением колёс.

Автором разработан метод оптимизации параметров системы управления схождением для снижения энергозатрат на управление, уменьшения износа подвижных частей регулируемого рулевого привода и повышения устойчивости автомобиля. Создан метод управления схождением в режимах условно прямолинейного движения и движения на вираже, а также по косоугору, под действием боковой внешней нагрузки (ветра) [56].

Д.А. Соцков в научной работе затронул необходимость повышения эффективности торможения АТС при сохранении движения. Целью его работы являлось повышение активной безопасности транспортной машины при торможении на основе оптимизации распределения и регулирования тормозных сил.

Автор разработал модель для сравнительной оценки алгоритмов управления АБС и их оптимизации, позволяющую на стадии проектирования оценить преимущества и недостатки предлагаемых вариантов, а так же для исследования активной безопасности автомобиля при торможении [64].

Целью исследования И.В. Ходеса стала разработка теории и обоснования методологии прогнозирования и формирования показателей управляемости, позволяющей напрямую и комплексно оценивать динамическое искажение траектории сопоставлением кинематической траектории, задаваемой, в том числе, тестовым периодическим поворотом управляемых колёс (за период или его части) и динамически воспроизводимой при сопутствующих свободных и вынужденных поперечных колебаниях. Предшествующие модели прогнозирования и формирования показателей управляемости, до его работы, включали ряд параметров, которые идеализировали модели курсового движения АТС, что затрудняло прогнозирование

качества управления на этапах проектирования транспортной машины или её модернизации по нескольким параметрам.

Итогом труда И.В. Ходеса стало создание методологии прогнозирования управляемости автомобиля с учётом колебательных процессов в поперечном направлении, учитывающей эксплуатационные параметры. Произведено математическое описание кинематического курсового направления и траектории движения в функции от поворота управляемых колёс [68].

В научной работе С.С. Шадрина разработана методика расчётной оценки управляемости и устойчивости АТС на основе результатов ускоренных полигонных испытаний с помощью математической модели движения с фиксацией пяти кинематических параметров (продольная и боковая скорости, угловая скорость относительно вертикальной оси, боковое ускорение, угол поворота РК).

Предложенная методика позволяет проводить имитационное моделирование криволинейного движения транспортной машины с высокой точностью, определяемой экспериментальным характером получения исходных данных. Она применяется для определения степени влияния систем динамической стабилизации на свойства управляемости и устойчивости автомобиля в сравнении с базовой, и для сравнения эксплуатационных свойств разных АТС, в том числе одной модели [70].

Указанные исследователи в своих работах предложили различные модели курсового движения транспортной машины. Однако в исследуемых работах авторы не учитывали эксплуатационные факторы, оказывающие влияние на техническое состояние систем активной безопасности автомобиля. Разработка такой модели позволит прогнозировать параметры устойчивости и управляемости не только от изменения конструктивных параметров систем, непосредственно влияющих на безопасность движения, но и их эксплуатационного состояния. При этом её использование позволит не только минимизировать затраты на длительные и дорогостоящие полигонные испытания, но и контролировать работоспособность системы курсовой устойчивости АТС в эксплуатации. Кроме того, представляется возможным подходить к вопросу нормирования диагностических параметров, характеризующих техническое состояние транс-

портной машины и её систем, как по критерию безотказности, так и по критерию безопасной, по условию устойчивости и управляемости, эксплуатации, учитывающей взаимное влияние всех систем автомобиля друг на друга [21].

Список литературы

1. Автомобильный журнал «За рулём». Сведения об устойчивой тенденции ежегодного увеличения в автомобильном парке РФ доли иномарок. – Режим доступа: <http://www.zr.ru/content/articles/779343-inomarki-zaxvatili-rossijskie-dorogi/>. – (Дата обращения: 13.07.2015).
2. Автомобильный справочник Bosch: справочное пособие / пер. с англ. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ЗАО «КЖИ «За рулём», 2004. – 992 с.
3. АвтоМотоСпец. Работа без ошибок: самодиагностика Тойота. – Режим доступа: <http://avtomotospec.ru/sovety/samodiagnostika-toyota.html>. – (Дата обращения: 13.08.2015).
4. Анализ методов формирования требований к безопасности эксплуатируемых транспортных средств: учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Автомобиле- и тракторостроение» / С.В. Бахмутов [и др.]. – М.: МГТУ «МАМИ», 2007. – 72 с.
5. Аналитическое агентство «Автостат». Сведения о долях автомобилей, оснащённых ABS и СКУ, которые эксплуатировались на дорогах Российской Федерации и Европейского союза в 2012 году. – Режим доступа: <http://www.autostat.ru/news/view/10788/>. – (Дата обращения: 13.10.2015).
6. Аналитическое агентство «Автостат». Сведения о распределении парка российских и зарубежных автомобилей РФ по возрасту. – Режим доступа: <http://www.autostat.ru/news/view/14571/>. – (Дата обращения: 13.07.2015).
7. Баженов Ю.В. Основы теории надёжности машин: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Автомобили и автомобильное хозяйство» и «Сервис транспортных и технологических машин и оборудования (по отраслям)». – Владимир: ВлГУ, 2006. – 160 с.
8. Баженов Ю.В. Оценка работоспособности тормозной системы, оборудованной ABS / Ю.В. Баженов, М.Ф. Кунин // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 4. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/104-6769>.
9. Балакина Е.В. Улучшение устойчивости движения колёсной машины в режиме торможения на основе предпроектного выбора параметров элементов шасси: дис. ... д-ра техн. наук. – Волгоград, 2010. – 418 с.
10. Безопасность автотранспортных средств: учебник для студентов, обучающихся по специальности «Автомобиле- и тракторостроение» / В.В. Ломакин [и др.]; под общей ред. В.В. Ломакина. – М.: МГТУ «МАМИ», 2011. – 299 с.
11. Борщенко Я.А. Электронные и микропроцессорные системы автомобилей: учебное пособие / Я.А. Борщенко, В.И. Васильев. – Курган: КГУ, 2007. – 207 с.
12. Бочаров А.В. Разработка экспериментально-расчётной методики оценки параметров, характеризующих управляемость и устойчивость легкового автомобиля со всеми управляемыми колёсами: дис. ... канд. техн. наук. – Дмитров, 1996. – 184 с.
13. Васильев В.И. Методы диагностирования автомобильного рулевого управления с электромеханическим усилителем / В.И. Васильев, В.В. Емельянов // Приложение к журналу «Современные проблемы науки и образования». – М.: ИД «Академия Естествознания», 2014. – № 6. – С. 5.
14. ГОСТ Р 51709-2001. Автотранспортные средства. Требования безопасности к техническому состоянию и методы проверки. – М.: Стандартинформ, 2010. – 37 с.
15. Государственная инспекция безопасности дорожного движения Министерства внутренних дел Российской Федерации. Сведения о показателях состояния безопасности дорожного движения. – Режим доступа: <http://www.gibdd.ru/stat/>. – (Дата обращения: 13.07.2015).
16. Грошев А.М. Применение электронных систем курсовой устойчивости на коммерческом транспорте российского производства / А.М. Грошев, А.В. Тумасов // Журнал ААИ. – М.: ООО «Издательский Дом ААИ ПРЕСС», 2010. – №1 (60). – С. 34-37.
17. Гурский А.С. Электронные системы управления автомобилем. Часть 3: Диагностирование электронных блоков управления автомобильных систем: лабораторные работы (практикум) для студентов специальностей «Техническая эксплуатация автомобилей» и «Автосервис» / А.С. Гурский, Е.Л. Савич. – Минск: БНТУ, 2012. – 63 с.
18. Гурьянов М.В. Частотный метод оценки курсовой устойчивости автомобиля на основе его моделей в виде систем с многими степенями свободы и нелинейным взаимодействием шин с дорожным покрытием: дис. ... канд. техн. наук. – Ульяновск, 2007. – 226 с.
19. Денисов Ив.В. Разработка методики управления техническим состоянием систем автомобиля, влияющих на безопасность движения: дис. ... канд. техн. наук. – Владимир, 2011. – 224 с.
20. Денисов Ил.В. Исследование влияния технического состояния автотранспортных средств на дорожно-транспортную аварийность в Российской Федерации / Ил.В. Денисов, А.А. Смирнов // Материалы VIII Всероссийской научно-практической конф. «Организация и безопасность дорожного движения». – Тюмень: ТюмГНГУ, 2015. – С. 71-77.
21. Денисов Ил.В. Исследование имитационных моделей курсового движения автотранспортных средств / Ил.В. Денисов, И.А. Терентьев, Д.А. Хомутов // Материалы XVI Международной научно-практической конф. «Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств». – Владимир: ВлГУ, 2014. – С. 55-61.
22. Денисов Ил.В. Научные предпосылки автоматизации технологических процессов управления работоспособностью автотранспортных средств в эксплуатации / Ил.В. Денисов // Материалы XVI Международной научно-практической конф. «Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств». – Владимир: ВлГУ, 2014. – С. 41-49.
23. Денисов Ил.В. Обзор методов диагностирования тормозных систем автомобилей с ABS / Ил.В. Денисов, Н.И. Гуцу // Материалы XV Международной научно-практической конф. «Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств». – Владимир: ВлГУ, 2013. – С. 44-51.
24. Денисов Ил.В. Оценка уровня дорожно-транспортной аварийности с использованием нового относительного показателя / Ил.В. Денисов, А.И. Моисеев, Д.А. Хомутов // Материалы XV Международной научно-практической конф. «Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств». – Владимир: ВлГУ, 2013. – С. 124-129.
25. Денисов Ил.В. Планирование эксперимента по нормированию критерия работоспособности электромеханического усилителя рулевого управления автомобиля категории М1 / Ил.В. Денисов, Р.В. Нуждин, А.А. Смирнов // Материалы XVI Международной научно-практической конф. «Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств». – Владимир: ВлГУ, 2014. – С. 62-66.
26. Диагностирование автомобилей. Практикум: учебное пособие / А.Н. Карташевич [и др.]; под ред. А.Н. Карташевича. – Минск: «Новое знание», 2011. – 208 с.
27. Долгов И.А. Анализ управляемого движения автомобиля в системе «Водитель-Автомобиль-Дорога» математическими методами: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2013. – 214 с.
28. Дыгало В.Г. Диагностический комплекс систем активной безопасности автомобиля. Диагностика ABS и ESP / В.Г. Дыгало [и др.] // 63-я Открытая студенческая научно-

- техническая конф. «СНТК университета машиностроения 2013». – М.: МГТУ «МАМИ», 2013. – С. 220-224.
29. Дыгало В.Г. Комплекс для диагностики систем активной безопасности автомобиля / В.Г. Дыгало [и др.] // Известия Волгоградского государственного технического университета. – Волгоград: ВолгГТУ, 2013. – №10 (113). – С. 102-105.
30. Дыгало В.Г. Методология альтернативных (виртуально-физических) испытаний автоматизированных тормозных систем колёсных машин: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Волгоград, 2014. – 36 с.
31. Зиманов Л.Л. Организация государственного учёта и контроля технического состояния автомобилей: учебное пособие для студ. учреждений высш. проф. образования. – М.: ИЦ «Академия», 2011. – 128 с.
32. Коваленко О.Л. Электронные системы автомобилей: учебное пособие / О.Л. Коваленко. – Архангельск: ИПЦ САФУ, 2013. – 80 с.
33. Колосов И.В. Оценка управляемости двухосной колёсной машины в режиме подруливания: дис. ... канд. техн. наук. – Волгоград, 2003. – 200 с.
34. Коноплянко В.И. Основы безопасности дорожного движения: книга предназначена для водителей, преподавателей автошкол и курсов ДОСААФ. – М.: ДОСААФ СССР, 1978. – 128 с.
35. Королев В.В. Система электромеханического усилителя рулевого управления автомобиля: дис. ... канд. техн. наук. – Тольятти, 2005. – 188 с.
36. Кунин М.Ф. Методика оценки работоспособности тормозной системы автомобилей категории М1, оборудованных ABS: дис. ... канд. техн. наук. – СПб, 2013. – 135 с.
37. Кушвид Р.П. Прогнозирование показателей управляемости и устойчивости автомобиля с использованием комплекса экспериментальных и теоретических методов: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2004. – 348 с.
38. Логинюв Ю.В. Испытательный стенд: патент РФ №2431814 / Ю.В. Логинюв, В.А. Ловушкин, С.А. Шведов. – 2011. – Бюл. №29. – 10 с.
39. Малкин В.С. Способ диагностирования тормозов автомобиля, оборудованного антиблокировочной системой: патент РФ №2408482 / В.С. Малкин, А.Е. Буслаев. – 2011. – Бюл. №1. – 7 с.
40. Морозов С.А. Угловые параметры качения управляемых колёс как фактор повышения устойчивости движения и снижения нагруженности передней оси грузового автомобиля: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2006. – 227 с.
41. Мороз С.М. Обеспечение безопасности технического состояния автотранспортных средств в эксплуатации: учебное пособие. – 2-е изд., перераб. – М.: ИЦ «Академия», 2015. – 208 с.
42. Нгуен В.Н. Повышение эффективности диагностирования технического состояния подвески автотранспортных средств на вибростендах: дис. ... канд. техн. наук. – Иркутск, 2012. – 194 с.
43. Нгуен Т.М. Методика расчётной оценки траекторной управляемости автомобиля по относительным боковым смещениям и ускорениям: дис. ... канд. техн. наук. – Волгоград, 2012. – 159 с.
44. Нгуен Ч.К. Повышение устойчивости движения автомобиля использованием системы управления сходимостью колёс: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2009. – 135 с.
45. Новости Казахстана. Данные по выпуску автомобилей с ESP. – Режим доступа: http://i-news.kz/news/2014/11/04/7793642-s_1_noyabrya_avtomobili_vypuskaemye_v_es.html. – (Дата обращения: 13.08.2015).
46. Петров А.П. Антиблокировочная и противобоксочная системы тормозов: учебное пособие / А.П. Петров, С.Е. Хоменко. – Курган: КГУ, 2003. – 103 с.
47. Петров М.В. Электрооборудование, электронные системы и бортовая диагностика автомобиля: учебное пособие для студентов, обучающихся по специальности «Автомобиле- и тракторостроение» / М.В. Петров, И.Ф. Дьяков. – Ульяновск: УлГТУ, 2005. – 114 с.
48. Портнягин Е.М. Метод контроля тормозной эффективности и устойчивости автомобилей с ABS при их диагностировании на роликовых стендах: дис. ... канд. техн. наук. – Иркутск, 2009. – 207 с.
49. Постановление Правительства РФ от 3 октября 2013 года № 864 «О федеральной целевой программе «Повышение безопасности дорожного движения в 2013-2020 годах» (с изменениями на 6 ноября 2014 года). – 99 с.
50. Ревин А.А. Повышение эффективности, устойчивости и управляемости при торможении автотранспортных средств: дис. ... д-ра техн. наук. – Волгоград, 1983. – 524 с.
51. Ревин А.А. Установка для оценки эффективности автомобильных ABS // Автомобильная промышленность. – М.: «Инновационное машиностроение», 2011. – №1. – С. 27-29.
52. Ремонтная зона Тушино-Авто. Диагностика системы электроусилителя руля. – Режим доступа: <http://www.tushino-avto.ru/repair/?id=42>. – (Дата обращения: 13.08.2015).
53. Ротенберг Р.В. Основы надёжности системы «водитель – автомобиль – дорога – среда». – М.: «Машиностроение», 1986. – 216 с.
54. Русаков В.З. Безопасность автотранспортных средств в эксплуатации: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2004. – 360 с.
55. Рыбин А.Л. Анализ ДТП в системе «человек – транспортное средство – дорога» // Автотранспортное предприятие. – М.: ЗАО «НПП Транснавигация», 2011. – №11. – С. 16-19.
56. Рязанцев В.И. Прогнозирование устойчивости движения автомобиля с активно управляемым сведением колёс: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2008. – 359 с.
57. Сараева И.Ю. Диагностирование электронных блоков управления автомобиля // Автомобильный транспорт. – Харьков: ХНАДУ, 2013. – №33. – С. 19-22.
58. Сараева И.Ю. Оценка тормозной эффективности автомобиля на роликовом стенде с использованием оборудования фирмы Bosch / И.Ю. Сараева, Р.В. Саенко // Автомобильный транспорт. – Харьков: ХНАДУ, 2011. – №28. – С. 23-26.
59. Система стабилизации движения ESP (Elektronischen Stabilities Program). – Режим доступа: <http://refoteka.ru/r-187613.html>. – (Дата обращения: 13.08.2015).
60. Системы регулирования тягового и тормозного усилий (PFAB) легкового автомобиля Mercedes-Benz: учебное пособие. – М.: УЦ ЗАО «Мерседес-Бенц Автомобили», 2000. – 62 с.
61. Системы управления бензиновыми двигателями Bosch / пер. с нем. – 1-е изд. – М.: ЗАО «КЖИ «За рулём», 2004. – 480 с.
62. Совет Федерации Федерального собрания РФ. Аналитическое управление аппарата Совета Федерации. К четвертому Международному конгрессу «Безопасность на дорогах ради безопасности жизни»: аналитический доклад / О.А. Кимлацкий [и др.]; под общей ред. В.Д. Кривовой // Аналитический вестник. – М., 2012. – №26 (469). – 149 с.
63. Сообщество машин и людей. Принципы действия системы ESP. – Режим доступа: <http://www.drive2.ru/l/3956190/>. – (Дата обращения: 13.08.2015).
64. Соцков Д.А. Повышение активной безопасности автотранспортных средств при торможении: дис. ... д-ра техн. наук. – Владимир, 1988. – 547 с.
65. Технический регламент Таможенного союза 018/2011 от 9 декабря 2011 года № 877 «О безопасности колёсных транспортных средств». – 465 с.
66. Федеральный закон РФ от 1 июля 2011 № 170-ФЗ «О техническом осмотре транспортных средств и о внесе-

нии изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». – 19 с.

67. Федотов А.И. Способы диагностирования тормозной системы автомобиля, оборудованного антиблокировочной системой (варианты), способ диагностирования тормозной системы автомобиля и устройство для осуществления способов: патент РФ №2297932 / А.И. Федотов [и др.]. – 2007. – Бюл. №12. – 15 с.

68. Ходес И.В. Методология прогнозирования управляемости колёсной машины: дис. ... д-ра техн. наук. – Волгоград, 2006. – 377 с.

69. Черняев И.О. Реализация мероприятий Концепции обеспечения безопасности дорожного движения в Санкт-Петербурге: региональная система управления техническим состоянием транспортных средств (на примере Санкт-Петербурга) // Сборник докладов конференции в рамках реализации плана ФЦП «Повышение БДД в 2006-2012 гг.». – СПб.: СПбГАСУ, 2008. – С. 22-25.

70. Шадрин С.С. Методика расчётной оценки управляемости и устойчивости автомобиля на основе результа-

тов полигонных испытаний: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2009. – 132 с.

71. Электрогидравлический усилитель руля. Устройство и принцип действия: учебный материал по программе самообучения VAG №259. – 27 с.

72. Электромеханический усилитель рулевого механизма с двумя шестернями. Конструкция и принцип действия: пособие по программе самообразования VAG №317. – 31 с.

73. Юхименко В.Ф. Безопасность транспортных средств: учебное пособие / В.Ф. Юхименко, А.А. Яценко. – Владивосток: ВГУЭС, 2009. – 208 с.

74. Carmod. Оборудование для автодиагностики. Мультимарочный сканер Bosch KTS 520. – Режим доступа: http://www.carmod.ru/products/bosch_kts_520s_multimarochnyj_avtoskaner. – (Дата обращения: 13.08.2015).

75. Electronic system. Любой ремонт начинается с диагностики. – Режим доступа: <http://electronicsystem.ru/avtoskanery/diagnostika-toyota-lexus>. – (Дата обращения: 13.08.2015).

76. White Ch. Diagnostic fault. Code manual: management. – Helsinki: Haynes Publishing Group, 1998. – 221 p.

УДК 664.8.047:637.52:641.568

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СУБЛИМАЦИОННОЙ СУШКИ В ПРОИЗВОДСТВЕ МЯСНЫХ ПРОДУКТОВ

¹Дондокова С.А., ²Битиева Э.Б., ³Антипов А.В.

¹Бурятский республиканский техникум пищевой и перерабатывающей промышленности,
Улан-Удэ, e-mail: vvv84@bk.ru

²Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления,
Улан-Удэ, e-mail: bitueva_elv@mail.ru

³ООО «НED-Центр», Москва, e-mail: a225306@yandex.ru

Разработана технология национальных мясных продуктов с использованием современных методов консервирования. Экспериментально подобраны условия и режимы сушки мяса методом сублимации при атмосферном давлении. Изучены физико-химические, органолептические и микробиологические показатели сублимированного мяса. В процессе исследований установлены технологические параметры, позволяющие сделать атмосферную сублимационную сушку конкурентно-способным вакуумной сублимационной сушке процессом. Определены температуры сублимации соленого сырого и соленого вареного мяса, предложен метод досушивания сублимированного мяса при положительных температурах. Установлен коэффициент сопротивления массопереносу вареного и соленого мяса. В результате проведенных исследований разработаны сублимированные мясные с качеством, соответствующим продуктам вакуумной сублимационной сушки, при этом процесс обезвоживания проводился в обычных низкотемпературных камерах, тепловых сушильках, что существенно влияет на стоимость оборудования.

Ключевые слова: сублимационная сушка, мясо, параметры сушки, физико-химические свойства, массоперенос.

THE USE OF FREEZE-DRYING FOR THE PRODUCTION OF MEAT PRODUCTS

¹Dondokova S.A., ²Bitueva E.B., ³Antipov A.V.

¹Buryat Republican college of food and processing industry Ulan-Ude, Ulan-Ude,
e-mail: vvv84@bk.ru;

²East Siberia State University of Technology and Management, Ulan-Ude,
e-mail: bitueva_elv@mail.ru;

³«NED-Center» Ltd, Moscow, e-mail: a225306@yandex.ru

The technology of national meat products using modern methods of preservation. Experimentally selected conditions and modes of drying meat by sublimation at atmospheric pressure. Investigation of physical-chemical, microbiological and organoleptic parameters of freeze-dried meat products. During the research process parameters are set to allow atmospheric freeze drying to make competitive capable vacuum freeze drying process. Determining the temperature of the sublimation of the crude salt and roast cooked meat, we propose a method of freeze-dried meat dryness at positive temperatures. Established mass transfer coefficient of resistance of cooked and salted meats. These studies are designed to freeze-dried meat quality suitable for vacuum freeze-drying products, and the dehydration process was carried out in conventional low-temperature chamber, thermal dryers that significantly affects the cost of the equipment.

Keywords: freeze drying, meat, drying parameters, physico-chemical properties, mass transfer.

Сушка является одним из распространенных физических методов консервирования. Она производится с целью предотвращения или замедления физико-химических, биохимических и других процессов, которые могут привести к снижению питательной ценности продуктов и даже к их порче [2, 9, 10]. Сушка материалов может происходить естественным путем (на открытом воздухе) и искусственным (в сушильках). Достоинством искусственной сушки является значительно меньший цикл. Процесс сушки происходит за счет удаления влаги путем перевода последней из жидкого состояния в парообразное. Как известно процесс испарения жидкости протекает при температуре ниже ее точки кипения и при

давлениях соответствующих этой температуре. При этом количество абсолютно сухого материала остается на всем протяжении сушильного процесса постоянным и сохраняет свое свойство. По своей сущности сушка является сложным диффузионным процессом, скорость которого определяется скоростью диффузии влаги из глубины высушиваемого материала в окружающую среду с помощью вентилятора. Удаление влаги при сушке сводится к перемещению тепла и влаги внутри материала и их переносу с поверхности материала в окружающую среду [21, 23].

Известны разные способы сушки пищевых продуктов, которые зависят от способа подачи энергии при обезвоживании. Одним

из самых распространенных способов сушки продуктов является конвективный способ сушки. Он основан на передаче тепла высушиваемому продукту за счет энергии нагретого сушильного агента – воздуха или парогазовой смеси. При этом способе сушки за счет сообщаемой продукту тепловой энергии идет испарение влаги, а перенос паров влаги осуществляется сушильным агентом [16, 26].

Кондуктивный способ сушки, основан на передаче тепла высушиваемому продукту путем непосредственного контакта с нагреваемой поверхностью сушильного оборудования. Данный способ сушки для пищевых продуктов используется редко. Не удается достичь высокого качества конечного продукта вследствие неравномерности влажности конечного продукта [2, 9, 27].

Одним из современных способов сушки продуктов является акустический метод, который основан на воздействии на обезвоживаемый продукт интенсивных ультразвуковых волн. Данный процесс сушки носит циклический характер, волна выбивает влагу, находящуюся на поверхности продукта, затем оставшаяся влага равномерно распределяется по капиллярам и процесс повторяется снова.

Принципиальная особенность способа заключается в том, что сушка протекает без повышения температуры продуктов. Данный способ используется для сушки термочувствительных и легко окисляющихся материалов. Сушка продуктов акустическим способом отличается от обычных методов и по скорости выработки сухого продукта. Так, например, при сушке ферментов в акустическом поле скорость сушки повышается в 3-4 раза в сравнении с вакуумным методом [2, 9, 10, 27].

В настоящее время известны методы сушки, позволяющие интенсифицировать процессы и получить сушеную продукцию высокого качества, к которым относятся сушка в поле инфракрасного излучения и сублимационная сушка.

Сублимационная сушка представляет собой процесс обезвоживания продукта путем испарения влаги из твердого состояния, минуя жидкую фазу. При этом молекулярная структура материала мало изменяется, высушенный материал отличается высокой пористостью, в результате чего первоначальные свойства сырья быстро восстанавливаются при обводнении [17, 25, 28].

В настоящее время наибольшее применение получила вакуумная сублимационная сушка, которая используется не только для обезвоживания дорогостоящих продуктов и специфических материалов, но и для обезвоживания продуктов широкого употребления. Например, крупнейшая фирма «Nestle» (Швейцария) по производству детского питания и быстрорастворимых продуктов применяет сублимационную технологию для приготовления продуктов (кофе, молоко, какао т.д.). Фирма «Atlas» (США) в 1980 году выработала продукции сублимационной сушки на 110 тыс. тонн, в настоящее время эта цифра значительно выше. Фирма «Danone» (Франция) много лет использует исключительно лиофилизированные микроорганизмы для производства своей кисломолочной продукции: йогурт, кефир, сметана и т.д. [22, 29].

По информации организации «Green Pease» сублимационная сушка является лидером по экологичности среди традиционных способов обезвоживания, так как в этом процессе используют наиболее безопасные для окружающей среды источники тепла (инфракрасные лампы, токи высокой частоты и т.д.) и энергии (электрический ток) [5, 15, 28].

Особое место среди других способов занимает сублимационная сушка при нормальном атмосферном давлении, которая может протекать как специально организованный процесс, так и самопроизвольно. Например, при замораживании и холодильном хранении пищевых продуктов с открытой поверхностью происходит самопроизвольный процесс сублимации, приводящий к потере массы продукта с образованием корочки подсыхания. Процесс сублимации был известен еще с древнейших времен, так, например, кочевым народам (бурятам, монголам и другим), а также народам, населяющим Аляску, Чукотку, высокогорные районы южной Америки. Мясо или рыбу нарезают полосами и сушили в течение пяти месяцев с января по май на открытом воздухе [4, 10, 20, 24].

Технологический процесс сублимационной сушки при атмосферном давлении пищевых продуктов можно разделить на три периода: замораживание до температуры сублимации, сублимация, тепловая досушка.

В периоде замораживания, температура объекта сушки понижается до температуры

замораживания (обеспечивается вымораживание определенного количества влаги, которое обуславливает качество сублимированного продукта). Затем подается нагрев, и температура объекта поддерживается при температуре сублимации (что обеспечивает удаление вымороженной влаги). Второй период может быть назван периодом изотермической сушки, поскольку температура материала должна быть практически постоянной. В ходе его из материала в основном удаляется вымороженная влага. Нами установлено, что на этом процесс сублимации может быть закончен. Затем, в третьем периоде, температура продукта может быть повышена от температуры сублимации до температуры, которая позволяет досушить продукт с максимальной скоростью, но не допускает денатурации объекта. В этом периоде из продукта удаляется связанная, невымороженная влага [3, 11, 18].

Количественная теория сублимационной сушки при атмосферном давлении и методы инженерного расчета этого процесса в настоящее время пока еще находятся в процессе разработки. Поэтому для исследования массопереноса сублимационной сушки при атмосферном давлении пищевых продуктов использована информация о близких по физической природе процессах в области холодильного консервирования скоропортящихся продуктов [18, 19].

Принципиальная схема переноса тепла и влаги в камере холодильного хранения продуктов разработана Г.Д. Рютовым (1960). Позднее Б.П. Камовниковым (1979) предложена схема внешнего теплообмена для сублимационной сушки при атмосферном давлении (рис. 1).

Основными факторами, влияющими на скорость атмосферной сушки, являются соотношение между потоками теплоты, подведенными к продукту (конвекцией, радиацией, кондукцией) и отводимыми при сублимации влаги, температурный напор и температура материала [3, 11, 17].

Процессы теплообмена при сублимации при атмосферном давлении зависят от многих факторов, которые условно можно разделить на три основные группы: действующие внутри сушильной камеры, эксплуатационные (нерегулируемые), конструктивные или технологические.

Факторы первой группы включают режимные параметры сублимационной сушки при атмосферном давлении и отражают теплофизическую установку в сушильной камере (характеристики потоков и потенциалов переноса теплоты и массы внутри камеры). Факторы второй группы не поддаются контролю и регулированию в процессе сушки (изменение внешних тепло- и влагопритоков в камеру, вариации теплофизических характеристик объекта сушки и прочее). В третью группу факторов входят конструктивные особенности систем циркуляции и обработки воздуха [18, 19].

Современные представления о механизме сублимации на молекулярно-кинетическом уровне основаны на теории Я.И. Френкеля (1959). Согласно теории, наибольшую вероятность сублимации имеют те молекулы льда, которые расположены на поверхности тела и обладают максимальной скоростью теплового движения. В момент сублимации молекула затрачивает часть внутренней энергии на преодоление сил взаимодействия в твердом теле и сопротивления внешней среде.

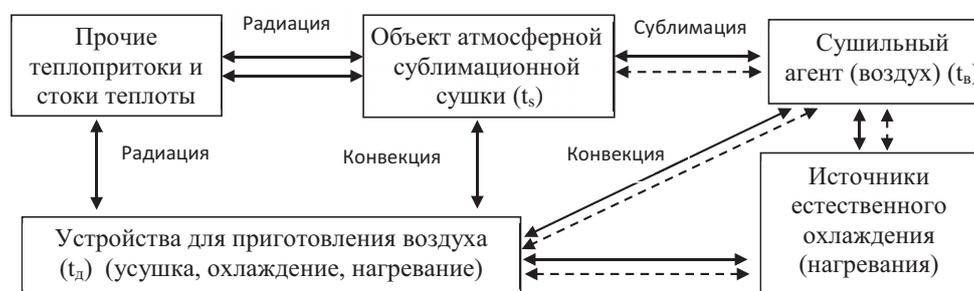


Рис. 1. Схема теплопереноса при сублимационной сушке

Условия обозначения: — поток тепла; - - - поток влаги

Таким образом, существует, некоторый энергетический барьер, преодоление которого необходимо для сублимации молекулы из твердого тела. Очевидно, что наибольшую вероятность преодоления такого барьера имеют молекулы, возбужденные внешним источником энергии.

Возможен выход молекул воды на поверхность из глубинных слоев и их последующая сублимация. Расположенная внутри кристалла молекула, возбужденная внешним источником энергии, срывается из положения равновесия. Такая молекула попадает в междоузлие кристаллической решетки и начинает диффундировать к поверхности. На месте дислоцированной молекулы возникает вакантное место («дырка»). Перемещаясь из одного положения в другое, молекула может попасть на поверхность и сублимировать. Процесс «глубинной сублимации» наиболее вероятен при объемном поглощении материалом внешней энергии. Изложенная теория учитывает лишь среднее значение энергии отрыва молекул от поверхности, которое соответствует теплоте сублимации. В действительности расположенные на поверхности объекта молекулы могут находиться в различных условиях и характеризоваться отличающимися друг от друга энергиями отрыва [11,14, 25].

Известно, что пищевые продукты достаточно высокого качества могут быть получены при умеренно низких температурах сублимации от минус 4 до минус 30°C [18,19].

При разработке режимов сушки пищевых продуктов должны учитываться особенности состава и свойств основных компонентов продукта и характер их изменений в процессе обезвоживания [9, 10, 11, 25].

Преимуществами сублимационной сушки при атмосферном давлении в сравнении с вакуумной сублимационной сушкой являются: исключение из технологического процесса дорогостоящего вакуумного оборудования; при атмосферном давлении открывается перспектива интенсификации тепломассообмена за счет конвекции сушильного агента, что исключено в условиях вакуума.

О значении мяса в питании человека известно задолго до рождения мясной промышленности из кустарных боен и мясных лавок. Еще в XIX веке Ф. Энгельсом было подчеркнута, что мясо содержит «в почти готовом виде наиболее важные вещества, в которых нуждается организм для своего обмена веществ». К таким веществам отно-

сятся белки, жиры, пищевые волокна животного происхождения (соединительнотканые белки), аминокислоты, жирные кислоты, водо- и жирорастворимые витамины, микро- и макроэлементы.

Мясо-продукт с промежуточной влажностью, следовательно, опасность микробиальной порчи достаточно высока, поэтому для прекращения или торможения микробиологических процессов используют разные способы консервирования, основанные на принципах биологического регулирования жизнедеятельностью микроорганизмов. Наиболее распространены методы консервирования солью, сахаром и использование сушки при высоких температурах. Однако методы сушки при положительных температурах имеют ряд недостатков, к которым относятся: воздействие высоких температур, способствующее развитию окислительных процессов и приводящее к потерям витаминов и биологически активных веществ; снижение качества сушеного продукта вследствие образования пленки, которая затрудняет процесс и приводит как к изменению органолептических показателей, так и снижению восстанавливаемости при вторичном обводнении перед употреблением в пищу [9, 17, 18, 27].

Целью настоящей работы является разработка технологии мясных продуктов с использованием сублимационной сушки при атмосферном давлении.

При сублимационной сушке любых пищевых продуктов необходима предварительная подготовка: зачистка, мойка, сортировка, при необходимости измельчение или нарезка и другие. Проведена предварительная подготовка сырья: зачистку мяса от соединительной и жировой тканей. До измельчения был введен процесс посола с целью улучшения органолептических характеристик. Установлено, что оптимальным способом посола мяса является шприцевание 10%-ным раствором поваренной соли в количестве 5% от массы сырья при температуре $(3\pm 1)^\circ\text{C}$ в течение 12 часов. Также установлен оптимальный размер нарезки мяса – кубиками 5x5x5 мм.

Образцы сырого мяса и мяса после тепловой обработки направлялись на сублимационную сушку.

Длительность процесса сушки, уровень температур на разных этапах процесса зависят от характера связи влаги с материалом. Согласно классификации П.А. Ребин-

дерева, формы связи влаги подразделяются на 3 группы: вода, удерживаемая силами физико-механической связи (свободная); вода, удерживаемая силами физико-химической связи (связанная); вода, связанная силами химической связи. Для получения высококачественного сублимированного продукта необходимо удаление фазовым переходом «лед-пар» (65-90)% влаги, которая удерживается за счет физико-механической связи в макро- и микрокапиллярах.

Нами разработана технология сублимационной сушки при атмосферном давлении включающая: процесс замораживания до температуры сублимации, процесс удаления вымороженной влаги при температуре сублимации и процесс досушки при положительных температурах до заданной конечной влажности.

Условия замораживания влияют на качественные показатели высушенных продуктов и продолжительность процесса сушки. Степень изменения материала при замораживании зависит от исходных свойств, глубины и скорости замораживания. Изменение свойств в процессе замораживания связано с кристаллообразованием. Размер, количество и распределение кристаллов зависят от глубины и скорости процесса. При медленном замораживании образуются единичные крупные кристаллы во внеклеточном пространстве. При быстром замораживании образуются мелкие равномерно распределенные кристаллы и миграция влаги в межклеточное пространство невелика. О преимуществах быстрого замораживания пищевых продуктов с точки зрения скорости сушки сообщали А.С. Гинзбург, М.В. Подольский и Ю.И. Новиков (1967). Ученые установили, что сушка быстрозамороженных образцов с мелкокристаллической структурой в большинстве случаев более продолжительна, чем при медленном замораживании. Однако противоположенная точка зрения была представлена И.А. Куприяновым (1970). По его мнению, целесообразнее проведение медленного замораживания, так как образующиеся в продукте большие поры облегчают массоперенос во время сушки и восстановления.

Анализ представленных работ свидетельствует, что нет единого подхода к процессу замораживания перед сублимацией. Аналогичная ситуация прослеживается по режимам собственно сублимации при атмосферном давлении. При сохранении на

достаточно высоком уровне питательных веществ, время сушки, у разных авторов, варьирует в пределах (12-96) часов. Кроме всего, в процессе предварительной подготовки сырья введен процесс посола, который отсутствует в существующих технологиях сублимирования пищевых продуктов. Поэтому были экспериментально подобраны режимы сублимационной сушки опытных образцов.

На первом этапе сублимационной сушки проводили замораживание образцов при температуре минус (18-20)°С, в течение 30 минут. Учитывая размеры нарезки, данный промежуток времени был достаточным для замораживания большей части влаги в образцах. После замораживания мясо подвергали сублимационной сушке при атмосферном давлении.

При выборе температурных режимов учитывали рекомендации А.Ф. Савченко (1970) и А.В. Антипова (1990). Для сушки пищевых продуктов животного и растительного происхождения, возможно использование достаточно широкого диапазона температур от минус 4 до минус 30°С. Для мяса и мясных продуктов рекомендуемая температура в лежит диапазоне от минус 4 до минус 18°С [1].

Однако во всех исследованиях сублимацию проводили без предварительного посола сырья. Поэтому необходимо было уточнить режимы сублимационной сушки при атмосферном давлении для соленого сырого мяса и соленого мяса после тепловой обработки. Сублимационную сушку мяса проводили при температурах: (минус 5±1)°С, (минус 11±1)°С и (минус 17±1)°С.

При выборе режимов сушки мяса основным параметром являлась массовая доля влаги в продукте. Изучены изменения массовой доли влаги при разных температурах сублимации соленого мяса. Как показывают экспериментальные данные, процесс сублимации протекал по-разному в зависимости от температуры. Однако во всех случаях, процесс изотермической сушки сначала протекал интенсивно, затем замедлялся. По этому моменту определялся собственно период сублимации. Остаточная влажность образцов, при которой происходило замедление процесса, составляла в среднем 20%. Так, при сушке соленого сырого мяса при температурах минус (5±1)°С, минус (11±1)°С и минус (17±1)°С данное значение достигалась через 8, 12, 18 часов соответственно (рис. 2).

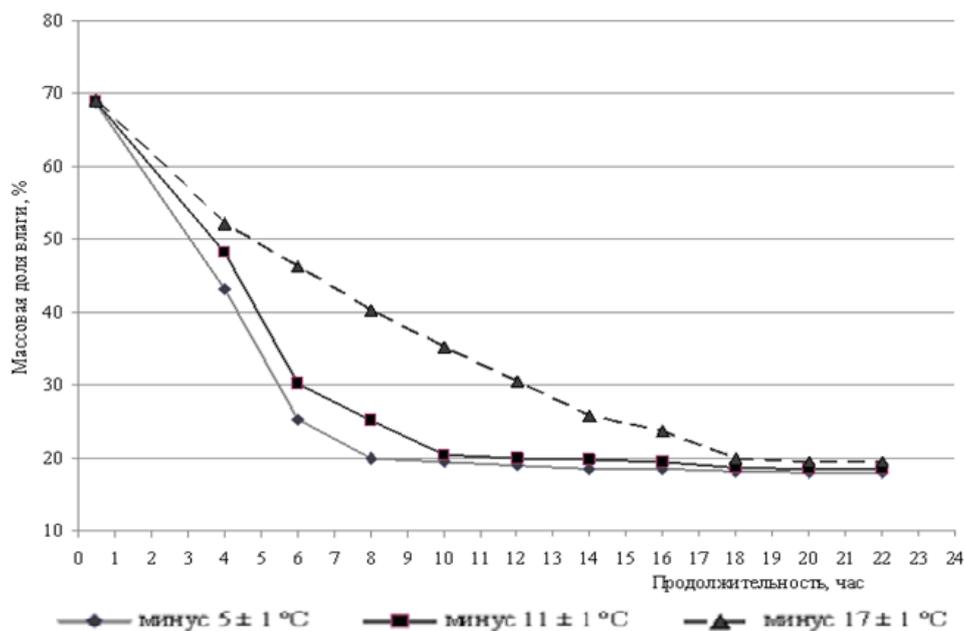


Рис. 2. Содержание влаги в образцах в зависимости от времени сублимации

Поэтому учитывая энергозатраты, дальнейшая сушка образцов была не целесообразной.

Для определения качества сушки и выбора оптимального режима сублимации проведены исследования функционально-технологических показателей: степени восстановления, водосвязывающей способности и усилия среза. Восстановление проводили при температуре $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ в течение 15 минут, гидромодуль 1:5.

Коэффициент восстановления определяли отношением массы восстановленного

продукта к массе сухого. В образцах, полученных при температуре минус $(11 \pm 1)^\circ\text{C}$ и $(17 \pm 1)^\circ\text{C}$, значение коэффициента восстановления составляет 2,70 (рис. 3).

Водосвязывающая способность восстановленных образцов мяса, полученных при минус $(5 \pm 1)^\circ\text{C}$, составляла 56,3%. Тогда как в образцах мяса, полученных при температуре минус $(11 \pm 1)^\circ\text{C}$ и минус $(17 \pm 1)^\circ\text{C}$ она составляла 63,5% (рис. 4). Образцы с более низким коэффициентом восстановления имели низкую водосвязывающую способность.

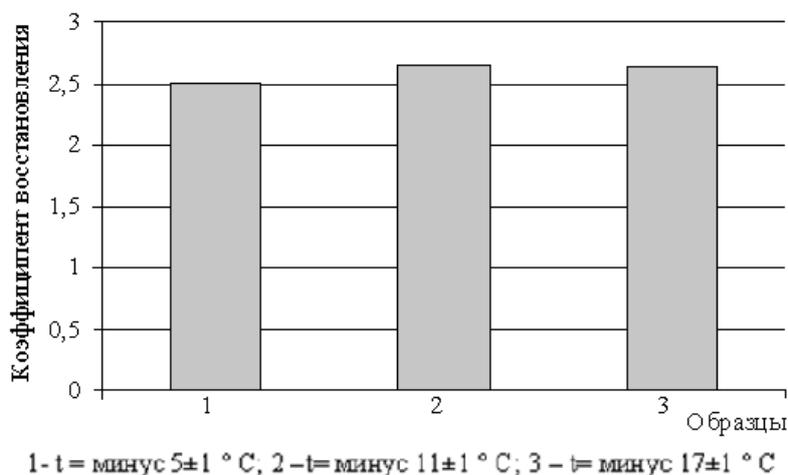


Рис. 3. Изменение коэффициента восстановления соленого сырого мяса при разных температурах сублимации

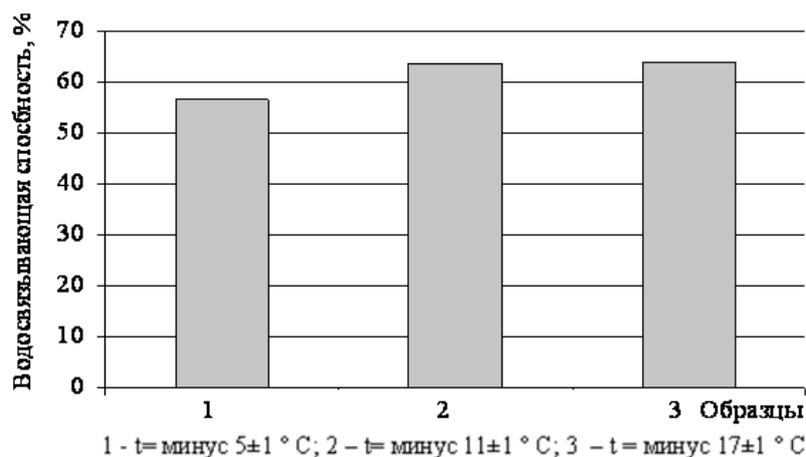


Рис. 4. Водосвязывающая способность соленого сырого мяса, сублимированного при разных температурах

Коэффициент восстановления и водосвязывающая способность образцов, полученных при минус (11±1)°C и минус (17±1)°C, были практически одинаковыми и превышали на 7 и 11% соответственно значения таковых в образцах, сублимированных при температуре минус (5±1)°C. Если сравнивать два образца, полученных при минус (11±1)°C и минус (17±1)°C, то в первом случае процесс сублимации был на 6 часов короче.

Для дополнительного подтверждения выбора режима сублимации, изучали степень жесткости восстановленного мяса, которую характеризует показатель усилия среза. Усилие среза исследуемых образцов, полученных при температуре минус (5±1)°C, составляло 3,40 кПа. Тогда как значение этого показателя в образцах, субли-

мированных при минус (11±1)°C и минус (17±1)°C, составляло в среднем 3,10 кПа, что ниже на 11% по сравнению с образцами, полученными при минус (5±1)°C. Таким образом, исследуемые образцы при сушке при температурах минус (11±1)°C и минус (17±1)°C, менее жесткие, чем образцы мяса, полученные при температуре минус (5±1)°C (рис. 5). Вероятно, это связано с низким обводнением мяса при восстановлении.

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что сушка соленого сырого мяса при температуре минус (5±1)°C проходит быстрее, однако функционально-технологические показатели образцов уступали образцам, полученным при минус (11±1)°C и минус (17±1)°C. Остаточная влажность продукта, сублимированного при температуре минус (11±1)°C, составляла 19,8%.

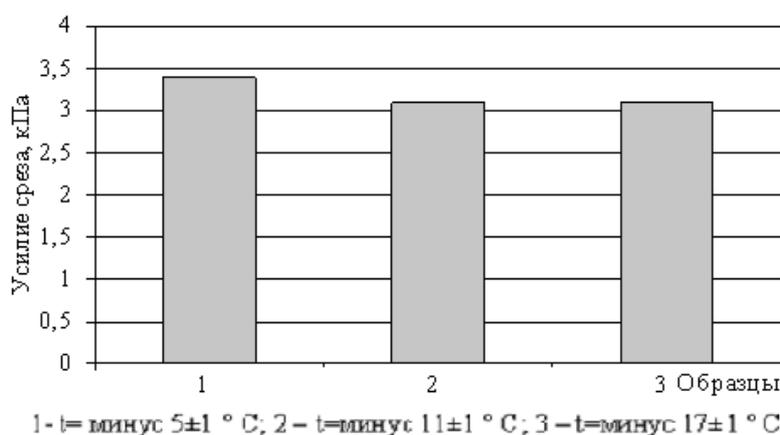


Рис. 5. Изменение усилий среза образцов мяса в зависимости от температуры сублимационной сушки

Данная серия экспериментов, позволила нам сделать вывод о том, что сублимационная сушка соленого сырого мяса может проводиться при температуре сублимации ниже -10°C , и этого достаточно, чтобы получать продукт высокого качества. Дальнейшее понижение температуры сублимации приводит к существенному увеличению продолжительности сублимации, не оказывая при этом влияния на качество сублимированного продукта.

При сублимации соленого мяса после тепловой обработки исследовали аналогичные температуры, что и в случае соленого сырого мяса. Экспериментальные данные показали, что в начале процесса содержание влаги снижалось достаточно резко. Однако по достижению остаточной влаги около 20% процесс замедлился, как при сушке сырого соленого мяса. Тем не менее, процесс сублимации соленого мяса после тепловой обработки протекал на 2 часа быстрее, чем при сушке сырого соленого мяса. Это вероятно связано с тем, что частично свободная влага была удалена при предварительной тепловой обработке. Продолжительность сушки при минус $(5\pm 1)^{\circ}\text{C}$ составила 6-7 часов, при минус $(11\pm 1)^{\circ}\text{C}$ – 10-11 часов и при минус $(17\pm 1)^{\circ}\text{C}$ – 16-17 часов (рис. 6).

Сублимированное соленое мясо после тепловой обработки может быть использовано в пищу без предварительной обработки, в качестве пищевого мясного концентрата (сухом виде) или же, как дополнение к продуктам быстрого приготовления (восстановленное). Для определения качества процесса сублимации изучены функционально-технологические свойства. Исследовали восстановленное мясо, для чего опытные образцы вносили в воду с температурой около 80°C , гидромодуль 1:5, время – 20 минут.

Коэффициент восстановления всех образцов мяса, полученных при разных температурах сублимации, составлял 2,5, что ниже на 7,4% по сравнению с образцами сублимированного соленого сырого мяса (рис. 7).

Проведены исследования водосвязывающей способности мяса после восстановления. Данный показатель во всех исследуемых образцах также был одинаковым, в пределах разброса и составлял в среднем 60,1%. Водосвязывающая способность сублимированного мяса после тепловой обработки на 6,1% ниже значений таковых в случае сублимированного соленого сырого мяса (рис. 8).

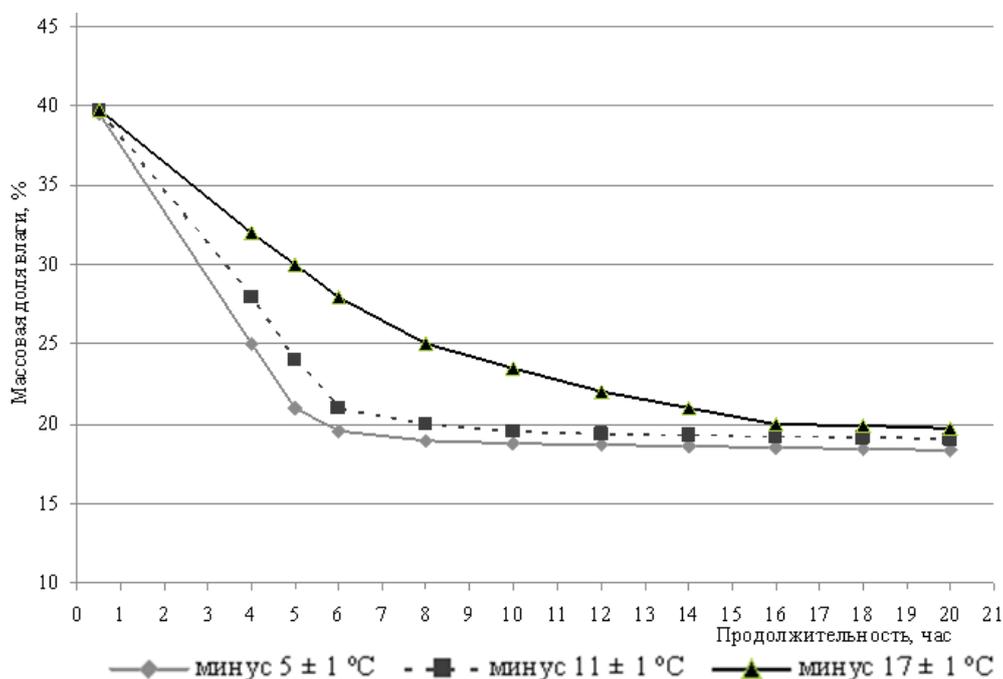


Рис. 6. Изменение массовой доли влаги в образцах соленого мяса после тепловой обработки

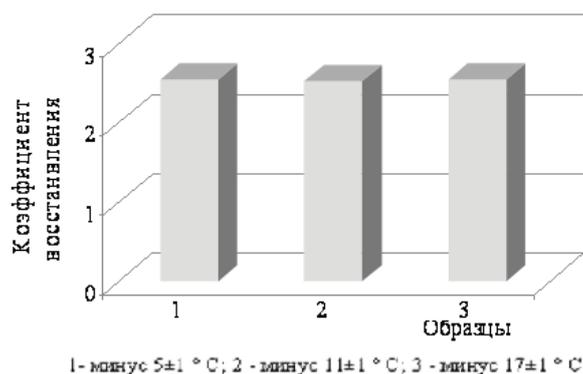


Рис. 7. Коэффициента восстановления соленого сырого мяса после тепловой обработки при разных температурах сублимации

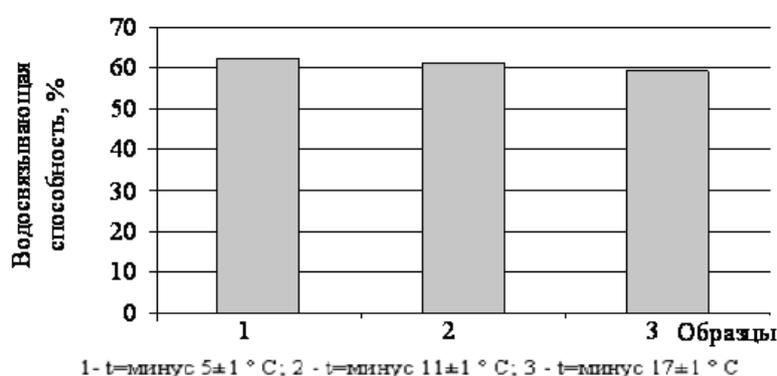


Рис. 8. Влияние температуры сушки на водосвязывающую способность соленого мяса после тепловой обработки

Исследования усилия среза образцов мяса также не дали исчерпывающего ответа о преимуществе температурного интервала (рис. 9). Так усилие среза образцов, полученных при температуре минус (5±1)°C, со-

ставляло 3,54 кПа, при минус (11±1)°C – 3,52 кПа, при минус (17±1)°C – 3,53 кПа. Тогда как значение этого показателя в образцах соленого сырого мяса в среднем составлял 3,1 кПа.

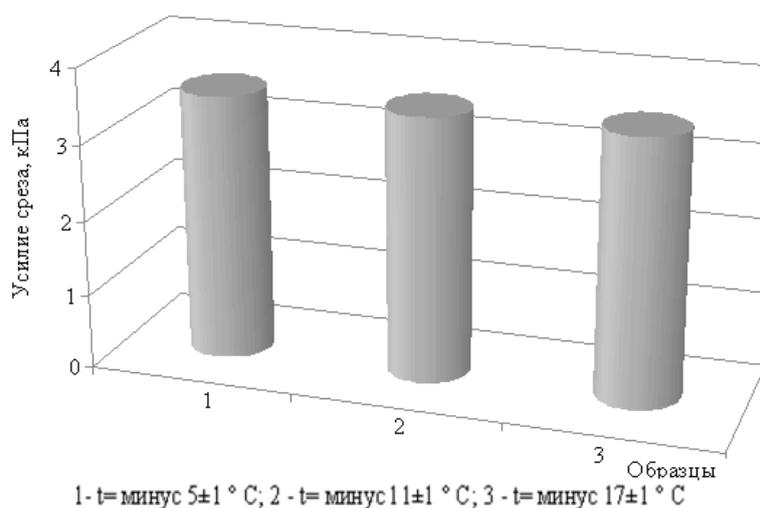


Рис. 9. Влияние температуры сушки на усилие среза образцов соленого мяса после тепловой обработки

Анализ экспериментальных данных свидетельствует о том, что разные температуры сублимации не оказывают существенного влияния на функционально-технологические показатели соленого мяса после тепловой обработки. Коэффициент восстановления и водосвязывающая способность ниже при сравнении с таковыми показателями соленого сырого мяса. Возможно, это объясняется снижением степени регидратации мяса в результате денатурации белков в процессе предварительной тепловой обработки. Таким образом, выбор температуры сублимации исследуемых образцов был определен продолжительностью процесса сушки, а именно 6-7 часов при температуре сублимации минус $(5 \pm 1)^\circ\text{C}$. Сушка при данной температуре экономичнее на 4-10 часов, по сравнению с другими температурами сублимации. Массовая доля влаги в сублимированном продукте составляла 18,4%. В данном случае, результаты эксперимента дали возможность сделать вывод, о том, что температура сублимации вареного соленого мяса составляет ниже минус 5°C , а дальнейшее понижение существенно увеличивает продолжительность процесса, не оказывая при этом влияния на качество сублимированного продукта.

В общей теории сушки изучаются процессы внешнего и внутреннего массопереноса. К процессам внешнего массопереноса (внешней задачи) относятся параметры сушильного агента, контактирующего с объектом сушки: химический состав и скорость этого агента, его температура и влажность, парциальное давление компонентов сушильного агента, направление движения агента относительно поверхности объекта сушки.

К процессам внутреннего массопереноса (внутренней задачи) относятся технологические свойства объекта сушки. Под технологическими свойствами материалов, по А.С. Гинзбургу (1973), понимают различные свойства (биологические, физико-химические, структурно-механические, теплофизические и др.), специфические для каждого материала и зависят от условий, режимов и способов его обработки.

Одним из решений внутренней задачи наряду с активностью воды может быть использован коэффициент сопротивления испарению, определяющий качество процесса сублимации. Данный коэффициент является характеристикой конкретного продукта,

его химического состава, структуры, условий сушки и т.д. Известны коэффициенты (Н.А. Бабицкая, 1986) для разных продуктов: творога диетического – 0,551; картофельного пюре – 0,523; мясного фарша – 0,623. Чем ближе коэффициент к 1 (лед из чистой воды), тем быстрее происходит процесс сушки. Для оценки качества процесса сублимации рассчитывали коэффициент сопротивления испарению на основе экспериментальных данных, как отношение продолжительности сублимации для льда к продолжительности сублимации для продукта. Продолжительность процесса сублимации для льда массой G и толщиной h определяли по формуле:

$$\tau = \frac{G(h+l)R}{SD \left(\frac{P_{II}''}{T_{II}} - \frac{P_0''}{T_0} \right)}$$

где P_0'' – парциальное давление водяного пара на поверхности испарителя при температуре испарителя T_0 ;

P_{II}'' – парциальное давление над поверхностью льда при температуре льда T_{II} ;

l – расстояние между продуктом и поверхностью охлаждающих приборов, м;

S – площадь поверхности, м^2 ;

D – коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$.

Экспериментальные коэффициенты сопротивления испарению сублимированных продуктов говядины соленой сырой составил 0,658, говядины соленой после тепловой обработки – 0,723. Следовательно, предварительный посол мясного сырья в совокупности с тепловой обработкой способствуют повышению скорости сублимационной сушки при низких температурах.

Процесс досушки является обязательным и необходимым процессом, так как влажность сублимированных продуктов не должна превышать 5%, и не должна быть менее 3%, так как удаление химически связанной влаги приведет к необратимым изменениям сырья. Однако получение такой влажности при изотермической сушке при отрицательных температурах возможно лишь при очень продолжительном процессе, что делает атмосферную сублимационную сушку экономически нецелесообразной. Поэтому сублимированные образцы с влажностью 19,8% (мяса соленое сырое) и 18,4% (мясо соленое после тепловой обработки) подвергали досушке при положительных температурах в поле инфракрасного излучения. Выбор ИК-сушки обусловлен

тем, что при данном способе обезвоживания в наибольшей степени сохраняются макро- и микронутриенты. Рассматривали известные и используемые в пищевой промышленности диапазоны температур (40-80)°С.

В результате проведенных исследований установлены режимы процесса доведения до конечной влажности в поле инфракрасного излучения для сырого соленого мяса – температура 60°С, время 12 минут; для соленого мяса после тепловой обработки – 80°С, время 8 минут [6].

На основе проведенных экспериментов предложена и запатентована технология мясных продуктов, полученных с использованием сублимационной сушки при атмосферном давлении [7, 8].

В традиционном питании кочевых народов, в частности бурят, для хранения мяса использовали удаление влаги на открытом воздухе. Поэтому в названии разработанных продуктов отражена преемственность национальных традиций и современных достижений: сублимированное сырое мясо названо «Борсо», а сублимированное мясо после тепловой обработки – «Бурдуун».

Качество является интегральным показателем, который определяется пищевой ценностью, органолептическими показателями и безопасностью пищевых продуктов. Пищевая ценность характеризуется содержанием алиментарных компонентов, биологической и энергетической ценностью. Так в сублимированных мясных продуктах «Борсо» и «Бурдуун» содержание белка составило в среднем 80%, содержание жира – 9%, содержание золы – 6,4%. Значения химического состава мясных продуктов, полученных с использованием сублимационной сушки при атмосферном давлении, коррелируются с данными мясных продуктов вакуумной сублимационной сушки (белка – 65-85%, жира – 8-25%). Энергетическая ценность составляла для «Борсо» 453,0 ккал, для «Бурдуун» – 445,7 ккал [12, 13].

Для потребителя в первую очередь важным является органолептические характеристики пищевых продуктов: внешний вид, цвет и запах. Сублимированные продукты представляют собой концентраты с эластичной консистенцией с легкой хрупкостью, по вкусу и запаху, соответствующие исходному сырью, с розовато-серым («Борсо») или серым оттенком («Бурдуун»).

Также оценивали органолептические свойства бульона, так как «Борсо» предна-

значен для приготовления первых блюд. В качестве контроля исследовали бульон из охлажденной говядины I категории. Органолептические показатели исследовали в соответствии с ГОСТ 7269-79. Установлено, что мясной бульон опытных образцов не отличается от бульона из сырой говядины по внешнему виду, вкусу и запаху.

Еще одним показателем пищевой ценности является безопасность сублимированных мясных продуктов, которую оценивали по микробиологическим показателям. Показатели безопасности должны соответствовать гигиеническим нормативам, установленным Санитарными правилами и нормами (СанПиН) 2.3.2.1078-01 «Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов». По микробиологическим показателям сублимированные мясные продукты не превышали допустимый уровень.

Таким образом, в результате теоретических и экспериментальных исследований установлено, что разработанная технология сублимационной сушки мяса позволяет создать мясoproductы, отвечающие требованиям безопасности и качества.

Установлены неизвестные ранее технологические параметры, позволяющие сделать атмосферную сублимационную сушку конкурентно-способным вакуумной сублимационной сушке процессом. Определены температуры сублимации сырого соленого и вареного соленого мяса, предложен метод досушивания сублимированного мяса при положительных температурах. Установлен коэффициент сопротивления массопереносу вареного и соленого мяса, что дает возможность разработать математическую модель процесса. Все это в комплексе, позволяет получить продукты сублимационной сушки с качеством, соответствующим продуктам вакуумной сублимационной сушки, причем процесс обезвоживания проводится в обычных низкотемпературных камерах, тепловых сушилках, что существенно влияет на стоимость оборудования.

Список литературы

1. Антипов А.В. Опыт создания лабораторных и промышленных установок для вакуумной и атмосферной сублимационной сушки / А.В. Антипов, Н.Н. Мизерецкий, Ц.Б. Дугаров // Материалы международной технической конференции «Сублимационная сушка в фармацевтической и пищевой промышленности». – М.: МГУПБ, 2005. – С. 2-6.
2. Атаназевич В.И. Сушка пищевых продуктов. – М.: ДеЛи, 2000. – 294 с.

3. Бабицкая Н.А. Разработка процесса атмосферной сублимационной сушки для продуктов животного происхождения. – М.: Колос, 1990. – С. 40.
4. Бабуева В.Д. Мир традиций бурят: научное издание. – Улан-Удэ: Улзы, 2001. – С. 73.
5. Белоусова Н.И. Анализ экологического состояния отраслей АПК РФ и проблемы экологизации в мясной промышленности / Н.И. Белоусова, Т.А. Мануйлова, Н.Ф. Панков // Все о мясе. – 2006. – № 4. – С. 44-48.
6. Битуева Э.Б. Разработка технологии национального мясного продукта / Э.Б. Битуева, С.А. Дондокова // Мясная индустрия. – 2009. – № 6. – С. 55-57.
7. Битуева Э.Б., Дондокова С.А., Антипов А.В. Способ получения национального мясного продукта «Борсо» // Патент России № 2395972. – 2010. – Бюл. № 22.
8. Битуева Э.Б., Дондокова С.А., Антипов А.В. Способ получения национального мясного продукта «Бурдуун» // Патент России № 2399275. – 2010. – Бюл. № 26.
9. Гинзбург А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. – М.: Пищевая промышленность, 1973. – С. 528.
10. Готовимся к празднику: [На рус. и бурят. яз.] / сост. М.Н. Намжилова, З.Б. Мункуева, Е.Б. Намжилон. – Улан-Удэ: ФГОУ ВПО БГСХА, 2006. – С. 87.
11. Гуйго Э.И. Сублимационная сушка в пищевой промышленности. – М.: Пищевая промышленность, 1972. – С. 472.
12. Дондокова С.А. Мясные сэнки – национальный продукт россиян / С.А. Дондокова, Э.Б. Битуева, А.В. Антипов // Мясные технологии. – 2011. – № 4. – С. 26-28.
13. Дондокова С.А. Сублимационная сушка: национальные традиции и современные технологии / С.А. Дондокова, Э.Б. Битуева, А.В. Антипов // Мясопереработка. – СПб.: Партнеры, 2011. – № 38. – С. 64-66.
14. Ермаков С.А. Новые направления повышения эффективности оборудования для вакуумной сублимационной сушки // Материалы международной технической конференции «Сублимационная сушка в фармацевтической и пищевой промышленности». – М.: МГУПБ, 2005. – С. 37-42.
15. Загойти Л.А. Опыт промышленного производства сублимированных пищевых продуктов // Материалы международной технической конференции «Сублимационная сушка в фармацевтической и пищевой промышленности». – М.: МГУПБ, 2005. – С. 24-28.
16. Касьянов Г.И. Сушка сырья и производство сухих завтраков. – Ростов-на-Дону: Март, 2004. – 159 с.
17. Каминарская А.И. Сублимационная сушка пищевых продуктов. – М.: Торгиздат, 1963. – С. 52.
18. Камовников Б.П. Атмосферная сублимационная сушка пищевых продуктов / Б.П. Камовников, А.В. Антипов, Г.В. Семенов и др. – М.: Колос, 1994. – С. 190-224.
19. Камовников Б.П. Техника и технология консервирования методом сублимационной сушки при атмосферном давлении. – М.: ЦНИИТЭИМясопром, 1986. – С. 48.
20. Кайшев В.Г. Анализ макроэкономических показателей развития пищевой и перерабатывающей промышленности Российской Федерации за 1995-2006 гг. // Пищевая промышленность. – 2007. – № 4. – С. 22-26.
21. Куликовская Л.В. Замороженные продукты в сети быстрого питания / Л.В. Куликовская, Э.М. Шаройка // Мороженые и быстромороженые продукты. – 2004. – № 3. – С. 26-27.
22. Литвинюк Н.Ю. Способ криогенного замораживания для последующей сублимационной сушки в потоке инертного газа / Н.Ю. Литвинюк, К.В. Анисимова, А.Б. Анисимов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2008. – № 9. – С. 39-41.
23. Лыкова А.В. Физико-химические основы теории сушки и хранения пищевых продуктов / А.В. Лыкова, И.И. Ивлев, Н.Н. Мизерский. – М.: МГУПБ, 2001. – С. 136-139.
24. Михайлова В.Т. Традиции бурятской кухни. – Улан-Удэ: Изд-во ГУЗ РЦМП МЗ РБ, 2008. – С. 93.
25. Покровский В.Г. Сублимационная сушка пищевых продуктов растительного происхождения. – М.: Пищевая промышленность, 1975. – С. 135.
26. Семенов Г.В. Сушка сырья: мясо, рыба, овощи, фрукты, молоко. – Ростов-на-Дону: Март, 2002. – 112 с.
27. Технология консервирования плодов, овощей, мяса и рыбы / под ред. Г.Л. Флауменбаума. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Колос, 1993. – 320 с.
28. Claussen I.C. Relationship of product structure, sorption, characteristics and freeze point of atmospheric freeze-dried foods / I.C. Claussen, I. Strommen, T. Rustand // Drying Technology. – 2007. – № 25. – P. 853-856.
29. Sablani S.S. Drying of fruits and vegetables: Retention of nutritional functional quality // Drying Technology. – 2006. – № 24. – P. 123-135.

УДК 512.312

УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА И ДИФФУЗИИ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В ПРИЗЕМНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

¹Равшанов Н., ²Шарипов Д.К., ³Нарзуллаева Н.

¹Центр разработки программных продуктов и аппаратно-программных комплексов при Ташкентском университете информационных технологий,
Ташкент, e-mail: ravshanzade-09@mail.ru

²Институт математики при Национальном университете Узбекистана,
Ташкент, e-mail: qushkor@rambler.ru

³Самаркандский филиал Ташкентского университета информационных технологий,
Самарканд, e-mail: niga_cool89@mail.ru

В работе приведена математическая модель процесса распространения вредных веществ в пограничном слое атмосферы с учетом рельефа местности и характеристик подстилающей поверхности, описывающие с помощью система дифференциальных уравнений в частных производных и соответствующих им начальные и граничные условия. При разработке модели использованы уравнение движения многокомпонентной воздушной среды, уравнений расчета давления и притока тепла для газа и конденсата. Для определения скоростей перемещения воздушной массы в атмосфере по трем направлениям u , v и w рассмотрим уравнения гидродинамики – Навье-Стокса, а для вычисления плотности выбрасываемых веществ в атмосфере, учитывая закон сохранения массы к жидкости, протекающей через фиксированный объем использован уравнение неразрывности масс. Для вычисления переноса тепла в многокомпонентной окружающей среде рассмотрены при переноса тепла для газа, а для определения давление пара через температуру, использована уравнение Менделеева-Клапирона. Приведены уравнения описывающие переход воды из жидкого состояния в газообразное и обратно и когда на источнике подается газ, вода в газообразном состоянии, вода и сажа.

Ключевые слова: математическая модель, дифференциальное уравнение, рельеф местности, процесс загрязнения, многокомпонентная среда, экология, перенос и диффузия вредных веществ.

THE MATHEMATICAL MODEL OF THE TRANSPORT AND DIFFUSION OF POLLUTANTS IN THE ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER

¹Ravshanov N., ²Sharipov D.K., ³Narzullaeva N.

¹Centre for the development of software and hardware-program complexes at Tashkent university of information technologies, Tashkent, e-mail: ravshanzade-09@mail.ru

²Institute of Mathematics at National University of Uzbekistan, Tashkent,
e-mail: qushkor@rambler.ru

³Samarkand branch of Tashkent university of information technologies, Samarkand,
e-mail: niga_cool89@mail.ru

The paper shows the mathematical model of the spread of harmful substances in the atmospheric boundary layer, taking into account the terrain and the characteristics of the underlying surface, described by means of a system of differential equations in partial derivatives and corresponding initial and boundary conditions. In developing the model used in the equation of motion of a multicomponent air, equations for calculating the pressure and heat flux for gas and condensate. To determine the velocities of the air mass in the atmosphere in three directions and consider the hydrodynamic equations – Navier-Stokes equations, and to compute the density of substances emitted into the atmosphere, taking into account the law of conservation of mass to the fluid flowing through the fixed volume of used mass continuity equation. To calculate the heat transfer in a multicomponent environment considered in the transfer of heat to the gas, and for determining the vapor pressure in terms of temperature, use Equation Mendeleev-Klapirona. The equations describing the transition of water from liquid to gaseous state and vice versa, and when the source gas is supplied, the water in a gaseous state, water and soot.

Keywords: mathematical model, differential equation, the terrain, the process of pollution, multicomponent medium, environment, transport and diffusion of pollutants.

Введение

Бурное развитие отраслей производства, разработка нефте-, газо- и рудных месторождений, обработка сырья и продуктов общего назначения, строительство объектов производства и жилого фонда и т.д. остро ставят проблему охраны окружающей среды.

В результате резкого роста вредных выбросов в промышленных регионах концентрация вредных веществ в атмосфере над ними, зачастую, превышает предельно допустимую санитарную норму. Проблемы, связанные с добычей угля, цветных металлов и других полезных ископаемых приводят к эрозии почвы и загрязнению огром-

ных территорий вторичными материалами и отходами производства, которые служат источником загрязнения воздушного бассейна городов и регионов.

Здесь так же надо отметить, что выбрасываемые газовые примеси под воздействием метеорологических условий подвергаются сложным химическим реакциям, в результате чего образуются новые более токсичные соединения, которых не было в первоначальных выбросах. Особенно вредны выбросы окиси азота и серы, окиси и двуокиси углерода и т.д. Как известно, все выброшенные из промышленных объектов в окружающую среду (приземный слой атмосферы) вредные вещества, в конечном итоге, как материальная субстанция осаждаются на поверхность земли. Причем тяжёлые соединения оседают в основном под действием гравитационного поля, а лёгкие – в результате диффузионного процесса.

Рост антропогенного воздействия на окружающую среду, вызванный интенсивной разработкой недр земли, а так же развитием материального производства, привел к нарушению экологического равновесия как локально – в отдельных районах земного шара, так и глобально – в масштабах планеты в целом. Это особенно заметно в государствах с быстрым ростом производительных мощностей, например, в Индии, Китае, Корее, Сингапуре и т.д. В свою очередь, нарушения экологического баланса влекут распространение раковых, астматических, аллергические и другие заболеваний, сокращение численности многих видов фауны и флоры.

Для исследования, прогнозирования и мониторинга состояния атмосферного бассейна промышленных регионов, а также для оценки воздействия техногенных факторов необходима разработка инструмента, с помощью которого можно решать выше указанные задачи. И здесь, одним из эффективных средств для решения поставленных задач выступает математическое моделирование и вычислительный эксперимент на ЭВМ, которые позволяют дать качественную и количественную оценку экологического состояния окружающей среды рассматриваемого региона.

Для решения этой актуальной проблемы были созданы научные центры и школы под руководством ведущих специалистов, исследующих вопросы охраны окружающей среды, защиты водных ресурсов от внеш-

них техногенных факторов, влияния трансформаций в экосистеме и т.д. Научными школами и центрами по всему миру уже получены значительные результаты теоретического и прикладного характера. Из нижеприведенного обзора следует, что в перечне актуальных задач, решаемых с помощью математического моделирования, экологические проблемы занимают особое место.

В [1-3] разработана кинематическая модель распространения частиц реагента в облаке, описываемая системой квазилинейных дифференциальных уравнений в частных производных параболического типа, осесимметричной струи, характерной для кучево-дождевого облака. Модель учитывает влияние процессов переноса, диффузии, генерации и диссипации на развитие турбулентности. Было исследовано поведение приближенного решения в зависимости от выбранной сетки.

В работе [4] рассмотрена задача моделирования рассеяния газообразных опасных выбросов в атмосфере. Отмечены три основных подхода к моделированию данного процесса: гауссовы модели рассеяния, называемые дисперсионными моделями; модели, основанные на интегральных законах сохранения субстанции; модели, построенные на численном решении системы уравнений сохранения – численное моделирование. Авторами была разработана математическая модель, где рассматриваются следующие процессы: движения облака при переменной скорости ветра по вертикали; гравитационное растекание; рассеяние облака в вертикальном направлении за счет атмосферной турбулентности; нагрев или охлаждение облака вследствие подмешивания воздуха; теплообмен облака с подстилающей поверхностью. Авторы при исследовании процесса переноса и диффузии вредных частиц в атмосфере учитывали изменения массы и внутренней энергии облака и его физические характеристики, а результаты модельных расчетов сравнили с экспериментальными данными.

По результатам проведенных численных расчетов были сделаны следующие выводы: стандартные методики построения на гауссовой модели не способны, с достаточной степенью точности, прогнозировать распространение вредных веществ (тяжелых газов) как от залпового, так и от постоянного источника выбросов вредных веществ в атмосферу.

В статье [5] представлены основные подходы к созданию компьютерных моделей атмосферных явлений. Произведён обзор современных моделей распределения субстанции в атмосфере, фильтров пыли и пыльцы растений и показано преимущество модели SILAM Финского метеорологического института. Физическая сторона рассматриваемой проблемы связана с анализом эмиссии, распространения и поглощения загрязняющих веществ.

В работе [6] показаны существенные факторы, воздействующие на процессы переноса и диффузии вредных веществ: режим циркуляции атмосферы, ее термическая устойчивость; атмосферное давление, влажность воздуха; температурный режим, температурные инверсии, их повторяемость и продолжительность; скорость ветра, повторяемость застоев воздуха и слабых ветров (скоростью до 1 м/с); продолжительность туманов; рельеф местности, геологическое строение и гидрогеология района; почвенно-растительные условия (тип почв, водопроницаемость, пористость, гранулометрический состав почв, состояние растительности, состав пород, возраст, бонитет); фоновые значения показателей загрязнения природных компонентов атмосферы; состояние животного мира.

В работе [7] разработана распределенная автоматизированная система, за счет использования современных информационных технологий позволяющая повысить эффективность исследования и прогнозирования распространения загрязняющих веществ, выбрасываемых химико-технологическими предприятиями в атмосферу промышленного региона.

Работа [8-9] посвящена критическому анализу применимости физико-математических моделей атмосферной диффузии для исследования загрязнения атмосферного воздуха вредными выбросами автомобильного транспорта. Рассматриваются специфические характеристики состава отработавших газов, закономерности их миграции и метаболизма в стратифицированной атмосфере. Демонстрируются карты мониторинга загрязнения атмосферы на примере кольцевой автомагистрали Санкт-Петербурга.

В [10] построена математическая модель для описания нестационарной трехмерной динамики загрязнений, в том числе от нестационарных источников для конкретного задаваемого физического состоя-

ния атмосферы. В предлагаемом подходе используется прямое численное интегрирование точных уравнений переноса примеси в атмосфере с учетом основных физических факторов, что приближает данный метод к проведению вычислительного эксперимента. На основе разработанной математической модели создана информационная система для компьютерного моделирования процесса распространения примесей от промышленных источников, расположенных на территории предприятия. Адекватность моделей процессу проверяется с помощью алгоритмов текущего обнаружения.

В работе [11] проведены аналитические исследования процессов распространения в атмосфере вредных выбросов предприятий. В качестве основного атмосферного загрязнителя рассматривается углекислый газ (CO₂). В работе приводится функция Грина для задачи о разовом мгновенном выбросе вредной примеси в стандартном приземном слое атмосферы с заданным ветровым полем и получено выражение для концентрации примесей в стационарном случае и при непрерывно действующем источнике загрязнения. Построены уровни равного загрязнения атмосферы и проанализирована их трансформация при изменении параметров источника.

Задача моделирования выбросов газообразных примесей в атмосферу рассмотрена в [12] в новой математической постановке, которая позволяет учесть взаимное влияние разных газодинамических процессов, возникающих при реализации производственных циклов или в результате аварийных ситуаций на промышленных предприятиях.

В работе [13] создана информационная система для математического моделирования процесса переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере с использованием прикладного программного обеспечения «ArcGIS», отражающая реальное состояние атмосферного воздуха в местах. Но здесь надо отметить, что в рамках данной системы результаты могут быть получены только в отдельных точках, и они не могут дать адекватной картины состояния воздуха на остальной территории.

Работа [14] посвящена разработке математической модели динамики и кинетики процесса переноса и диффузии газовых и аэрозольных примесей в атмосфере. В работе приведена модель переноса многоком-

понентной примеси с учетом фотохимической трансформации и образования аэрозолей в тропосфере северного полушария с учетом кинетических процессов знуклеации, конденсации и коагуляции.

Математическое обеспечение процесса размещения пожароопасных объектов и их оптимизации с учетом рельефа местности и пространственной формы в приведено работе [15].

В работе [16] разработана компьютерная модель для исследования, прогнозирования и мониторинга транспорта вредных веществ в окружающую среду автотранспортными средствами. Приведена численная реализация модели на ЭВМ с использованием метода контрольного объема на основе разработанного распределенного алгоритма расчета на ЭВМ.

Моделирование поля ветровых течений на основе системы уравнений Навье-Стокса с учетом сжимаемости и турбулентности воздушной среды, рельефа местности предложена в работе [17], а в качестве численного метода используется SIMPLE-алгоритм.

В работе [18] исследование проводилось на основе разработанных региональных моделей процесса диффузии веществ, описываемой гидро-термодинамическим уравнением, а именно уравнением молекулярной теплопроводности в активном слое почвы с учетом теплового баланса подстилающей поверхности (вода, земля). Разработанная исследователями комплексная математическая модель состоит из отдельных блоков, каждый из которых представляет математическую модель, описывающую гидро-термодинамические процессы в отдельных объектах окружающей среды. Авторами исследуются экологические проблемы, связанные с распределением загрязняющих веществ от известных источников и определяется вероятное местонахождение источника в водной среде.

Процесс переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере с учетом различных погодных-климатических факторов и внешних возмущений рассмотрен в работе [19]. В ней были рассмотрены перенос загрязнителей воздуха от источника с учетом адвекции загрязняющих веществ от среднего движения воздуха, смешивание загрязняющих веществ при атмосферной турбулентности и массовой диффузии. Кроме того, приводится исследование процесса при различных физических и математических

аспектах, связанных с транспортом и диффузией загрязнителей воздуха в пограничном слое атмосферы при слабом и сильном ветрах.

Немалый интерес представляет вопрос математического моделирования распространения загрязняющих веществ, транспортируемых с водой. В работе [20] рассмотрена задача, связанная с процессом распространения вредных веществ в окружающую среду и смоделированная в виде совокупности четырех простых моделей: сухопутного потока воды, просачивания, переноса загрязняющих веществ поверхностным стоком и осаждения загрязнителей (накопления) на поверхности земли. Модель опирается с уравнение диффузии с дополнительными слагаемыми в правой части. В разработанной математической модели процесса учитываются влияние рельефа местности, литологического строения территории и интенсивность загрязнения от скорости поглощения земляной поверхности. Форма, границы и топология области решения задача изменяется со временем, в зависимости от появления сухих «островков», окруженных водой.

Работа [21] посвящена процессу дисперсии и диффузии химически активных первичных загрязняющих веществ, выбрасываемых из повышенных линейных источников в стабильный пограничный слой атмосферы с обобщенной скоростью ветра и квадратичной функцией вертикальной высоты. Для данной постановки получено точное решение с помощью преобразования Лапласа для линейных источников в пограничном слое атмосферы. В нем учитывалась химическая реакция, происходящая в результате взаимодействия с воздушной массой, а так же превращение газообразных загрязнителей в твердые частицы и их осаждение на поверхности рассматриваемой местности.

В работах [22-26] разработано математическое обеспечение для решения задачи движения многокомпонентной воздушной среды с учетом переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере, изменения теплового режима атмосферы, фазового перехода, а также влияния растительного покрова.

Работа [27] посвящена транспорту вредных веществ воздушном потоке в приземном слое атмосферы на большие и средние расстояния.

Анализ указанных источников показал, что в исследованиях авторов не рассмотрен

процесс переноса и диффузий многокомпонентных вредных веществ в атмосфере, когда существенную роль играют скорость перемещения воздушной массы атмосферы по трем направлениям u , v и w , рельеф местности рассматриваемого промышленного региона, теплообмен между жидкой и газообразной фазами, изменения их плотности и температуры, которые изменяются по суткам и по временам года.

Также следует отметить, что при математическом моделировании процесса распространения вредных веществ в атмосфере в работах многих авторов предполагается, что распространение вредных веществ, выброшенных из источников, не достигает рассматриваемых границ области решения задачи и отсутствует приток и отток вредных веществ через них.

В настоящей работе при исследовании процесса переноса и диффузии вредных ве-

ществ в атмосфере предприняты усилия для восполнения данных пробелов.

Исходя из сказанного, целью настоящей работы является разработка математической модели и численного алгоритма решения задачи переноса и диффузии аэрозольных выбросов в пограничном слое атмосфере.

Постановка задачи

Для моделирования процесса переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере, опираясь на основные законы гидротермодинамики и гидромеханики процесса, получим уравнение транспорт вредных веществ в атмосфере, в котором учитываются скорости движения воздушной массы, рельефа местности, коэффициентов диффузии и турбулентности, скорость осаждения вредных веществ на поверхности земли и коэффициент поглощения вредных веществ в атмосфере:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + (w - w_g) \frac{\partial \theta}{\partial z} + h\sigma\theta = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu h \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu h \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta h \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \delta_{i,j,k} I, \end{aligned} \quad (1)$$

Принимая во внимание агрегатное состояние выбрасываемых вредных смесей в атмосфере, запишем уравнения описывающие переход воды из жидкого состояния в газообразное и обратно [1-2]:

- когда на источнике подается газ

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial t} + u \frac{\partial \theta_1}{\partial x} + v \frac{\partial \theta_1}{\partial y} + w \frac{\partial \theta_1}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu h \frac{\partial \theta_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu h \frac{\partial \theta_1}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta h \frac{\partial \theta_1}{\partial z} \right) + \delta_{i,j,k} I_1; \quad (2)$$

- когда на источнике подается вода в газообразном состоянии

$$\frac{\partial \theta_2}{\partial t} + u \frac{\partial \theta_2}{\partial x} + v \frac{\partial \theta_2}{\partial y} + w \frac{\partial \theta_2}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu h \frac{\partial \theta_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu h \frac{\partial \theta_2}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta h \frac{\partial \theta_2}{\partial z} \right) + \delta_{i,j,k} I_2 + \frac{v_g}{\rho_p}; \quad (3)$$

- когда на источнике подается вода

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_3}{\partial t} + u \frac{\partial \theta_3}{\partial x} + v \frac{\partial \theta_3}{\partial y} + (w - w_g) \frac{\partial \theta_3}{\partial z} + h\sigma_1\theta_3 = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu h \frac{\partial \theta_3}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu h \frac{\partial \theta_3}{\partial y} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta h \frac{\partial \theta_3}{\partial z} \right) + \delta_{i,j,k} I_3 - \frac{v_g}{\rho_p}; \end{aligned} \quad (4)$$

- и когда на источнике подается сажа

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_4}{\partial t} + u \frac{\partial \theta_4}{\partial x} + v \frac{\partial \theta_4}{\partial y} + (w - w_g) \frac{\partial \theta_4}{\partial z} + h\sigma_2\theta_4 = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu h \frac{\partial \theta_4}{\partial x} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu h \frac{\partial \theta_4}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta h \frac{\partial \theta_4}{\partial z} \right) + \delta_{i,j,k} I_4. \end{aligned} \quad (5)$$

Для определения концентрации вредных веществ в атмосфере в зависимости от орографии местности и погодных-климатических факторов необходимо задать начальное и граничное условия:

$$\theta_i(x, y, z) = \theta_{i,H}(x, y, z) \text{ при } t = 0 \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 \mu \frac{\partial \theta_i}{\partial x} \Big|_{x=0} &= \alpha_2 (\theta_i - \theta_{i,H}), \quad \beta_1 \mu \frac{\partial \theta_i}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = \beta_2 (\theta_i - \theta_{i,H}), \\ \alpha_3 \mu \frac{\partial \theta_i}{\partial y} \Big|_{y=0} &= \alpha_4 (\theta_i - \theta_{i,H}), \quad \beta_3 \mu \frac{\partial \theta_i}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = \beta_4 (\theta_i - \theta_{i,H}), \\ \frac{\partial \theta_i}{\partial z} \Big|_{z=0} &= \xi \theta_i - \tilde{f}, \quad \frac{\partial \theta_i}{\partial z} \Big|_{z=L_z} = 0, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где $i=1, 2, 3, 4$.

Здесь $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_{i,H}$ – соответственно концентрация выброшенных вредных веществ в виде воды в газообразном состоянии, газ на источнике, вода в жидком состоянии, сажа и их в первоначальные значения в атмосфере; u, v, w – скорость ветра по трем направлениям; $v_g = f(\rho_n - \rho_1)$ – массовая скорость испарения; ρ_n – плотность насыщенных паров; μ – коэффициент диффузии; η – коэффициент турбулентности; ξ – коэффициент взаимодействия с подстилающей поверхности земли; h – функция, описывающая орографическую поверхность земли; I_1, I_2, I_3, I_4 – мощность источников выбросов в атмосферу соответственно для вредного газа, воды в газообразной форме, воды в жидком состоянии и сажи; f – источник выброса вредных

веществ из поселяющей поверхности земли; σ_1, σ_2 – коэффициенты поглощения вредных веществ в атмосфере (вода в жидкой форме и сажа); $\delta_{i,j,k}$ – функция Дирака; w_g – скорость осаждения вредных частиц; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ принимает значение 0 или 1 в зависимости от постановка задача.

Из постановки задачи (1)-(7) следует, что для ее численного интегрирования необходимо вычислить скорость перемещения воздушной массы атмосферы по трем направлениям, соответственно, по u, v и w .

Метод решения

Для определения скоростей перемещения воздушной массы в атмосфере по трем направлениям u, v и w рассмотрим уравнения гидродинамики – Навье-Стокса:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right) - g_x, \quad (8)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v}{\partial z} \right) - g_y, \quad (9)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial w}{\partial z} \right) - g_z, \quad (10)$$

с начальными и граничными условиями

$$u(x, y, z) \Big|_{t=0} = \dot{u}_0(x, y, z); \quad v(x, y, z) \Big|_{t=0} = \dot{v}_0(x, y, z); \quad w(x, y, z) \Big|_{t=0} = \dot{w}_0(x, y, z), \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_5 \mu \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=0} &= \alpha_6 (u - \dot{u}_0), & \beta_5 \mu \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=L_x} &= \alpha_6 (u - \dot{u}_0), \\ \alpha_7 \mu \frac{\partial v}{\partial y} \Big|_{y=0} &= \alpha_8 (v - \dot{v}_0), & \beta_7 \mu \frac{\partial v}{\partial y} \Big|_{y=L_y} &= \alpha_8 (v - \dot{v}_0), \\ \eta \frac{\partial w}{\partial z} \Big|_{z=0} &= 0, & \eta \frac{\partial w}{\partial z} \Big|_{z=L_z} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Здесь P – давление; $g_{(x,y,z)}$ – проекция компонентов ускорения свободного падения.

Для вычисления плотности выбрасываемых веществ в атмосферу, учитывая закон сохранения массы к жидкости, протекающей через фиксированный объем получим уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) + I_g \quad (13)$$

с соответствующими начальными и граничными условиями: $\rho(x, y, z) \Big|_{t=0} = \rho_c$,

$$\left. \begin{aligned} \alpha_9 \rho \mu \frac{\partial \rho}{\partial x} \Big|_{x=0} &= \alpha_{10} (\rho - \rho_0), & \beta_9 \rho \mu \frac{\partial \rho}{\partial x} \Big|_{x=L_x} &= \beta_{10} (\rho - \rho_0), \\ \alpha_{11} \rho \mu \frac{\partial \rho}{\partial y} \Big|_{y=0} &= \alpha_{12} (\rho - \rho_0), & \beta_{11} \rho \mu \frac{\partial \rho}{\partial y} \Big|_{y=L_y} &= \beta_{12} (\rho - \rho_0), \\ \frac{\partial \rho}{\partial z} \Big|_{z=0} &= 0, & \frac{\partial \rho}{\partial z} \Big|_{z=L_z} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Так как выбрасываемые примеси в окружающую среду обладают определенной температурой, играющей существенную роль при распространении вредных веществ в атмосфере, то учет данного фактора является необходимым. Уравнение, описывающее процессы переноса и диффузии тепла и теплообмена с окружающей средой имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \Phi}{\partial t} + u \frac{\partial \Phi}{\partial x} + v \frac{\partial \Phi}{\partial y} - w_g \frac{\partial \Phi}{\partial z} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \delta_{i,j,k} I_T. \end{aligned} \quad (15)$$

Здесь Φ – тепловая энергия; w_g – скорость осаждения взвешенных частиц; λ – коэффициент теплопроводности; I_T – функция, описывающая распределение и мощность источника тепла.

Так как мы рассматриваем процесс распространения многокомпонентной среды, то для коэффициента теплопроводности и тепловой энергии справедливо соотношение

$$\Phi = \sum_{i=1}^L \Phi_i \theta_i = \sum_{i=1}^L \rho_i c_i \theta_i T_i.$$

В нашей постановке для задачи переноса тепла в многокомпонентной окружающей среде можно рассмотреть случаи:

- переноса тепла для газа

$$R_1 \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(R_2 \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(R_2 \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(R_2 \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \bar{q}_2 v_g - \alpha_v (T - T_s), \quad (15)$$

где $R_1 = \sum_{i=1}^2 \rho_i c_{\rho} \theta_i$; $R_2 = \sum_{i=1}^2 (\rho_i c_{\rho} \mu + \lambda_i) \theta_i$;

v_g – массовая скорость испарения;

ρ , c_{ρ} – плотность и теплоемкость газовой фазы;

q – удельная теплота преобразования,

T , T_s – температура газовой и конденсированной фаз;

α_v – коэффициент теплопередачи;

- переноса тепла для конденсата

$$R_3 \left(\frac{\partial T}{\partial t} - w_0 \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left((R_3 \mu) \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((R_3 \mu) \frac{\partial T_s}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left((R_3 \mu) \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) - \alpha_v (T - T_s), \quad (16)$$

где $R_3 = \sum_{i=3}^4 (\rho_i c_{\rho_i} \theta_i)$;

c_{ρ_i} , θ_i , ρ_i – удельные теплоемкость, объемные доли i -ой фазы и истинные плотности;

T , T_s – температура газовой и конденсированной фаз.

Для решения (15)-(16) задаем начальное и граничное условия:

$$T(x, y, z) = T_0(x, y, z); \quad (17)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{13} k_1 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} &= \alpha_{14} (T - T_0), & \beta_{13} k_1 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L_x} &= \beta_{14} (T - T_0), \\ \alpha_{15} k_1 \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} &= \alpha_{16} (T - T_0), & \beta_{15} k_1 \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=L_y} &= \beta_{16} (T - T_0), \\ \alpha_{17} k_1 \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} &= \alpha_{18} (T - T_0), & \beta_{17} k_1 \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=L_z} &= \beta_{18} (T - T_0). \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Чтобы определить давление пара через температуру, используем уравнение Менделеева-Клапейрона, и продифференцируя получим

$$\frac{\rho}{P} \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\rho}{T} \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (19)$$

Здесь ρ_i , R , M – плотность, универсальная газовая постоянная, молярная масса; k_1 – коэффициент теплопроводности.

В уравнениях (2)-(18) в зависимости от постановки задачи $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7, \alpha_8, \beta_5, \beta_6, \beta_7, \beta_8, \alpha_9, \alpha_{10}, \alpha_{11}, \alpha_{12}, \beta_9, \beta_{10}, \beta_{11}, \beta_{12}, \alpha_{13}, \alpha_{13}, \alpha_{14}, \alpha_{15}, \beta_{13}, \beta_{14}, \beta_{15}, \beta_{16}, \alpha_{16}, \alpha_{17}, \alpha_{18}, \beta_{16}, \beta_{17}, \beta_{18}$ могут принимать значение 0 или 1.

Для решения уравнения (8)-(12) осуществим расщепление по физическим параметрам, и получим три задачи, где первую можно записать в разностном аналоге:

$$\left. \begin{aligned} \frac{u^{n+1/3} - u^n}{\Delta t / 3} + \left(u \frac{\partial u}{\partial x} \right)^{n+1/3} + \left(v \frac{\partial u}{\partial y} \right)^{n+1/3} + \left(w \frac{\partial u}{\partial z} \right)^{n+1/3} &= -G_x, \\ \frac{v^{n+1/3} - v^n}{\Delta t / 3} + \left(u \frac{\partial v}{\partial x} \right)^{n+1/3} + \left(v \frac{\partial v}{\partial y} \right)^{n+1/3} + \left(w \frac{\partial v}{\partial z} \right)^{n+1/3} &= -G_y, \\ \frac{w^{n+1/3} - w^n}{\Delta t / 3} + \left(u \frac{\partial w}{\partial x} \right)^{n+1/3} + \left(v \frac{\partial w}{\partial y} \right)^{n+1/3} + \left(w \frac{\partial w}{\partial z} \right)^{n+1/3} &= -G_z, \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

вторую

$$\left. \begin{aligned} \frac{u^{n+2/3} - u^{n+1/3}}{\Delta t / 3} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right)^{n+2/3} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right)^{n+2/3} + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_0 \frac{\partial u}{\partial z} \right)^{n+2/3}, \\ \frac{v^{n+2/3} - v^{n+1/3}}{\Delta t / 3} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right)^{n+2/3} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right)^{n+2/3} + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_0 \frac{\partial v}{\partial z} \right)^{n+2/3}, \\ \frac{w^{n+2/3} - w^{n+1/3}}{\Delta t / 3} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial x} \right)^{n+2/3} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right)^{n+2/3} + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_0 \frac{\partial w}{\partial z} \right)^{n+2/3}, \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

третью

$$\left. \begin{aligned} \frac{u^{n+1} - u^{n+2/3}}{\Delta t / 3} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x}, \\ \frac{v^{n+1} - v^{n+2/3}}{\Delta t / 3} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y}, \\ \frac{w^{n+1} - w^{n+2/3}}{\Delta t / 3} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z}. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Здесь k_0 – коэффициент турбулентного обмена.

Далее умножая систему уравнений (22) на $\rho \Delta t / 3$ и дифференцируя по переменным x, y, z соответственно, в конечном итоге получим

$$\left. \begin{aligned} \left(\rho \frac{\partial u}{\partial x} \right)^{n+1} &= \left(\rho \frac{\partial u}{\partial x} \right)^{n+2/3} - \Delta t / 3 \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}, \\ \left(\rho \frac{\partial v}{\partial y} \right)^{n+1} &= \left(\rho \frac{\partial v}{\partial y} \right)^{n+2/3} - \Delta t / 3 \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \\ \left(\rho \frac{\partial w}{\partial z} \right)^{n+1} &= \left(\rho \frac{\partial w}{\partial z} \right)^{n+2/3} - \Delta t / 3 \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}. \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

Подставляя систему (23) в (13) получим следующее:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \left(\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \right)^{n+2/3} - \Delta t / 3 \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \right)^{n+2/3} - \Delta t / 3 \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \left(\frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right)^{n+2/3} - \Delta t / 3 \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = \\ = \left(\mu \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} \right) + \left(\mu \frac{\partial^2 \rho}{\partial y^2} \right) + \left(k_0 \frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2} \right) + I_g; \end{aligned}$$

Используя уравнение состояния (19), получим уравнение для вычисления поля давления:

$$\left(\frac{\rho}{P} \frac{\partial P}{\partial t}\right) = \Delta t / 3 \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \Delta t / 3 \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \Delta t / 3 \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} - \frac{\rho}{T} \frac{\partial T}{\partial t} - \left(\rho \frac{\partial u}{\partial x}\right)^{n+2/3} - \left(\rho \frac{\partial u}{\partial y}\right)^{n+2/3} - \left(\rho \frac{\partial w}{\partial z}\right)^{n+2/3} + \left(\mu \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2}\right) + \left(\mu \frac{\partial^2 \rho}{\partial y^2}\right) + \left(k_0 \frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2}\right) + I_g. \quad (24)$$

С помощью (24) можно вычислить поля распределения давления в рассматриваемом слое атмосферы.

Таким образом, в настоящей статье была разработана трехмерная математическая модель процесса распространения вредных веществ в пограничном слое атмосферы с учетом рельефа местности и характеристик подстилающей поверхности. При разработке данной модели были использованы: уравнение движения многокомпонентной воздушной среды, модель расчета давления, модель притока тепла, которая описывается уравнениями теплопроводности газа и конденсата. С помощью приведенной модели можно вычислить основные показатели и параметры, воздействующие на процесс переноса и диффузии вредных многокомпонентных смесей, выбрасываемых из промышленных объектов, строительных площадок, а также из осушенных частей морей и озер.

Выводы

Разработаны математические модели переноса и диффузии вредных веществ в виде воды, газа и сажа в многокомпонентной воздушной среде, которые учитывают такие факторы, как переход воды из жидкого в газообразное состояние, турбулентный обмен, конвективное движение, осаждение субстанций, теплообмен между жидкими и газообразными состояниями и переменную плотность и температуру, а также учет рельефа местности который существенно влияет на динамически изменяющийся состояния объект исследования.

При разработки математической модели процесса распространения вредных веществ в атмосфере выведен уравнение для расчета поля давлений, которое учитывает сжимаемость среды, тепловое расширение, турбулентное перемешивание воздушной массы атмосферы.

Особенностью разработанной математической модели переноса и диффузии вредных веществ в пограничном слое ат-

мосферы и движения воздушной среды связано с учетом турбулентного перемешивания в уравнении неразрывности среды, а также учет влияния орографической поверхности земли растительного покрова на распространение аэрозольных частиц в атмосфере.

В разработанной математической модели процесса учитывается перенос и диффузия вредных компонентов через границы раздела области решения задачи, с помощью граничное условие третьего рода, который соответствует реальную физическую природу рассматриваемого процесса.

Разработанная математическая модель с учетом указанных выше факторов более адекватно описывает процесс по сравнению с другими известными моделями предложенные другими авторами.

Список литературы

1. Корчагин П.В. Математическое моделирование нестационарной турбулентной диффузии при помощи метода конечных элементов // Вузовская наука – Северо-Кавказскому региону: материалы III регион. конф. – Ставрополь: СевКавГТУ, 1999. – С. 7.
2. Корчагин П.В. Построение вычислительной схемы для уравнения переноса с использованием метода взвешенной невязки и метода конечных элементов // Математическое моделирование в научных исследованиях: тр. Всерос. науч. конф. – Ставрополь: СГУ, 2000. – С. 55-58.
3. Корчагин П.В. Моделирование совместного распространения реагирующих веществ // Студенческая наука – экономике России: материалы III межрегион. конф. – Ставрополь: СевКавГТУ, 2002. – С. 4-5.
4. Лисанов М.В., Пчельников А.В., Сумской С.И. Моделирование рассеяния выбросов опасных веществ в атмосфере // Российский химический журнал общества им. Д.И. Менделеева. – 2005. – Т. 59. – № 4. – С. 18-28.
5. Современные компьютерные модели распространения загрязняющих веществ в атмосфере / А.Б. Белихов, Д.Л. Леготин, А.К. Сухов // Вестник Костромского государственного университета им. Н.А. Некрасова. – 2013. – Т. 19. – № 1. – С. 14-19.
6. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. – Л.: Гидрометеоздат, 1975. – 448 с.
7. Волков В.Ю., Аббас С.Б. Автоматизированная система поддержки проведения исследований распространения выбросов загрязняющих веществ в атмосфере // Известия Тульского государственного университета. Сер. Технические науки. – 2013. – Вып. 2. – С. 54-58.
8. Ложкин В.Н., Медейко В.В. Модели оценки экологического ущерба, применяемые в Российской Федерации, США и странах ЕС, при государственном регулировании

- воздействия транспортных средств на окружающую среду // Вопросы охраны атмосферы от загрязнения: информационный бюллетень. – СПб., 2005. – № 2 (32). – С. 103-116.
9. Uliasz M., Stocker R.A., Pielke R.A. Regional modelling of air pollution transport in the south-western USA // Environmental Modelling Vol. III Comput. Mech. Public. – 1996. – 34 p.
10. Информационно-компьютерный комплекс для моделирования динамики примесей от предприятий химической промышленности / А.А. Белослудцев, Д.В. Гусаров, М.А. Еремин, Н.М. Кузьмин, А.В. Хоперсков, С.С. Храпов // Вестник Волгоградского государственного университета. Сер. Математика. Физика. – 2009. – Вып. 12. – С. 24-31.
11. Chernyavskiy S Mathematical model of process of distribution of gas pollutants in the atmosphere under different weather conditions // Технические науки – от теории к практике: тр. XX Междунар. заочной науч.-практ. конф. – Новосибирск, 2013. – С. 17-22.
12. Скоб Ю.А Математическое моделирование выброса и рассеяния в атмосфере газообразных примесей // Вестник Харьковского национального университета. Сер. Математическое моделирование. Автоматизация системы управления. – 2007. – № 775. – С. 236-245.
13. Смирнов Е.А. Информационная система для моделирования распространения загрязнения атмосферного воздуха с использованием ArcGIS // Актуальные вопросы технических наук: материалы междунар. науч. конф. – Пермь, 2011. – С. 27-31.
14. Алоян А.Е. Динамика и кинетика газовых примесей и аэрозоль в атмосфере. – М.: ИВМ РАН, 2002. – 201 с.
15. Чуб А.И. Математическая модель оптимизационной задачи размещения пожароопасных объектов с учетом рельефа области размещения // Радиоэлектроника, информатика, управления выпуск. – 2013. – № 1. – С. 88-93.
16. Сухинов А.И., Гадельшин В.К., Любомищенко Д.С. Математическая модель распространения вредных выбросов от автотранспортных средств на основе метода контрольного объема и ее параллельная реализация на кластере распределенных вычислений // Известия Южного федерального университета. Технич. науки. – 2009. – № 2. – Том 91. – С. 8-14.
17. Гадельшин В.К., Любомищенко Д.С., Сухинов А.И. Математическое моделирование поля ветровых течений и распространения загрязняющих примесей в условиях городского рельефа местности с учетом к-ε-модели турбулентности // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2010. – Т. 107. – № 6. – С. 48-67.
18. Kordzadze A. Mathematical modelling of dynamical and ecological processes in the system sea-land-atmosphere // Air, Water and Soil Quality Modelling for Risk and Impact Assessment. – 2007. – P. 181-193.
19. Sharan M., Gopalakrishnan S.G. Mathematical modeling of diffusion and transport of pollutants in the atmospheric boundary layer // January pure and applied geophysics. – 2003. – Vol. 160. – Issue 1-2. – P. 357-394.
20. Mathematical modeling of the pollutants overland flow and transport / V.G. Gitis, E.N. Petrova, S.A. Pirogov, E.F. Yurkov // Автоматика и телемеханика. – 2007. – Vol. 68. – Issue 9. – P. 1643-1653.
21. Khan Y., Shekhu M., Sulochana C. Mathematical model for dispersion and diffusion of chemically reactive pollutants from various sources into a boundary layer with dry deposition // Engineering Computations. – 2013. – Vol. 30. – Issue 5. – P. 707-727.
22. Сухинов А.И., Чистяков А.Е., Хачунц Д.С. Математическое моделирование движения многокомпонентной воздушной среды и транспорта загрязняющих веществ // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2011. – № 8. – С. 73-79.
23. Чистяков А.Е., Хачунц Д.С. Задача движения многокомпонентной воздушной среды с учетом парообразования и конденсации // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2013. – № 4. – С. 87-98.
24. Сухинов А.И., Хачунц Д.С. Программная реализация двумерной задачи движения воздушной среды // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2013. – № 4. – С. 15-20.
25. Чистяков А.Е. Трехмерная модель движения водной среды в Азовском море с учетом транспорта солей и тепла // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2009. – № 8. – С. 75-82.
26. Ravshanov N., Shertaev M., Toshtemirova N. Mathematical Model for the Study and Forecast of the Concentration of Harmful Substances in the Atmosphere // American Journal of Modeling and Optimization. – 2015. – Vol. 3. – № 2. – P. 35-39.
27. Равшанов Н., Шарипов Д.К., Ахмедов Д. Моделирование процесса загрязнения окружающей среды с учетом рельефа местности погодно-климатических факторов // Информационные технологии моделирования и управления. – Воронеж, 2015. – № 3. – С. 222-235.
28. Anderson G.E. Musicales influences on wind fields // Appl. Meteor. – 1971. – № 10. – P. 377-386.

УДК 504.064

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СЕЛИТЕЛЬНЫХ ЗОН КАК СОСТАВЛЯЮЩАЯ КАЧЕСТВА ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

Саньков П.Н., Гилёв В.В., Макарова В.Н.

*Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры,
Днепропетровск, e-mail: petr_sankov@mail.ru*

Проведен анализ научно-технической литературы показал, что существуют различные методы комплексной оценки факторов, влияющих на качество жизнедеятельности населения, были выявлены основные их преимущества и недостатки. Недостатки приведенных методов состоят в том, что охватывая только воздействие природных или антропогенных факторов, они не учитывают всю гамму вопросов оказывающих влияние на качество и безопасность жизнедеятельности населения в городах. Необходима разработка национальной методологии оценки качества и безопасности жизнедеятельности населения (КБЖДН), которая позволит определять социально-эколого-экономическую ситуацию в городах и регионах страны, её место по отдельным классам благополучия во Всемирной или Европейской иерархии государств, а главное, определять объемы национальных программ по достижению соответствующих показателей КБЖДН. Отдельные факторы и их влияние на качество окружающей среды требуют специальных исследований и обоснований при разработке подобной национальной методологии по таким показателям как загазованность, шум, электромагнитные колебания и другие факторы. Были выделены два наиболее мощных и действенных фактора – шум и атмосферное загрязнение от улиц и дорог.

Ключевые слова: качество, жизнедеятельность, городская среда, шумовое загрязнение, загазованность.

ENVIRONMENTAL SAFETY OF RESIDENTIAL AREAS AS PART OF THE QUALITY OF THE URBAN ENVIRONMENT

Sankov P.N., Hilyov V.V., Makarova V.N.

*Prydniprovs'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture,
Dnipropetrovsk, e-mail: petr_sankov@mail.ru*

The analysis of scientific literature showed that there are different methods of integrated assessment of factors affecting the quality of life of the population, identified some of their advantages and disadvantages. The disadvantages of the above methods are that covering only the impact of natural or anthropogenic factors, they do not take into account the full range of issues affecting the quality and safety of the population in the cities. It is necessary to develop a national methodology for assessing the quality and safety of the population life and activity (QSPLA), which will determine socio-ecological-economic situation in the cities and regions of the country, its a place for individual classes of well-being in European or world hierarchy of States, and most importantly, to determine the level of national initiatives to achieve the relevant indicators of QSPLA. Individual factors and their impact on the environment require special research and studies in the development of a national methodology based on such indicators as pollution, noise, electromagnetic oscillations and other factors. Were allocated two of the most powerful and effective factor is the noise and atmospheric pollution from streets and roads.

Keywords: quality, livelihoods, urban environment, noise pollution, fumes.

Экологическая безопасность является составляющим элементом национальной безопасности. Ее целью является минимизация воздействия антропогенной деятельности на окружающую среду (ОС). Сегодня в условиях научно-технического прогресса и активно осуществляемого процесса урбанизации происходит неуклонное наращивание искусственной среды проживания, которая заметно усложняется в крупных и крупнейших городах и вступает в своеобразную несоответственность с психофизиологическими характеристиками человека, увеличивает нагрузку на его биологическую сущность, затрудняет общение с природой и значительно влияет на качество жизни и состояние здоровья человека, которое является критерием оценки экологической безопасности искусственной экосистемы [8].

Поскольку по определению устава Всемирной организации здравоохранения «Здоровье является состоянием полного физического, душевного и социального благополучия, а не только отсутствием болезней и физических дефектов» [40, с. 1], то город и его системы оказывают непосредственное влияние на здоровье граждан, которое фактически отображает уровень жизни, качество окружающей среды и безопасность жизнедеятельности населения (КБЖДН).

Здоровье выступает наиболее важным условием дальнейшего развития общества, продуктивности и качества труда. Эта проблема получила свое отражение в научной литературе [1, 9, 21].

Качество, как социологическое понятие используется давно, поскольку качество есть одно из составляющих двигателя про-

гресса, а в условиях рыночных отношений вопросы качества приобретают особую остроту, особенно в современный период. Именно качество несет в себе заряд колоссальной экономической и социальной силы. Не благополучная Америка, а разбитая и раздавленная во Второй мировой войне Япония сделала ставку на качество. Внимание к качеству продукции, выпускаемой национальными предприятиями, было возведено в ранг государственной политики, но главное – это внедрение в сознание людей прямой зависимости социального благополучия от качественной работы, поощряемой всеми возможными способами. Примерно таким же путем шла после войны и поверженная Германия. Сейчас обе эти страны входят в число одних из самых богатых [36].

Можно говорить о качестве товара, под которым сегодня больше понимается сельскохозяйственная и бытовая продукция (хлеб, молоко, телевизор и т.д.). Для совершенствования их качества или поддержания на определенном уровне действует система государственных и ведомственных стандартов. Но можно говорить и о качестве проекта (тоже продукция), о качестве обслуживания, о качестве природных ресурсов (вода, почва и т.д.). Здесь также существует система стандартов, санитарных и строительных нормативов, которые тоже позволяют поддерживать качество на определенном уровне.

Под качеством жилища будем понимать множество различных факторов: транспорт, КБО (культурно-бытовое обслуживание), здравоохранение и т. д. И не всегда, имея качественное жилье в виде коттеджа, человек удовлетворен. Часто можно услышать, что район «плохой» или еще какие-либо отрицательные характеристики.

В настоящее время во всех экономически развитых странах принята единая терминология, содержащаяся в международном стандарте ISO 8402, первая версия которого была принята в 1986 г. – за год до введения в действие стандартов ISO серии 9000. Стандарты ISO серии 9000 появились впервые в 1987 году, и приобрели сегодня широкую популярность. Более 70 стран имеют национальные стандарты, эквивалентные ISO серии 9000. Стандарты ISO на систему качества широко внедрены в Европе, США, Японии, странах Азии и Латинской Америки [36].

Всегда легче говорить о качестве отдельного продукта, в изготовлении которого в технологической цепи используется несколько компонентов (составляющих элементов). Например, хлеб, колбаса и т. д. Несколько сложнее определить качество жилого дома или костюма. Здесь могут сыграть отрицательную роль такие факторы, как современная мода, мировые (европейские) стандарты и т. д. Еще сложнее говорить о качестве города, то есть о качестве жизнедеятельности населения города, когда на высокую оценку влияет множество частных факторов и элементов самых разнообразных систем: транспортной, озеленения, здравоохранения и т. д. [5, 43].

Города представляют уникальное сочетание места и населяющих его людей, и своим происхождением и развитием обязаны социально-экономической активности человека [44]. Человеческая жизнь в городе осуществляется с ограничением времени и пространства и образует определенную модель, представляющую объект для изучения. XX век характеризовался интенсивным распространением научно-технического прогресса и ростом объемов производства, заметным увеличением численности населения, особенно городского, и всемирным процессом урбанизации.

Ускоряющийся темп урбанизации на современном этапе связан с дальнейшим расширением энергетических потребностей общества, появлением и развитием новых типов транспорта, увеличением системы коммунальных услуг, высоким уровнем комфорта жизни, интеллектуального общения. На рубеже XX и XXI веков население Земли, по данным ООН, достигло 6 миллиардов человек. При этом темпы роста населения резко усилились во второй половине XX столетия. К этому же периоду приурочено резкое увеличение городского населения, численность которого на рубеже веков приблизилась к 3 миллиардам человек, что составляло половину населения Земли [3].

Казалось бы, урбанизация должна знаменовать улучшение условий жизни, ибо массовая миграция населения в города связана с желанием получить работу (по душе), комфортабельное жильё, разнообразные товары и услуги в сфере отдыха, соответствующий образ жизни, но города не всегда и не всем обеспечивают качественный труд, быт и отдых. Больше того, замена здоровых сельских условий на неблагоустроенное

жильё городских окраин, загрязнение воздушной среды, почвы, воды, шум и темп жизни больших городов способствуют физическому и душевному ослаблению людей, угрожая их здоровью. Последний фактор – здоровье является самым приоритетным в решении задач, связанных с обеспечением экологической безопасности и высокого качества окружающей среды.

Под средой населённого места будем понимать сочетание искусственно созданных условий жизни (улицы, здания, завихрения воздуха около них, мезоклимат города и т.п.), то есть третья природа среды «второй природы» (среды развитой) и элементов природной среды в совокупности с социально-экономической средой, воздействующих на человека (рис. 1) [41].

твиваемого объекта или субъекта, но обязательно непосредственно контактирующим с ним. Под внутриквартирной средой понимаются условия жизни в жилых помещениях. На качество этой среды оказывают заметное влияние множество факторов как внутри квартиры, так и внешней среды (физико-химические, биологические, психологические, биотическое окружение, транспортный и коммунальный шум, радиоактивность природная и строительных материалов, загрязнение атмосферы, влажность и скорость перемещения воздуха и множества других).

Аналогичный перечень факторов (с незначительными изменениями и дополнениями) может нам характеризовать производственную среду как промышленных и ком-

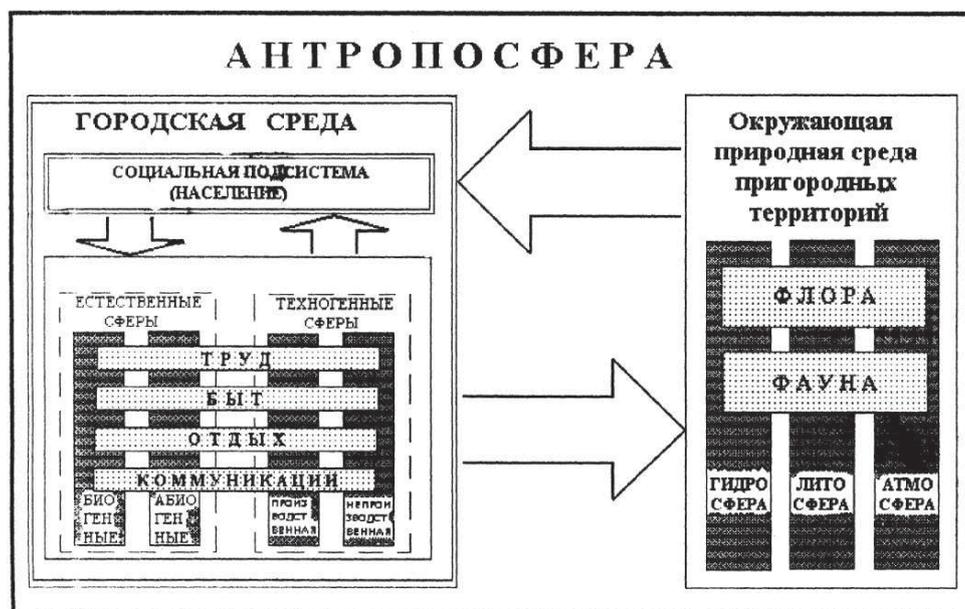


Рис. 1. Гипотетическая модель городской среды

При рассмотрении жизнедеятельности человека большое значение играет среда, окружающая человека непосредственно (жильё и другие искусственные сооружения, семья, соседи, рабочий коллектив), в котором человек проводит до 60-90% всего времени жизни.

Отметим так же среду жилую, в которую входят среда внешняя и среда внутриквартирная. В качестве внешней среды рассматриваются силы и явления природы, её вещество и пространство, любая деятельность человека, находящегося вне рассма-

мунальных объектов, так и огромного количества самых разнообразных административных и общественных зданий (НИИ, вузов, школ, техникумов, больниц и поликлиник, торговых учреждений и др.) в совокупности с социально-психологической средой в коллективе. Таким образом, интересующая нас городская среда является составной частью окружающей среды, одним из результатов производственной и непроизводственной деятельности людей.

Города, как и их среда, развиваются по законам сложных систем и включают в себя

ряд подсистем: природную, техногенную и социальную [44]. Оставляя приоритетность за проблемой оптимизации взаимоотношений природы и общества на региональном уровне (мезо- и макросреда), на уровне города (микросреды) главным остается сохранение природных качеств и оздоровление городской среды.

Поскольку города являются высшей формой организации пространства, то они обладают и значительным потенциалом для удовлетворения всех потребностей человека, в том числе и возможностями, поддерживать здоровье на необходимом уровне, восстановить работоспособность, обеспечить соответствующий уровень экологической безопасности, КБЖДН. Способствовать этому в существующих городах будет в полной мере оздоровление городской среды, под которыми понимается комплекс мер по охране и восстановлению качества природных факторов и оптимизации влияния антропогенных факторов на население с целью поддержания здоровья и обеспечения качественной жизнедеятельности. Оздоровление городской среды полностью отвечает принципу Декларации ООН по населенным пунктам, в котором отмечается, что улучшение качества жизни людей является первой и самой важной целью политики в области населенных мест. Этот принцип обязаны поддерживать все государства – члены ООН.

Известные социологи И.В. Бестужев-Лада и Г.С. Батыгин, рассматривали качество жизни как социологическую категорию, характеризующую важную сторону условий жизни, отмечая, что оно, «... ориентировано на оценку степени удовлетворения материальных и отчасти духовных потребностей, которые поддаются непосредственному количественному измерению. ... Сюда относятся показатели содержательности труда и досуга, удовлетворенности трудом и досугом, уровня комфорта в труде и быту, качества питания и условий приема пищи, качества одежды, жилья, жилой и окружающей среды вообще, качества функционирования всех социальных институтов...» [7, с.34].

В свете такого подхода необходимо подчеркнуть, что затронутые социологами факторы имеют непосредственное отношение к градостроительным задачам, и находят свое решение в генеральных планах населенных мест, в проектах по планировке, застройке и благоустройству зон и территорий различ-

ного функционального назначения, в разработках жилых, общественных, административных, производственных, зданий и других объектов, в объективном процессе урбанизации. Необходимо подчеркнуть, что в последнее время качество жизнедеятельности специалисты связывают со здоровьем людей в системе человек – производство – среда. На таком концептуальном подходе строят свою деятельность различные международные организации (ВОЗ, ООН и др.), применяются различные системы оценивания качества жизни в разных странах мира [10].

Экономические факторы и условия, действующие в своей совокупности, могут в определенной степени компенсировать многие негативные последствия, связанные с загрязнением воздуха городов, акваторий, почвы, влияния физических факторов (шум, радиация и т.п.). Компенсационные затраты обратно пропорциональны прямым капитальным вложениям в решение экологических проблем.

Все биологические системы могут существовать в окружающей среде при условии биологического равновесия. Человек как единственная биологическая система способен при взаимодействии с природой (окружающей средой) регулировать и контролировать обмен веществ между собой и природой. Эта деятельность во многом определяется главными процессами жизнедеятельности – трудом, бытом и отдыхом, условиями, в которых они протекают. По этой причине человек способен изменить не только среду своего существования, но и свою собственную природу. Ведущую роль в этом блоке факторов играют здоровье и уровень трудоспособности населения. В условиях научно-технического прогресса (НТП), урбанизации и переустройства общества возрастает социальная ценность и экономическая стоимость здоровья человека. Наносимый ущерб тем больше, чем выше качество жизни, квалификация работника, технический уровень производства. Будучи мерой свободного и оптимального соответствия биологических и социальных способностей человека, здоровье служит важнейшим условием дальнейшего гармонического развития общества, повышения производительности и качества труда, благосостояния общества, качества и безопасности жизнедеятельности населения.

Например, чрезвычайно эффективными считаются меры по шумозащите населения.

Индиifferentное же отношение к проблеме городского шума приводит к большим издержкам общества. По данным Е.П. Самойлюка [34], работа над картой шума Украины показала, что величина годового экономического ущерба из-за шумового загрязнения населенных мест составляла в 1998 г. более 5,2 млрд. грн. или около 100 грн. на одного жителя Украины (в 2020 году суммарный годовой экономический ущерб составит в ценах 1998 года более 6,5 млрд. грн. или около 123 грн. на жителя). Для обеспечения в городах Украины допустимого уровня шума градостроительными и архитектурно-конструктивными средствами необходимо 8,4 млрд. грн., а для достижения акустического комфорта необходимо около 30 млрд. грн. эти затраты окупаются за 4,5-5 лет, что указывает на их значительную эффективность (норматив 8 лет). Современные ценовые реалии, свидетельствуют о необходимости пересмотра данных величин более чем в 12,5 раз.

Многие частные факторы, оказывающие влияние на здоровье человека могут рассматриваться в различных сферах жизнедеятельности человека. Сами они не могут обеспечить качественное состояние системы, когда кому-либо или чему-либо не угрожает опасность, то есть когда риск возникновения угрозы (чрезвычайной ситуации) может отсутствовать ($R_b = 0$) или существовать ($R_b > 0$), но риск последствий равен нулю ($R_n = 0$) [6].

Таким образом, безопасность населения можно считать объективной и абсолютно обеспеченной, если в системе:

$$R_b = 0 \quad R_n = 0$$

или (1)

$$R_b > 0 \quad R_n = 0$$

Однако эта идеальная ситуация часто выступает в качестве желанной. Часто более реальна система:

$$R_b > 0 \quad R_n > 0 \quad (2)$$

Тем не менее отмечается устойчивая тенденция увеличения доли летальных исходов. Так на Украине ежедневно на производстве погибает 40...60 человек, а в целом по стране от различных опасностей лишаются жизни более 1000 человек [6].

Одна из косвенных причин этого явления – влияние качества городской среды. Психоземotionalный травматизм, нервно-

психические заболевания (неврозы, параневрозы, эндогенные психозы) становятся заметной причиной преждевременной смерти людей.

В документе ВОЗ (А/24/А/1) записано, что «...здоровоохранение рассматривается не только как комплекс чисто медицинских мер, а как важный компонент социально-экономических систем, объединяющих все экономические, социальные, политические, профилактические, лечебные и другие меры, которые человеческое общество в любой стране и на любой стадии своего развития использует для охраны и постоянного улучшения здоровья каждого человека и общества в целом».

Поэтому под качеством жизни (жизнедеятельности) будем понимать социологическую категорию, указывающую на оценку степени удовлетворения основных функций человека (труд, быт, отдых) и потребностей более высокого порядка, отражающих уровень физического, умственного, социального, психологического, экономического и экологического благополучия как они понимаются обществом на данном этапе развития.

Представление о среде является одним из основополагающих в экологическом подходе, берущем свое начало в популяционной биологии и трансформировавшимся затем в другие области научного знания. Представления о среде широко используются и в исследовании различных экологических проблем городов.

Множеству представлений о среде соответствует и разнообразие методов оценки ее состояния.

Анализ работ [16, 18, 26, 30, 42] связанных с оценкой качества среды выявил наличие широкого спектра подходов (социологических, санитарно-гигиенических, технологических, градостроительных и пр.), используемых методов оценки, употребляемых терминов и понятий.

Методы оценки уровня качества в зависимости от количества оцениваемых свойств и процедур оценки включают дифференциальный, комплексный и смешанный методы [36].

Дифференциальный – метод оценки уровня качества, основанный на сопоставлении значений единичных показателей качества оцениваемых объектов с соответствующими значениями единичных показателей базовых образцов:

$$q_i = P_i / P_6 \quad (3)$$

$$q_i = P_6 / P_i \quad (4)$$

где P_i – абсолютный показатель оцениваемого объекта; P_6 – абсолютный показатель качества базового образца.

По формулам (3) или (4) рассчитывают относительные значения показателей качества.

При сопоставлении значений единичных показателей качества оцениваемых показателей с базовыми могут возникнуть следующие ситуации:

- все относительные значения показателей больше или равны единице, т.е. уровень качества оцениваемых объектов равен или превышает значения базового образца;

- часть относительных показателей больше или равны единице, а часть меньше единицы; в этом случае для выявления степени соответствия оцениваемого объекта базовому образцу нужно использовать комплексный метод оценки уровня качества.

Комплексный метод оценки качества объекта – метод оценки, основанный на использовании комплексных показателей его качества.

Расчету комплексных показателей качества объекта предшествуют следующие действия:

а) выбор номенклатуры показателей свойств;

б) определение значений показателей единичных свойств;

в) расчет коэффициентов весомости каждого из них;

г) выбор базовых значений и расчет безразмерных относительных показателей качества;

д) расчет комплексного показателя.

Смешанный метод оценки качества объекта – метод, основанный на одновременном использовании и комплексного и дифференциального метода.

Смешанный метод используют, например, в тех случаях, когда после проведения комплексной оценки уровня качества нужно уточнить, за счет каких единичных показателей получены высокие или низкие значения комплексного показателя. Достаточно точные методы оценки качества необходимы для решения множества проблем в т.ч. управлением качеством.

Начиная с 60-х годов получила распространение оценка уровня качества, при которой показатели свойств оцениваемых объектов сравниваются с базовыми значе-

ниями этих же показателей. Подобное «предметное» оценивание представляет собой процедуру сравнения существующего состояния компонентов и аспектов среды с «эталоном», которое выражается в виде всевозможных «предметных» стандартов (технологических, санитарно-гигиенических, социальных, эстетических и пр.).

Качественное состояние городской окружающей среды закладывается еще на стадии проектирования. Архитектурные и градостроительные ошибки могут нарушить не только физиологические, экологические и другие нормативы, но и привести к нарушению функциональных удобств проживания, к сбою качественной работы систем жизнеобеспечения, транспорта, озеленения, культурно-бытового обслуживания (КБО) и других, привести к забвению памятников природы и культуры, к бездуховности типовой застройки, к полной деградации окружающей среды.

Общественная потребность в использовании количественных оценок для определения качества проектного решения породила новую научную область – квалиметрию. Один из родоначальников квалиметрии Г.Г. Азгальдов [2] отмечает, что архитектурно-строительные проекты наиболее трудны для применения аппарата квалиметрии. А с другой стороны, именно при оценке архитектурно-строительных проектов квалиметрия может обеспечить максимальный эффект.

Г.Г. Азгальдов [2] указывает, что во многих методиках предлагается использовать для оценки качества проектов различные критерии и характеристики проектов в качестве основополагающих. Например, степень прогрессивности проекта, ритмоструктуру, демографические условия, комфортабельность жилища и т. д. Частичная оценка отдельных, а не всех (основных) свойств проекта, не могла в конечном итоге ответить на главный вопрос о качестве проекта, а значит и будущего объекта. Некоторые предлагаемые критерии (архитектурно-технический уровень, показатель качества объемно-конструктивного решения, экономичность и др.) также не отвечают на главный вопрос, хотя прогрессивное конструктивное решение или повышение экономичности могут быть средством повышения качества будущего объекта.

Очевидно, что наиболее целесообразно для оценки качества проекта использовать

критерии, которые обобщают информацию о многих свойствах объекта и дают более объективное представление о качестве. Таким критерием является «интегральное качество», «показатель интегрального качества» [2, 36, 43].

Отмечается, что существуют различные методы оценки качества проектов [2]. Поэтому представляет интерес качество самого метода оценки. Тщательный анализ позволил выявить иерархическую структуру свойств методов, их сходство и отличие. Предъявлялось 14 основных требований к 16 методам оценки. Результаты анализа согласно выводам Г.Г. Азгальдова [2] показывают, что при применении квалиметрического метода оценки проекта удовлетворяются все 14 требований. При этом показатель качества K^K определяется как средневзвешенная арифметическая величина из показателей отдельных свойств проектируемого объекта K_i и соответствующих коэффициентов весомости G_i :

$$K^K = K_{эф} \sum_{i=1}^n K_i G_i, \quad (5)$$

где $K_{эф}$ – коэффициент сохранения эффективности объекта, который равен:

$$K_{эф} = \frac{T_{су} - T_{пр}}{T_{ЭТ}}, \quad (6)$$

где $T_{су}$ – период существования объекта; $T_{ЭТ}$ – эталонный период существования объекта; $T_{пр}$ – период простоя.

Часто величина $K_{эф}$ не имеет смысла, а потому $K_{эф} = 1$.

Таким образом, квалиметрический метод оценки проекта является самым приемлемым в вариантном проектировании. Разработка вариантов обеспечивает достижения наивысшего качества из потенциально возможного (повышение качества до 40% по сравнению с невариантным проектированием). Наличие методики оценки проекта поднимает престижность и смысл вариантного проектирования, а иначе сама идея вариантного проектирования дискредитируется.

Свойства, характеризующие в конечном итоге интегральное качество объекта (проекта) выстраиваются в так называемое дерево свойств – графическое изображение разветвляющейся структуры, состоящей из

сложных свойств и связанными с ними группы свойств, которые образуют ярусы (рис. 2) [2, 43]. Общее число ярусов m в дереве свойств образуют высоту дерева. Самое сложное свойство дерева – это корень дерева (нулевой уровень). На m -том уровне находятся только простые свойства. Этот уровень определяет максимальную высоту дерева.

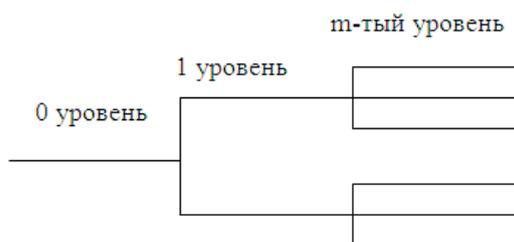


Рис. 2. Дерево свойств

Для проектов объектов определённого типа разрабатывается своя методика оценки качества (МОК). Методику разрабатывает коллектив, состоящий из трёх групп специалистов: организационной (ОГ), технической (ТГ) и экспертной (ЭГ). В группу ОГ входит 2-3, ТГ – 1-2 и ЭГ – 7-10 специалистов в зависимости от сложности и важности объекта.

Большие требования предъявляются к экспертам, которые должны иметь высокую квалификацию по проектированию оцениваемого типа объекта и обладать целым рядом свойств (информированностью, уверенностью, объективностью и др.).

Обычно методика для объекта средней сложности разрабатывается коллективом в течение 2,5-3 месяцев при занятости отдельных специалистов от 1 дня до 3 недель. Очевидно, что при таком подходе к оценке качества проекта требуются дополнительные затраты средств и времени. Но, как говорилось уже в начале, цель оправдывает средства.

Однако всё сказанное выше относится к аппарату квалиметрии, который был уже применён к таким объектам как «... композиционные и конструктивные схемы сооружений, их объёмно-планировочные, планировочные и архитектурно-художественные решения, отдельные части зданий, отдельные виды строительных материалов, район строительства и место посадки в этом районе, зонирование территории строительных комплексов» [2, с. 190].

Нетрудно заметить, что речь идёт в основном об отдельных объёмах или их частях; отсутствие объектов градостроитель-

ства (микрорайонов, населённых мест и их систем); за исключением одного (рис. 3, 4, табл. 1) [2].

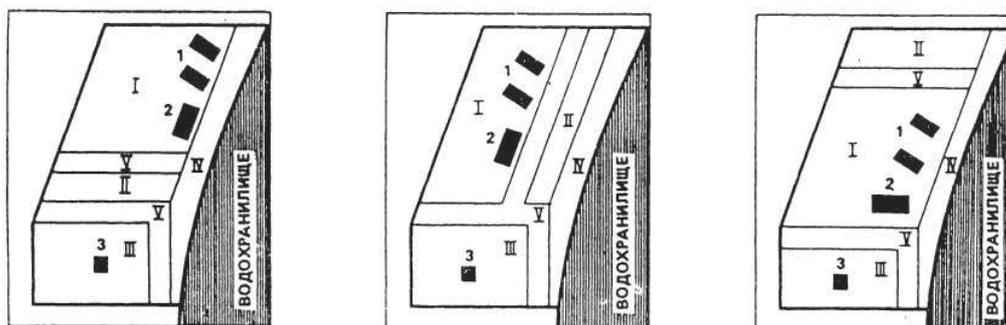


Рис. 3. Варианты зонирования территории пансионата:
 I – зона отдыха и обслуживания; II – зона спортивных сооружений;
 III – хозяйственная зона; IV – пляжная зона; V – зелёные насаждения;
 1 – спальные корпуса; 2 – клуб-столовая; 3 – котельная

ЯРУСЫ ДЕРЕВА СВОЙСТВ			
0	1	2	3
КАЧЕСТВО	ФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ	ЗОНЫ ОТДЫХА	1. БЛИЗОСТЬ К ПЛЯЖУ
			2. АКУСТИЧЕСКОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОЗДУХА
		ЗОНЫ СПОРТСООРУЖЕНИЙ	3. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОЗДУХА
			4. БЛИЗОСТЬ К СПАЛЬНЫМ КОРПУСАМ
	ЭСТЕТИЧНОСТЬ	ЗОНЫ СПОРТСООРУЖЕНИЙ	5. БЛИЗОСТЬ К ПЛЯЖУ
			6. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОЗДУХА
		ЭСТЕТИЧНОСТЬ	7. УСЛОВИЯ ОБЗОРА ЗОНЫ СО СТОРОНЫ ВОДОХРАНИЛИЩА
			8. УСЛОВИЯ ОБЗОРА ВОДОХРАНИЛИЩА ИЗ ЗДАНИЙ ЗОНЫ ОТДЫХА

Рис. 4. Дерево свойств, характеризующих качество вариантов зонирования территории пансионата

Таблица 1

Сравнение вариантов зонирования территории пансионата [2]

№ свойств	Коэффициент весомости $G_i, \%$	Единица измерения	$q^{бр}_i$	$q^{ст}_i$	Вариант 1			Вариант 2			Вариант 3		
					q_{i1}	K_{i1}	$K_{i1} G_i$	q_{i2}	K_{i2}	$K_{i2} G_i$	q_{i3}	K_{i3}	$K_{i3} G_i$
1	6,32	м	1940	22	50	0,98	6,19	130	0,94	5,94	50	0,98	6,19
2	15,11	%	0	100	79	0,79	11,94	64	0,64	9,67	47	0,47	7,1
3	12,82	%	0	100	73	0,73	9,36	68	0,68	8,72	42	0,42	5,38
4	8,16	м	1530	35	300	0,82	6,69	90	0,96	7,83	150	0,92	7,51
5	6,24	м	520	18	130	0,78	4,87	40	0,96	5,99	130	0,78	4,87
6	17,42	%	0	100	18	0,18	3,14	38	0,28	6,62	95	0,95	16,55
7	14,76	%	0	100	100	1	14,76	82	0,82	12,1	96	0,96	14,17
8	19,17	%	0	100	100	1	19,17	73	0,73	13,99	96	0,96	18,4

$$K_1^K = \sum_{i=1}^8 K_{i1} G_i = 76,12;$$

$$K_2^K = \sum_{i=1}^8 K_{i2} G_i = 70,86;$$

$$K_3^K = \sum_{i=1}^8 K_{i3} G_i = 80,17;$$

Идея оценки качества генплана города или проекта детальной планировки жилого района, работы транспортной системы или системы здравоохранения, культурно-бытового обслуживания, воспитания и образования и так далее очень заманчивая, однако объекты градостроительного проектирования представляют собой сложные системы, элементы которых находятся в сложных взаимоотношениях, а потому их и сложно оценивать. Для экспертной оценки необходимо привлекать специалистов очень разнообразной специальной направленности (планировщиков, транспортников, инженеров по подготовке и благоустройству территорий, по инженерным коммуникациям и др.).

До сих пор оценка градостроительных объектов осуществляется по ТЭП населённого места (жилого района, микрорайона). А ведь именно в проектах градостроительного плана «закладывается» и формируется качество и безопасность жизнедеятельности будущего населения.

Но сложность оценки качества городской среды можно уменьшить с помощью типизации и унификации некоторых элементов и объектов. К последнему можно отнести типовой дом для строительства в определённых природно-климатических условиях. Здесь заранее осуществляется оценка качества дома (проекта) на основе климатической типологии жилища, нормативов и показателей нескольких научных направлений.

Широко применяется комплексная оценка территории будущего строительства [11]. Оценка производится по двум группам факторов – природным и антропогенным. К природным факторам относятся инженерно-геологические, почвенно-растительные, водные ресурсы и др. К антропогенным факторам – обеспеченность территории транспортными и инженерными сетями, транспортную доступность, санитарно-ги-

гиенические условия и требования охраны природы, архитектурно-эстетические достоинства ландшафтов и т.д.

Состав и число факторов, их свойства и показатели (нормативы) определяются в зависимости от задач (направленности) и конкретных условий. Выделяют три категории оценённых территорий: благоприятные, ограниченно благоприятные и неблагоприятные. Фактически мы имеем дело с трёхбалльной системой.

В качестве критериев приняты затраты, необходимые для приведения фактических натуральных показателей свойств оценочных факторов до уровня нормативных. Нормативными считаются натуральные показатели, обеспечивающие наиболее эффективное функционирование на данной территории того или иного вида народнохозяйственной деятельности. Проблема данной оценки заключается в построении единого интегрального показателя оценки уровня жизни, качества жизни.

В настоящее время существует три метода построения комплексных оценок: балльная, стоимостная и аддитивная. Наибольшее распространение получила балльная оценка. Суть ее заключается в том, что выбирается система показателей и для каждого из них разрабатывается своя шкала оценок в баллах. Легко заметить, что этот метод обладает высоким уровнем субъективности при выборе шкал и систем показателей.

В.П. Стаускас [38] при организации рекреации приводит систему оценки трёх главных аспектов: функциональный, гигиенический и эстетический. В результате определяются территории трёх категорий, на которых: очень благоприятные условия (А); благоприятные условия (В) и посредственные условия (С).

Методикам с применением трёхступенчатой системы оценки, присуща резкая, категоричная градация, без «полутонов». Эти методики не охватывают всего разнообразия жизнедеятельности населения городов, а характеризуют лишь определённые аспекты качества окружающей (природной) среды. Ясно, что отдельные компоненты окружающей среды можно рассматривать изолированно, без оценки всего комплекса в целом.

Комплексный подход к рассматриваемой проблеме – это наиболее вероятный путь получения реальной оценки качества

среды и возможности управлять этим качеством. Близко к решению проблемы подошли Я. Миколаш и Л. Питтерман [24].

В методологии [24] используются некоторые положения квалиметрии. Например, для иерархизации факторов окружающей среды используется ветвящийся граф (дерево свойств). Рассмотренная методология требует дальнейшего уточнения с учётом специфики рассматриваемого объекта оценки, действующих стандартов, нормирования.

Т.Ю. Овсянникова [26] предлагает использовать индекс качества градостроительной среды для межрегионального сравнения и динамического анализа уровня городского развития на основе усредненной оценки показателей.

Как отмечает Самойлюк Е.П. [35] наблюдается определенная зависимость между уровнем качества жизнедеятельности населения и заболеваемостью, продолжительностью жизни, уровнем производственного травматизма (рис. 5).

Как уже говорилось выше, наилучшие условия для жизнедеятельности человека способны создавать лишь урбанизированные территории и системы, в которых сохраняются качественные показатели соответствующих сред, и их определенное соотношение для обеспечения экологического равновесия. Элементом таких систем и территорий является город, принадлежащий групповой системе населенных мест, в рамках которого люди взаимодействуют с определенными видами материального и духовного производства. В такой искусственной, городской среде обеспечиваются практически все основные биологические и социальные процессы жизнедеятельности общества.

«Жизнедеятельность города – это последовательность непрерывных потоков энергии, веществ и продуктов их переработки. Интенсивность этих потоков зависит от численности и плотности городского населения, статуса города – вида и развития промышленности, объема и структуры транспорта» [3, с.33].

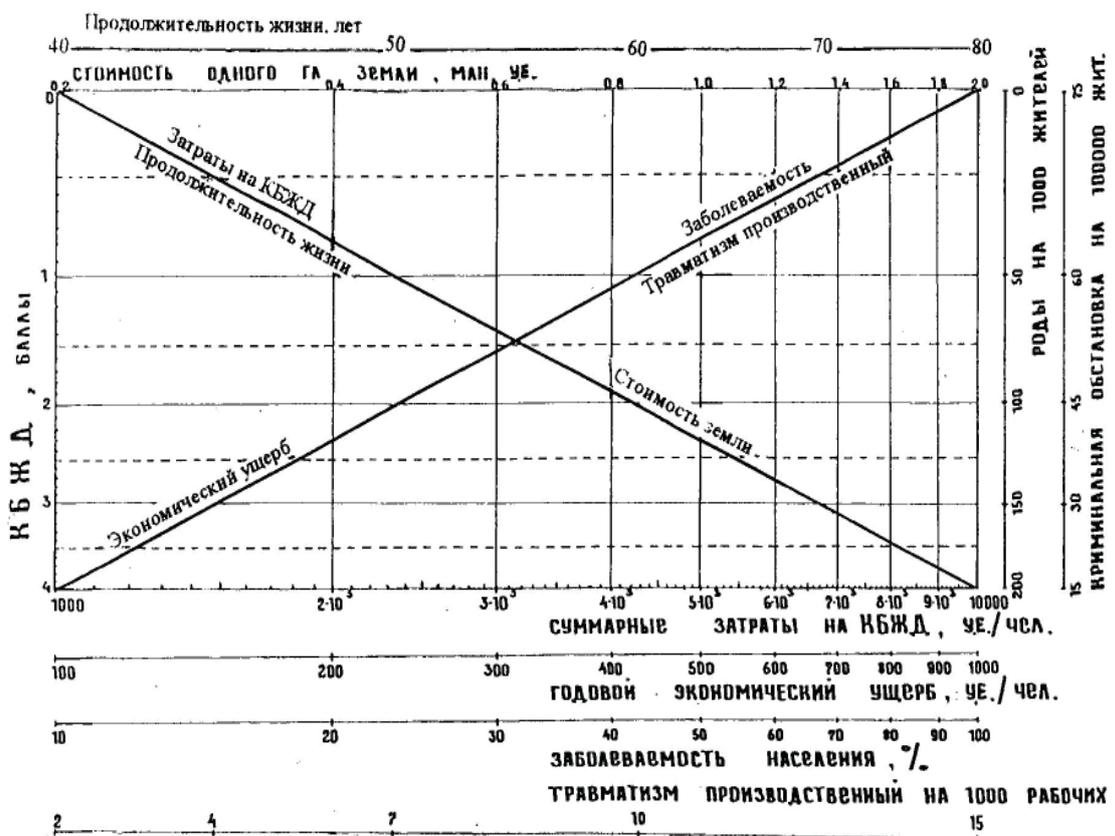


Рис. 5. Зависимость продолжительности жизни и других показателей от уровня КБЖД

Функционально-планировочная структура городских поселений включает в себя селитебную, производственную, в т.ч. внешнего транспорта, и ландшафтно-рекреационную территорию. Нормативные документы Украины и Российской Федерации (ДБН 360-92** «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений» и СП 52.13330.2011 «Естественное и искусственное освещение») идентично трактуют понятие селитебной территории, которая включает в себя участки жилых домов, общественных учреждений, зданий и сооружений, в т.ч. учебных, проектных, научно-исследовательских и других институтов без опытных производств, внутриселитебная улично-дорожная и транспортная сеть, а также площади, парки, сады, скверы, бульвары, прочие объекты зеленого строительства и места общего пользования.

Однако, несмотря на то, что урбанизированные территории обладают большим потенциалом для создания благоприятных условий для жизнедеятельности человека, с одной стороны, с другой стороны в искусственных системах создаются экстремальные значения разных экологических факторов, таких как шум, загазованность, загрязнение почв, электромагнитное излучение и другое [14, 27, 29, 46, 47]. В большей степени воздействию данного вида загрязнений подвержено население, проживающее на территориях, прилегающих к магистральным улицам с интенсивным движением автотранспорта и промышленным объектам.

«В условиях современного развития общества, огромного количества индивидуального автотранспорта, а также растущего количества высокотехнологичного оборудования используемого в быту и на предприятиях, требуется функционирование огромного количества промышленных предприятий, что приводит к перманентному загрязнению городской среды, а следовательно ухудшению здоровья населения» [23, с. 64].

Функционирование промышленных предприятий неотъемлемо связано с образованием большого количества отходов. Любые вторичные продукты производства (отходы) содержат значительное количество ценных компонентов, и на этом основании можно их рассматривать как техногенные месторождения.

Появление нового научного направления, которое изучает техногенные место-

рождения, необходимо для научного обоснования и последующей разработки мероприятий по уменьшению техногенного загрязнения окружающей среды (ОС). Примером одного из таких мероприятий может служить использование техногенного сырья в качестве вторичных ресурсов. Научное развитие данного направления позволит расширить минерально-сырьевую базу региона.

Изменение состояния компонентов окружающей природной среды (ОПС) в значительной степени зависит от продолжительности воздействия и наиболее интенсивно проявляется в пределах старых промышленных районов [22, 31]. В большинстве случаев техногенно-минеральные месторождения (ТММ) сформированы без каких-либо предварительных инженерно-геологических исследований и мероприятий по устройству противодиффузионных экранов их оснований. Вследствие этого происходит миграция химических элементов и соединений за пределы ТММ в ОС. ТММ, как источник загрязнения ОС характеризуются значительными концентрациями различных форм тяжелых металлов (ТМ) в своем составе. В число основных источников воздействия на ОПС входят ТММ. Они воздействуют на природные ресурсы – атмосферу, водные ресурсы и землю.

Воздействие на атмосферу ТММ происходит вследствие пыления их поверхности и может распространяться на значительные расстояния, начинаясь уже при малых скоростях ветра. Это характерно для сухих пляжей шламо- и хвостохранилищ, шлакоотвалов.

Воздействие ТММ на земельные ресурсы можно рассматривать в двух аспектах. Первый составляет нарушение поверхности земли за счет образования техногенных рельефов, изъятие из хозяйственного оборота (отчуждение) ненарушенных территорий. Второй обусловлен механическим и химическим загрязнением земли, прилегающей к техногенно измененным территориям – нарушение физико-механического состава и свойств почвенного покрова [22]. ТМ попадают из воздуха в почву в виде жидких или твердых составляющих осадков [25].

Воздействие ТММ на гидросферу определяется поступлением загрязненных вод в поверхностные водоемы и водотоки. Главными параметрами формирования миграционных водных потоков являются [22]:

- дисперсность техногенно-минеральных образований, выраженная в их удельной поверхности;
- концентрация химических элементов в техногенно-минеральных образованиях;
- формы нахождения тяжелых металлов в ТММ;
- объем техногенно-минеральных образований в ТММ.

Давление на городскую среду городского транспорта имеет много аналогий с промышленностью. Городские магистрали являются наиболее стабильными элементами планировки, в силу этого определяют высокую концентрацию городских функций прилегающих к ним территорий, а, следовательно, и высокую концентрацию населения на этих территориях. Одновременно с тем, городские магистрали являются одним из главных источников загрязнения примыкающей к магистральной территории, которая согласно СП 42.13330.2011 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений» определяется как территория, примыкающая к магистральным улицам общегородского значения, на отрезках, соединяющих центр города с городским узлом или городские узлы между собой.

Условия шумового загрязнения и загазованности примыкающей территории (ПТМ) зависят от конкретной градостроительно-транспортной ситуации:

- а) условий движения (интенсивности и скорости движения, количества грузового и общественного транспорта в потоке, продольного уклона проезжей части);
- б) ширины полосы отвода магистральной улицы (МУ) в линиях застройки;
- в) наличия в контактно-стыковой зоне (территория между проезжей частью МУ и жилым микрорайоном) экранирующих сооружений (стенка, выемка, насыпь, комбинация из них) и специальных зеленых насаждений;
- г) скорости ветра на МУ и в жилой застройке.

«Увеличение численности автотранспортных средств привело к тому, что вдоль городских магистральных улиц и в местах временного хранения автотранспорта (стоянки) создаются зоны повышенной шумленности и загазованности. Поэтому градостроительные ошибки при проектировании улично-дорожной сети часто оказываются прямой причиной загрязнения примыкающей территории (ПТМ) обработанны-

ми газами автотранспорта, что является прямой или косвенной причиной многих заболеваний и приносит значительный ущерб» [13, с. 62].

Выхлопные газы автомобилей приводят воздушное пространство ПТМ в состояние «микросмога», пагубно воздействующее на жителей и особенно детей. Отрицательное воздействие загрязненной среды ПТМ проявляется не только в повышении заболеваемости людей, ухудшении условий их жизни и сокращении ее продолжительности, но и в ускоренном износе основных фондов, подвергающихся воздействию загрязнений.

Концентрация оксида углерода в городском воздухе больше, чем любого другого загрязнителя. Однако поскольку этот газ не имеет ни цвета, ни запаха, ни вкуса, наши органы чувств не в состоянии обнаружить его. Самый крупный источник оксида углерода (СО) в городах – автотранспорт. В большинстве городов свыше 90% СО попадает в воздух вследствие неполного сгорания углерода в моторном топливе. Основная масса выбросов СО образуется в процессе сжигания органического топлива, прежде всего в двигателях внутреннего сгорания.

Содержание СО в естественных условиях от 0,01 до 0,2 мг/м³. Содержание СО в воздухе крупных городов колеблется в пределах 1-250 мг/м³, при среднем значении 20 мг/м³. Наиболее высокая концентрация СО наблюдается на улицах и площадях городов с интенсивным движением, особенно у перекрестков. Высокая концентрация СО в воздухе приводит к физиологическим изменениям в организме человека, а концентрация более 750 мг/м³ – к смерти. Оксид углерода вдыхается вместе с воздухом и поступает в кровь, где конкурирует с кислородом за молекулы гемоглобина. Оксид углерода соединяется с молекулами гемоглобина прочнее, чем кислород. Чем больше оксида углерода содержится в воздухе, тем больше гемоглобина связывается с ним и тем меньше кислорода достигает клеток. По этой причине оксид углерода при повышенных концентрациях представляет собой смертельно опасный яд. СО – исключительно агрессивный газ, легко соединяющийся с гемоглобином крови, образуя карбоксигемоглобин [45].

Состояние организма при дыхании воздухом, содержащим угарный газ, характеризуется данными, приведенными ниже в таблице 2.

Таблица 2
 Действие угарного газа
 на организм человека

№ п/п	Содержание карбокси-гемоглобина, %	Симптомы
1	0,4-2	Ухудшение остроты зрения и способности оценивать длительность интервалов времени
2	2	Нарушение психомоторных функций головного мозга
3	5-10	Изменение деятельности сердца и легких
4	10-80	Головные боли, сонливость, спазмы, нарушения дыхания, смертельные исходы

Степень воздействия СО на организм человека зависит также от длительности воздействия (экспозиции) и вида деятельности человека. Например, при содержании СО в воздухе 10-50 мг/м³, которое наблюдается на перекрестках улиц больших городов, при экспозиции – 60 мин. отмечаются нарушения, приведенные в п.1 таблицы 2, а при экспозиции от 12 часов до 6 недель – в п.2 таблицы 2. При тяжелой физической работе отравление наступает в 2-3 раза быстрее образование карбоксигемоглобина – процесс обратимый, через 3-4 часа содержание его в крови уменьшается в 2 раза. Время пребывания СО в атмосфере составляет 2-4 месяца.

«На загазованность воздушного бассейна накладывается существенное влияние еще одного фактора – шума. Его распределение по всей площади города не допустимо, а создание шумозащитных полос вдоль многих улиц невыполнимо из-за ограниченности территории» [43, с. 14-15]. Проблема городского шума поднималась еще в Древнем Риме. Уличный шум мешал римлянам отдыхать. С тех пор по мере развития общества шум в городах привлекал все большее внимание, как архитекторов, так и общественных деятелей. Уже в средние века появилось первое законодательство по ограничению шума (Англия).

Шум является одним из главных факторов, беспокоящих жителей городов, а одним

из основных источников шума в городе является транспорт. Концентрации потоков автомобилей на магистралях городского и районного значения можно противопоставить рассредоточение потоков по многим улицам и переулкам (стоянкам временного хранения транспорта). Современное состояние шумового загрязнения городов показывает, что уровни шума селитебной территории охватывают диапазон от 35 до 80 дБА.

Известно, что деятельность человека представляет собой сумму раздражений, обуславливающих известную степень истощения и утомления нервной системы человека, что является одним из главных физиологических импульсов к возникновению тормозного процесса, как охранительного. Следовательно, там, где человек работает, бодрствует и отдыхает, его нужно максимально оградить всеми доступными средствами от возможных чрезмерных воздействий внешних раздражителей, особенно это важно сделать там, где человек восстанавливает свою работоспособность – на территории микрорайонов и в рекреационных зонах.

Проблеме шумового загрязнения в городах посвящено много исследований, затрагивающих как медицинские аспекты, так и систему шумозащиты. Наибольшую известность получили результаты исследований шумового загрязнения двух школ – Московской и Днепропетровской школ градостроительной акустики [15, 20, 33, 34, 37]. Под руководством известного ученого в области градостроительной акустики – профессора Самойлюка Е.П. в ДИСИ (ныне ГВУЗ «ЛГАСА») начиная с 70-х годов прошлого столетия сформировалась научная школа, в лаборатории градостроительной акустики которой, были «выполнены работы по составлению карт шума более чем для 100 городов Украины и ближнего зарубежья ... материал натуральных исследований, проведенных при составлении карт шума и генеральных схем шумозащиты, послужил основой для получения поправок при переходе от заданных (рассчитанных) величин корректированных уровней звука ... при действии шума транспортных источников к уровням звукового давления (L_p) в дБ в октавных полосах в диапазоне частот от 31,5 Гц до 8000 Гц» [32, с. 45].

Шумовое загрязнение сегодня является одним из самых вредных физических факторов современного города. Все возрастаю-

щие акустические нагрузки преследуют человека практически постоянно и повсеместно. На сегодняшний день имеется достаточное количество информации о результатах воздействия шума на организм человека. Городской шум пагубно действует на организм человека, поражает органы слуха, центральную нервную систему, вызывает раздражительность, головные боли, болезни сердца и сосудов, нарушает отдых и сон, трудовую деятельность, является прямой или косвенной причиной многих заболеваний. Значительный объем исследований по этому вопросу в свое время был выполнен Киевским научно-исследовательским институтом общей и коммунальной гигиены имени А.Н. Марзеева.

Согласно данным И.Л. Карагодиной [20] существует устойчивая связь увеличения заболеваемости с временной утратой трудоспособности в результате воздействия интенсивного шума. Под влиянием шума резко снижается умственная работоспособность школьников и студентов. Повышенная утомляемость и усталость, рассеивание внимания, нервное и эмоциональное напряжение, стрессовое состояние – все это является следствием шумового загрязнения окружающей среды.

Продолжительный и сильный шум как на производстве, так и в быту вредно влияет на здоровье и работоспособность человека, вызывает общее утомление, может привести к потере слуха и глухоте. Шум ослабляет внимание, затормаживает психологические реакции, поэтому он способствует возникновению несчастных случаев и ведет к снижению производительности труда. Так увеличение шума на 10 дБ уменьшает производительность на 5-8%, для сохранения производительности при повышении шума с 70 до 90 дБ рабочий должен затратить на 10-20% больше физических и нервных усилий [28].

После интенсивного воздействия шума на рабочего или служащего восстановление его работоспособности может тянуться от нескольких часов до нескольких дней. Положение усугубляется и из-за действия шумовой нагрузки во время сна. Возможность восстановления работоспособности рабочего или служащего напрямую связана с производительностью или качеством труда, с экономическими издержками общества и указывает на прямую связь шумового загрязнения на рабочем месте и в быту. Э. Зельцер

[19] приводит область снижения работоспособности под воздействием шумовой нагрузки у лиц, занимающихся физическим и умственным трудом. На селитебной территории городов находится значительное количество заведений, сотрудники которых заняты умственным трудом. Учитывая, что производительность и качество труда взаимосвязаны, можно предположить, что из-за шумового загрязнения городской среды общество несет не только социальные, но и экономические потери. Поэтому для застройки ПМТ необходимо предлагать шумозащитные и шумозащищенные дома. В шумозащитных домах успех достигается за счет рациональной планировки жилых секций, а в шумозащищенных – за счет конструктивных решений (усиление звукоизоляции ограждающих конструкций). Специальные типы домов должны обладать гибкой планировочной структурой, так как первый эшелон застройки ПМТ воспринимает основной удар звуковой энергии, наибольшую концентрацию отработанных газов, пыли и является «лицом» микрорайона [34, 37].

Таким образом, неблагоустроенная жилая среда, значительная техногенная нагрузка ведёт к нервной перегрузке и усталости организма. А усталость порождает у человека неуверенность в себе. Он начинает допускать гораздо больше ошибок, которые могут привести к травме или даже его гибели. В данной ситуации работает закон лимитирующего фактора Ю. Либиха [17], который гласит, что наиболее значим для организма является тот фактор, который более всего отклоняется от оптимального значения. Следовательно, нет факторов, которые играют второстепенную роль.

Поэтому сегодня мы понимаем, что решение жилищной проблемы не сводится только к обеспечению каждой семьи отдельной квартирой или индивидуальным домом: необходимо обеспечить ее жилой средой – некой экологической нишей, в которой могут быть реализованы все потребности человека и семьи. Особенно обостряется проблема, если начать требовать качество, которое обычно связано с количеством обратной зависимостью (в реальных условиях).

Для создания сегодня качественного жилища (жилища будущего), можно идти двумя путями. Первый связан с ориентацией на изучение сегодняшних потребностей

населения и исследование эксплуатационно-бытовых качеств квартир и домов, демографических особенностей и т.д. Однако, полностью ориентироваться на мнение и пожелание жильцов нельзя, т.к. в этом случае неизбежны ошибки, выражающиеся в «забегании» вперед либо в «отставании» потребностей по отношению к социально-экономическим условиям, в опасности развития мещанских представлений об уюте и качестве жилища. Здесь необходима помощь профессионалов в формировании пожеланий жильцов и общественного мнения.

Второй путь связан с созданием модели «идеального жилища», которая бы отражала предельно полные потребности общества. Найденные параметры необходимо откорректировать с учетом реальных экономических возможностей. При этом возможно и поэтапное их достижение.

Выводы

По мере совершенствования методов оценки качества среды, возрастало стремление исследователей создать обобщенный индекс качества среды, главным образом природной, и ее отдельных компонентов, но эти методы малоприменимы для оценки качества городов. Анализ научно-технической литературы показал, что существуют различные методы комплексной оценки факторов, влияющих на качество жизнедеятельности населения, были выявлены основные их преимущества и недостатки. Недостатки приведенных методов состоят в том, что охватывая только воздействие природных или антропогенных факторов, они не учитывают всю гамму вопросов оказывающих влияние на качество и безопасность жизнедеятельности населения в городах.

Особенности существующих методов оценки качества городской среды:

1. Количественная оценка качества варианта проекта:

- частичная оценка отдельных, а не всех (основных) свойств проекта, не могла в конечном итоге ответить на вопрос о качестве проекта, а значит и будущего объекта;

- рассматривает отдельные направления частных факторов без взаимосвязи друг с другом;

- рассматривает различные критерии и характеристики проектов в качестве основополагающих;

- используется показатель интегрально-го качества – для отдельных объектов гра-

достроительства или направлений при комплексной оценке территории по пригодности для объектов градостроительства;

- обычно методика для объекта средней сложности разрабатывается коллективом в течение 2,5-3 месяцев при занятости отдельных специалистов от 1 дня до 3 недель. При таком подходе к оценке качества проекта требуются дополнительные затраты средств и времени;

- ведется оценка отдельных частей объектов, при отсутствии объектов градостроительства (микрорайонов, населённых мест и их систем).

2. Комплексная оценки территории будущего строительства:

- оценка производится по двум группам факторов – природным и антропогенным;

- используется трехбалльная система оценивания (благоприятная, ограниченно благоприятная и неблагоприятная);

- в качестве критериев приняты затраты, необходимые для приведения фактических натуральных показателей свойств оценочных факторов до уровня нормативных (функционирование на данной территории того или иного вида народнохозяйственной деятельности);

3. Использование показателя «индекс качества градостроительной среды»:

- для межрегионального сравнения и динамического анализа уровня городского развития на основе усредненной оценки показателей.

Количественная и качественная оценка уровня социального развития городов должна осуществляться не с помощью какого-то случайного набора показателей несопоставимого для разных однотипных городов, а системы параметров характеризующих как материально-техническую базу, так и ценности духовного, морального и психологического характера. Поэтому необходима разработка национальной методологии оценки КБЖДН, которая позволит определять социально-эколого-экономическую ситуацию в городах и регионах Украины, её место по отдельным классам благополучия во Всемирной или Европейской иерархии государств, а главное, определять объемы национальных программ по достижению соответствующих показателей КБЖДН.

Разрабатываемая методологи должна учитывать:

- комплексная оценка по всем направлениям жизнедеятельности человека в городе;

- в качестве основного критерия принято здоровье населения (большинство нормативов частных факторов приняты по нормативным документам или санитарно-гигиеническим нормам);

- интегральный показатель качества жизнедеятельности населения для всех основных сфер жизнедеятельности человека в городе (труд, быт, отдых на фоне природно-климатических и санитарно-гигиенических условий);

- методология оценки КБЖДН должна применяться на различных уровнях градостроительного проектирования;

- использоваться как для оценки существующего состояния КБЖДН в городе, так и для оценки проектов развития населенного пункта в будущем;

Отдельные факторы и их влияние на качество окружающей среды требуют специальных исследований и обоснований при разработке подобной национальной методологии по таким показателям как загазованность, шум, электромагнитные колебания и другие физические факторы и т. д. Были выделены два наиболее мощных и действенных фактора – уличный шум и атмосферное загрязнение.

Список литературы

1. Абракизов В.Э. Аналоговое моделирование процессов распространения звука на территории города / В.Э. Абракизов, С.В. Нестеренко // Автоматизированные системы управления и приборы автоматизации: Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник. – Х., 2002. – Вып. 121. – С. 87-94.
2. Азгальдов Г.Г. Квалиметрия в архитектурно-строительном проектировании. – М.: Стройиздат, 1989. – 264 с.
3. Басыйров А.М. Экология города: учебно-методическое руководство. – Казань: КФУ, 2013. – 96 с.
4. Баталин Б.С. Вред и польза шлаковых отвалов // Природа. – 2003. – № 10 (1058). – С. 27-32.
5. Безопасность жизнедеятельности: учебное пособие. Часть II / под ред. проф. Э.А. Арустамова. – М.: Информационно-внедренческий центр «Маркетинг», 1999. – 304 с.
6. Безопасность жизнедеятельности: учебн. пособие / [Я. А. Сериков, и др.]; Харьк. нац. акад. гор. хоз-ва. – Х.: ХНАГХ, 2010. – 347 с.
7. Бестужев-Лада И.В. О «качестве жизни» / И.В. Бестужев-Лада, Г.С. Батыгин // Информационно-справочный портал Library.ru. – Режим доступа: <http://www.library.ru/help/docs/n65217/1.pdf>.
8. Большеротов А.Л. Система оценки экологической безопасности строительства. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2010. – 216 с.
9. Вітрішак С.В. Забруднення атмосферного повітря викидами автотранспорту – реальна небезпека нації // Young Scientist. – 2014. – № 3 (06), march. – P. 125-126.
10. Вимірювання якості життя в Україні: Аналітична доповідь / [Е.М. Лібанова та ін.] – К., 2013. – 48 с.
11. Владимиров В.В. Расселение и экология. – М.: Стройиздат, 1996. – 391 с.
12. Влияние техногенных факторов на экологию: научная монография / [под ред. Д.В. Елисеева]. – Новосибирск: Издательство «СибАК», 2014. – 164 с.
13. Гилёв В.В. Метод экспресс-оценки урбанизированных территорий по фактору загазованности выхлопными газами автотранспорта / В.В. Гилёв, В.Н. Макарова, М.Ю. Трошин, В.С. Бахарев // Наука, техника и образование. – 2015. – № 10 (16). – С. 62-64.
14. Горшкова И.А. Анализ загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспортных средств в условиях сложившейся градостроительной ситуации в центральной части Санкт-Петербурга / И.А. Горшкова, О.Ю. Макарова // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – 2014. – Выпуск 4 (23). – С. 1-10. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru>
15. Градостроительные меры борьбы с шумом / [Г.Л. Осипов и др.]. – М.: Стройиздат, 1975. – 231 с.
16. Дашкевич Е.В. Оценка качества городской среды в Красноярске / Е.В. Дашкевич, В.И. Крушлинский // X Юбилейная Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященная 80-летию образования Красноярского края. – Режим доступа: conf.sfu-kras.ru/sites/mn2014/pdf/d03/s02/s02_001.pdf.
17. Запольский А.К. Основи екології: Підручник / А.К. Запольский, А.І. Салюк; за ред. К.М. Ситника. – К.: Вища шк., 2001. – 358 с.: іл.
18. Здоровье среды: методика оценки / [В.М. Захаров и др.]. – М.: Центр экологической политики России, 2000. – 68 с.
19. Зельцер Э. Градостроительные аспекты защиты от шума. – М.: Стройиздат, 1979. – 72 с.
20. Карагодина И.Л. Борьба с шумом в городах / И.Л. Карагодина, Г.Л. Осипов, И.А. Шишкин. – М.: Медицина, 1972. – 159 с.
21. Картавская В.М. Основы промышленной экологии. Оценка ущерба от выбросов загрязняющих веществ в атмосферу: учеб. пособие / В.М. Картавская, Т.В. Коваль. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2008. – 196 с.
22. Макаров А.Б. Техногенно-минеральные месторождения и их экологическая роль / А.Б. Макаров, А.Г. Талалай // Литосфера. – 2012. – № 1. – С. 172-176.
23. Макарова В.Н. Обеспечение экологической безопасности промышленного региона / В.Н. Макарова, В.В. Гилёв // Вісник Придніпровської державної академії академії та архітектури. – 2015. – № 4 (205). – С. 62-67.
24. Миколаш Я. Управление охраной окружающей среды: пер. со слов / Я. Миколаш, Л. Питтерман. – М.: Прогресс, 1983. – 239 с.
25. Набивач В.М. Основи загальної та хімічної екології: навч. посібник. – Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2011. – 244 с.
26. Овсянникова Т.Ю. Градостроительная среда как пространственно-материальная основа городского развития / Т.Ю. Овсянникова, М.Н. Преображенская // Вестник ТГАСУ. – 2014. – № 3. – С. 191-200.
27. Орлов Р.В. Оценка взвешенных частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$ в атмосферном воздухе жилых зон / Р.В. Орлов, А.Б. Стреляева, Н.С. Барикаева // Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – Вып. 12 (134). – С. 39-41.
28. Охрана труда в строительстве: учебник / [А.С. Беликов и др.]; под общ. ред. А.С. Беликова. – К.: Основа, 2014. – 592 с.
29. Половинкина Ю.С. Шумовое загрязнение окружающей среды урбанизированных территорий (на примере города Волгограда) // Научный журнал КубГАУ. – 2012. – № 76 (02). – С. 27-32.
30. Приказ Минрегиона России от 09.09.2013 № 371 «Об утверждении методики оценки качества городской среды проживания». – 55 с.
31. Савін Л.С. Розробка інноваційного теплоізоляційного матеріалу з залученням техногенних відходів: моногра-

- фія / Л.С. Савін, В.М. Макарова, Н.О. Ткач. – Дніпропетровськ: ПП Видавництво «Нова ідеологія», 2011. – 98 с.
32. Саньков П.Н. Актуальные аспекты обеспечения акустической безопасности населения в Украине // Международный научный журнал. – 2015. – № 5. – С. 43-46.
33. Самойлюк Е.П. Борьба с шумом в населенных пунктах / Е.П. Самойлюк, В.И. Денисенко, А.П. Пилипенко. – К.: Будивельник, 1981. – 144 с.
34. Самойлюк Е.П. Основы градостроительной акустики: учебное пособие для вузов в 3 ч. – Д.: ПГАСА, 1999. – 438 с.
35. Самойлюк Е.П. Оценка качества и безопасности жизнедеятельности жилой среды крупнейшего города, факторы шума и загазованности на примамгистральных территориях / Е.П. Самойлюк, В.В. Гилёв // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. трудов. – Вып. 21. – Днепропетровск: ПГАСА, 2002. – С. 34-39.
36. Сероштан М.В. Качество непродовольственных товаров: учебное пособие / М.В. Сероштан, Е.Н. Михеева. – М.: Издательский Дом «Дашков и К», 2000. – 164 с.
37. Справочник по защите от шума и вибрации жилых и общественных зданий / [В.И. Заборов и др.]; под ред. В.И. Заборова. – К.: Будивельник, 1989. – 160 с.: ил. – (Охрана окружающей среды).
38. Стаускас В.П. Градостроительная организация районов и центров отдыха. – Л.: Стройиздат, 1977. – 164 с.
39. Сташок О.В. Антропогенное загрязнение атмосферы города Братска // Системы. Методы. Технологии. – 2009. – № 3. – С. 113-115.
40. Устав (Конституция) Всемирной организации здравоохранения: основные документы, Дополнение, 2006. – Режим доступа: http://www.who.int/governance/eb/who_constitution_ru.pdf
41. Чистякова С.Б. Охрана окружающей среды: учебник для вузов спец. «Архитектура». – М.: Стройиздат, 1988. – 272 с.: ил.
42. Шаповалов А.Л. Оцінка якості життя населення регіонів України // Вестник ХНАДУ. – 2010. – Вып. 48. – С. 135-139.
43. Шепелев Н.П. Реконструкция городской застройки: учебник для строит. спец. вузов / Н.П. Шепелев, М.С. Шумилов. – М.: Высшая школа, 2000. – 271 с.
44. Экология города: учебник / под ред. Ф.В. Стольберга. – К.: Либра, 2000. – 464 с.
45. Экология и безопасность жизнедеятельности: учеб. пособие для вузов / [Д.А. Кривошеин и др.]; под ред. Л.А. Муравья. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2000. – 447 с.
46. Foraster Maria. High Blood Pressure and Long-Term Exposure to Indoor Noise and Air Pollution from Road Traffic / Maria Foraster, Nino Künzli, Inmaculada Aguilera // Environmental Health Perspectives. – 2014. – Vol. 122, № 11. – P. 1193-1200.
47. Monica S. Hammer. Environmental Noise Pollution in the United States: Developing an Effective Public Health Response / Monica S. Hammer, Tracy K. Swinburn, and Richard L. Neitzel // Environmental Health Perspectives. – 2014. – Vol. 122, № 2. – P. 115-119.

УДК 553.982

ЭНДОГЕННОЕ ОБРАЗОВАНИЕ НАФТИДОВ В СВЕТЕ АБИОГЕННОЙ ТЕОРИИ ОБРАЗОВАНИЯ НЕФТИ

Симонян Г.С.*Ереванский государственный университет, Ереван,
e-mail: Sim-gev@mail.ru*

В статье подробно анализируется несостоятельность биогенной теории образования нефти. Обсуждаются многочисленные теоретические и экспериментальные работы, в том числе последних лет, различных авторов, касающиеся теорий абиогенного образования нафтидов. Приведены уравнения химических реакций каждой гипотезы абиогенного образования нефти. Совместное образование руд и нафтидов в мантийных слоях Земли позволяет объяснить парагенезис нефти и углеводородных газов с точки зрения абиогенного происхождения. Показано, что нефть образуется в недрах Земли из глубинных мантийных флюидов и является возобновляемым ресурсом. Рассматриваются элементный химический состав и групповой состав, т.е. содержание в нефтях различных классов и групп соединений. Показано, что соотношение пяти главных элементов в нефти соответствует в среднем химической формуле « $\text{CH}_{1,76}\text{S}_{0,018}\text{O}_{0,009}\text{N}_{0,006}$ ».

Ключевые слова: нефть, генезис нефти, абиогенная нефть, азот, сера, никель, ванадий.

THE ENDOGENIC FORMATION OF NAPHTHIDES IN THE LIGHT OF ABIOTIC THEORY OF OIL FORMATION

Simonian G.S.*Yerevan State University, Yerevan, e-mail: Sim-gev@mail.ru*

The failure of the biogenic theory of oil formation is detailed analysis in article. Numerous theoretical and experimental works of different authors are discussed, including the works of the latest years, regarding the abiotic formation theories of naphthides. The equations of chemical reactions of each hypothesis of oil abiotic formation are given. The together formation of ores and naphthides in the mantle layers of Earth may us explain the paragenesis of oil and hydrocarbon gases in the light of abiotic genesis. It is shown oil forms from deep mantle fluids and is a renewable resource. The elemental chemical composition and group composition, i.e. the content of different classes and group-compounds in the oils are discussed. It is shown the ratio of five main elements in the oil It corresponds to an average chemical formula « $\text{CH}_{1,76}\text{S}_{0,018}\text{O}_{0,009}\text{N}_{0,006}$ ».

Keywords: oil, genesis of oil, abiotic oil, nitrogen, sulfur, nickel, vanadium.

Введение

Нефть относится к группе горных осадочных пород вместе с песками, глинами, известняками, каменной солью и др. Она обладает одним важным свойством – способностью гореть и выделять тепловую энергию. Среди других горючих ископаемых она имеет наивысшую теплотворную способность. Например, для подогрева котельной или другой установки требуется нефти значительно меньше по весу, чем каменного угля.

Нефть представляет собой смесь низко- и высокомолекулярных соединений, относящихся к различным гомологическим рядам. Низкомолекулярные соединения представляют собой, в основном, парафиновые, нафтено-парафиновые и ароматические углеводороды. Высокомолекулярная часть нефти состоит из высокомолекулярных парафиновых углеводородов, моно- и конденсированных нафтенопарафиновых, моно- и бициклических ароматических углеводородов ряда бензола и нафталина, смол и асфальтенов. Таким образом, нефть – это

сложная многокомпонентная смесь, которая в зависимости от внешних условий проявляет свойства молекулярного раствора или дисперсной системы. В составе нефти обнаружено свыше 1000 индивидуальных органических веществ, содержащих: углерод, водород, кислород, азот, серу и более 60 элементов [25,47,55].

Теории происхождения нефти

В настоящее время достаточно хорошо известно, как и в каких геологических условиях скапливается нефть. Вопрос же о происхождении нефти до сих пор окончательно не решен. Решение этого вопроса позволит облегчить поиск и разведку нефтяных месторождений, оценить их запасы, правильно организовать добычу и переработку.

Многочисленные теории о происхождении нефти делятся на две основные категории – органического (биогенного) и неорганического (абиогенного) происхождения [11,19,20,55,62].

Сторонники органической гипотезы считают, что источниками происхождения нефти были остатки растений и животных,

скопившихся в течение многих миллионов лет на дне водоемов в прошлые геологические эпохи в виде ила [11]. В случае органической концепции происхождения нефти предполагается существование определенных литологических толщ, богатых органическим веществом, преобразование которого дает начало нефтеобразующим углеводам.

Однако анализ фактического материала по геологическим разрезам нефтегазоносных районов различных стран мира не позволяет согласиться с этим утверждением. В частности, этому противоречит и тот факт, что нефтемещающими являются комплексы пород разных формаций (песчанистые, глинистые, карбонатные и другие) либо без органического вещества, либо с незначительным количеством его присутствия. В связи с этим любая попытка ограничить генезис и локализацию нефти с распространением пород какой-либо формации не подтверждается фактическим материалом.

Иногда нефтеносными являются аркозовые гравийники и дресва, образовавшиеся за счет перемива гранитов и гнейсов докембрия [19]. В персидском заливе отсутствует чехол осадочных пород, однако там сосредоточена половина мирового запаса нефти и газа [13]. С помощью геохимической биогенной модели можно объяснить лишь 5-7% запасов нефти в Саудовской Аравии.

В рамках биогенной теории не объясняется резкое уменьшение атомного соотношения C/H при переходе от нефтеобразующего органического вещества к нефти. Содержание углерода в нефтях колеблется в пределах 80-87%, а водорода в нефтях 10-14.5%. Из других элементов в нефтях чаще всего встречаются сера, кислород и азот. Содержание серы в нефтях достигает 0.03-8%, кислорода в нефтях 0.02-2%, а азота в нефтях не превышает 1% [47,55].

Простой математический расчёт показывает, что соотношение пяти главных элементов в нефти соответствует в среднем химической формуле « $\text{CH}_{1.76}\text{S}_{0.018}\text{O}_{0.009}\text{N}_{0.006}$ »:

$$\begin{aligned} \text{C} : \text{H} : \text{S} : \text{O} : \text{N} &= \frac{(80 + 87)}{(2 \times 12)} : \frac{(10.0 + 14.5)}{(2 \times 1)} : \frac{(0.03 + 8)}{(2 \times 32)} : \frac{(0.02 + 2)}{(2 \times 16)} : \frac{(0.03 + 1)}{(2 \times 14)} = \\ &= 6.96 : 12.25 : 0.125 : 0.063 : 0.041 = 1 : 1.76 : 0.018 : 0.009 : 0.006 \end{aligned}$$

В среднем около 18% массы организмов составляет углерод, 10-10.5% – водород, 70% – кислород, 0.05% – сера и 0.3% – азот [36].

Аналогичным расчетом получаем среднюю химическую формулу живого организма



или



Средняя химическая формула органического вещества в составе клеток микроорганизмов [56]:



Получается, что соотношения C/H при переходе от живого организма (C/H=0.7-0.8) и нефтеобразующего корегена (C/H=0.8-1) [65] к нефти (C/H=0.6) уменьшается. Уменьшение количества углерода и увеличение содержания водорода можно объяснить процессами катагенеза и термогенеза, в результате чего должно было скапливаться огромное количество сопутствующего углерода (на каждый килограмм нефти должно образоваться 500-700 г коксоподобного углерода). Однако, ни в нефтематеринской, ни в вмещающих породах не обнаруживается накопление образующего углерода. Большое количество кислорода в организмах можно объяснить тем, что кислород в биоматериале в основном находится в составе воды.

Содержание углерода в организмах на 1-2 порядка больше, чем азота, а в нефти – на три порядка. Количество серы в живом организме на три порядка меньше, чем углерода, а в нефти – на два порядка. В рамках биогенной теории происхождения нефти трудно объяснить, почему количество азота в биоматериале на порядок выше, чем серы, а содержание его в нефти на 2 порядка ниже. Маловероятно предполагать, что в процессе нефтеобразования одновременно протекают реакции «деазотирования» и «осернения».

Еще более затруднительно объяснить с позиций биогенной гипотезы парагенезис нефти и углеводородных газов с сероводородом, серой, сульфидами тяжелых метал-

лов и ископаемыми солями. Жизнь и соль – антагонисты. В соляных рассолах, из которых выпадает соль в соляных озерах, нет живых организмов, кроме рачков, живущих на поверхности воды. Уже одно это создает трудности для объяснения часто наблюдающегося совместного нахождения соли и нефти как в форме залежей, так и в форме незначительных проявлений нефти в соляных толщах независимо от структурных условий (Сибирская платформа, Рейнский грабен [20], Аван в Армении [16] и др.). Массовые сингенетические включения нефти и находящиеся под очень большим давлением нефтяных газов в каменные и калийные соли позиции органической теории совершенно необъяснимы. Естественно подчеркнуть, что с точки зрения глубинного происхождения ископаемых солей и нефти, этот парагенезис является вполне закономерным следствием общности происхождения газа, нефти и соли. Известны случаи возобновления запасов нефти на давно эксплуатируемых нефтегазовых месторождениях, а потом заброшенных в 40-50-е годы прошлого века, например, в Татарии, Чечне [7]. Когда нефть была открыта в Татарстане, ее запасы оценили в 709 млн. тонн для всей осадочной толщи. Однако, на сегодняшний день в Татарстане уже добыто почти в четыре раза больше нефти, чем было предсказано [7]. И заканчиваться татарская нефть не собирается в обозримом будущем. Биогенная теория не объясняет, каким образом и откуда в нефть попадают металлы и их соединения, в частности *VO*- и *Ni*-порфирины [44]. Согласно биогенной теории, металлопорфирины никеля и ванадия образовались в нефтях в процессе многоступенчатого замещения меди в ее комплексах и железа, и магния в гемах, и производных хлорофилла. Однако жизненно важные металлопорфирины, в том числе гемоглобин, как и хлорофилл, в составе нефти никогда не были обнаружены. Порфирины могут быть абиогенного происхождения: они синтезируются в соответствующих условиях и присутствуют в мантийных ксенолитах, а также входят в состав метеоритов.

Многочисленные факты парагенезиса нафтидов и различных металлов однозначно отвергают осадочно-миграционную биогенную гипотезу. Почти все химические элементы, присутствующие в нефти, есть и в ультраосновной магме и карбонатных породах.

Параллельно с образованием нефти образуются также руды ванадия [44,46,48], что объясняется тем, что наряду с метаном, аммиаком, сероводородом, серой и азотом ванадий также присутствует в мантийных флюидах [23]. Ванадий занимает первое место среди присутствующих в нефти металлов. Вместе с *Ni* он находится в количестве до $10^{-1}\%$, за ними на третьем месте находится *Fe* ($10^{-2}\%$) [10]. Отношение *V/Ni* является одним из основных параметров микроэлементного состава нефтей. Нефти резко различаются по величине *V/Ni*. Выделяют ванадиевые ($V > Ni > Fe$) или железистые ($Fe > V > Ni$) ($V > Ni$) и никелевые ($Ni > Fe > V$) или ($Fe > Ni > V$) типы нефтей. Никелевые – легкие с низким содержанием серы, смол и асфальтенов и азотистыми и залегают на больших глубинах, а ванадиевые нефти являются тяжелыми, высокосмолистыми, сернистыми и низкоазотистыми [23,24,49,50]. Около 25%-ов нефтей относится к тяжелым нефтям [55]. С целью типизации тяжелых ванадиевых нефтей в работе [39] было проанализировано около 200 проб нефтей разных нефтегазоносных провинций. Наиболее информативными оказались выявленные связи между содержаниями ванадия и серы. Выделяется пять типов ванадиеносных нефтей.

I тип характеризуется отношением:

$$C_v/C_s = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ и } C_s = 2-6\%.$$

II тип

$$C_v/C_s = (4-5) \cdot 10^{-3} \text{ и } C_s = 2-5\%.$$

III тип

$$C_v/C_s = (5-8) \cdot 10^{-3} \text{ и } C_s = (1,5-2)\%.$$

IV тип ванадиеносных нефтей

$$\text{с } C_v/C_s \text{ выше } 8 \cdot 10^{-1} \text{ и } C_s = 2-5\%.$$

Нефти различного происхождения с $C_v < 40$ г/т и $C_s < 1,3\%$ образуют V тип.

Если содержание ванадия превышает содержание никеля в нефти ($V/Ni > 1$), то нефтегазоносный бассейн относится к ванадиевому типу, если содержание ванадия меньше содержания никеля в нефти ($V/Ni < 1$), то нефтегазоносный бассейн относится к никелевому типу. Нефтегазоносными бассейнами России и прилегающих территорий с доминированием никелевых соединений являются Анадырско-Наваринский ($V/Ni=0,67$), Пенжинский ($V/Ni=0,23$) и Тимано-Печорский ($V/Ni=0,48$). Для нефтега-

зоносных бассейнов Балтийский ($V/Ni=2,37$), Волго-Уральский ($V/Ni=2,96$), Западно-Сибирский ($V/Ni=1,50$), Лено-Тунгусский ($V/Ni=2,66$), Охотский ($V/Ni=2,59$), Прикаспийский ($V/Ni=1,27$) и Северо-Кавказский ($V/Ni=1,19$) характерны высокие концентрации ванадия, а бассейны относятся к ванадиевому типу [67,68]. В нефти в свите Офисина в пределах Восточно-Венесуэльского бассейна среднее содержание ванадия и никеля составляет соответственно 335 и 80 г/т. В девонских нефтях Альберты в Канаде ванадий содержится в среднем количестве 13,6 г/т. В нефтях Иллинойса ванадия 0,35-1,5 г/т, а в арабских – 9,52-51 г/т. Зольный остаток нефтей из месторождений на западе США содержит 5-50% ванадия. Максимальное содержание ванадия в нефти – бкг/т. Обогащенные V, Ni тяжелые нефти Венесуэльской провинции тяготеют на севере к рудному поясу Анд, где развиты гидротермальные месторождения ванадиевых и никелевых руд. В пределах Уральского рудного пояса нефти содержат до 569 г/т ванадия, а твердые битумы содержат ванадий до 1230 г/т и никель до 1200 г/т. Ванадий присутствует почти во всех месторождениях нефти Западного Казахстана. В Бузачинской нефти содержится ванадий до 300 г/т, а в Акбулакской нефти до 400 г/т [33,42]. Основная форма нахождения ванадия в нефтях Западного Казахстана – четырехвалентная, в виде ванадил-иона [33,57]. Соотношение концентраций V и Ni в нефтях Западного Казахстана близко к таковому в Волго-Уральской провинции, а также Ирана, Кувейта, Анголы, Колумбии, Эквадора и Калифорнии. Закономерная связь V и Ni в нефтях из районов, удаленных друг от друга на тысячи километров и находящихся в различных географических и климатических условиях, говорит о том, что эти металлы и метан, а также другие углеводороды имеют мантийное происхождение. Исходя из концепции о мантийном происхождении нефти, присутствие в ней металлов, прежде всего V и Ni может быть объяснено их наличием наряду с метаном, аммиаком, H_2S , S и N в мантийных флюидах [12,23].

Академик Н.А. Шило [63], изучая многочисленные золоторудные месторождения, например, Витватерсранд Южной Африки, Мурунтау в Узбекистане, на глубине 4005-4300 м в гранитоидном массиве, показывает факт совместного нахождения золота и нафтидов. Так, в золотых рудниках Витватерс-

ранд откачивают до 500 миллионов кубометров углеводородных газов в год.

Высокотемпературные флюиды метаморфизуют породы, через которые проходят, и испытывают фазовые превращения. При понижении температуры образуются нефтегазовые и рудные залежи, рудные компоненты при этом могут переноситься как с жидкой, так и газовой фазой. Примерами образования нефтегазовых месторождений, месторождений золота и других металлов в преддуговых бассейнах может служить залив Кука на Аляске, Гуаякильский в Эквадоре [51]. Известны примеры образования руд в мощных (3-10 км) осадочных толщах, связанные с проникновением высокотемпературных (180-360°C) флюидов по глубинным разломам при отсутствии проявлений магматизма [26]. Надо думать, что указанный механизм массопереноса является причиной того, что в нефтяных залежах находят такие компоненты, как ртуть, редкоземельные элементы, золото, серебро, многие другие компоненты руд. Появление этих веществ в нефтяных залежах лишь отдельное звено в рассматриваемом процессе, они проникают в качестве дополнительных, более глубинных компонентов.

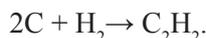
При исследовании геохимии ртути сначала была установлена ртутоносность ряда рудных месторождений различного состава и определена их приуроченность к глубинным разломам мантийного заложения. Были обнаружены ртуть-содержащие газовые и газонефтяные месторождения, которые так же, как и рудные, были приурочены к зонам глубинных разломов. Появление ртути в газах рассматривается как следствие ртутной дегазации Земли – углеводородная ветвь ртутной дегазации. Установлен новый генетический тип ртутных месторождений – ртутно-углеводородный, общим для которых является локализация в узлах пересечения глубинных разломов и приуроченность к ртутным поясам. При высоких концентрациях ртути в газах и нефтях на этих месторождениях обычно производится попутное извлечение ртути. Выделены ртуторудные пояса нового типа – по ртуть-содержащим месторождениям различного вещественного состава (рудно-газонефтяным), которые приурочены к линейным структурам планетарного масштаба [37]. На основании выше изложенного можно заключить, что совместное образование руд и нафтидов в мантийных слоях Земли позволяет объяс-

нить парагенезис нефти и углеводородных газов с точки зрения абиогенного происхождения.

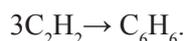
Абиогенная теория образования нефти

Впервые теория абиогенного происхождения нефти предложена в 1805 году немецким естествоиспытателем Александром Гумбольдом. Он высказал предположение, что нефть образуется на больших глубинах в магматических породах. Гумбольд наблюдал, как нефть сочилась из таких пород в Южной Америке, Венесуэле.

В 1866 году французский химик Марселен Бертло высказал предположение, что нефть образовалась в недрах Земли из минеральных веществ. После долгих поисков Бертло удалось синтезировать ацетилен из углерода и водорода в условиях высокой температуры вольтовой дуги:

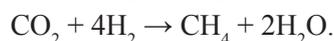
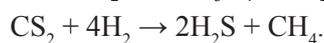
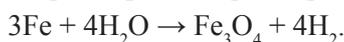
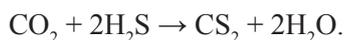


Он обнаружил, что газ ацетилен (ненасыщенный углеводород – C_2H_2) при низких температурах может переходить в тяжёлые углеводороды. В подтверждение своей теории он провел несколько экспериментов, искусственно синтезировав углеводороды из неорганических веществ. Синтез ацетилена и получение при его пиролизе бензола, а также других ароматических углеводородов (например, стирола, нафталина) стали экспериментальным обоснованием ацетиленовой теории Бертло:

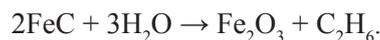
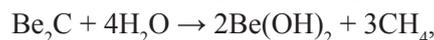
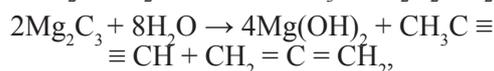
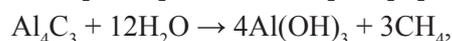
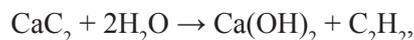


На этом основании он сделал вывод о том, что так образовались углеводородные соединения метеоритов и что, по-видимому, подобное происхождение имеют углеводороды на других планетах.

Французский химик Г. Биассон в 1871 году высказал идею о происхождении нефти путем взаимодействия воды, CO_2 и H_2S с раскаленным железом. Эксперименты по неорганическому синтезу углеводородов, проведенные этими исследователями, в значительной степени способствовали развитию гипотезы минерального происхождения нефти:

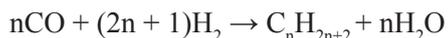


В 1877 г. на заседании Русского химического общества с изложением «минеральной» (карбидной) гипотезы происхождения нефти выступил Дмитрий Иванович Менделеев. Опираясь на конкретные геологические и химические факты, Менделеев писал: «...Образование нефти... более вероятно приписать действию воды, проникающей через трещины, образовавшиеся при подъеме гор, в глубь земли, до того металлогенного накаливания ядра земли, которое необходимо признать во внутренности земной...» [28]. По его мнению, вода проникала вглубь земли по трещинам в осадочных и кристаллических породах до магмы, где реагировала с карбидами тяжелых металлов, образуя углеводороды:



В 1892 г. русский учёный Соколов В.Д. предложил так называемую, «космическую» гипотезу [52], согласно которой углеводороды нефти образованы из углерода и водорода в эпоху формирования Земли и других планет. По мере охлаждения Земли углеводороды поглощались ею и конденсировались в земной коре. Впоследствии, когда образовалась земная кора, из магмы выделялись углеводороды, которые по трещинам в земной коре поднимались в верхние части, сгущались и там образовали скопления. В доказательство своей теории Соколов приводил факты обнаружения углеводородов в метеоритах.

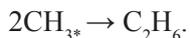
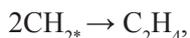
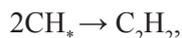
В наше время выдвинут целый ряд других гипотез о неорганическом происхождении нефти и газа в недрах Земли в результате химических реакций непосредственно из углерода и водорода в условиях высоких температур, давлений и каталитического действия оксидов металлов (Fe, Ni и др.). В основном все гипотезы неорганического происхождения нефти и газа базируются на следующих основных положениях: синтез углеводородов возможен на основе оксидов углерода и водорода, которые в тех или иных количествах присутствуют во флюидах, поступающих из недр земли:



в процессе Фишера-Тропша среди побочных продуктов образуется CO_2 . Степень протекания побочных реакций существенно зависит от природы катализатора и температуры процесса.

В середине XX века трудами выдающихся советских и российских ученых, таких как Н.А. Кудрявцев, В.Б. Порфирьев, А.А. Воробьев, Г.Н. Доленко, П.Н. Кропоткин, Б.М. Валяев, Э.Б. Чекальюк, В.С. Зубков, А.А. Маракушев, А.И. Тимурзиеви других возрождаются различные гипотезы абиогенного (космического, вулканического и магматогенного) происхождения нефти.

Николай Александрович Кудрявцев выдвинул магматическую гипотезу образования нефти [20]. В мантии Земли – в условиях очень высокой температуры углерод и водород образуют углеводородные радикалы – CH , CH_2 и CH_3 . По мере понижения температуры в верхних слоях эти радикалы соединяются друг с другом и с водородом.



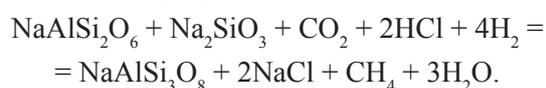
Но Кудрявцев обходит стороной вопрос, откуда, собственно, берется в этих радикалах водород. А.А. Воробьев выдвинул предположение, что в развитии нашей планеты немалую роль играли именно электрические процессы [6]. В результате сильных электрических разрядов возникают частицы плазмы, которые обладают высокой химической активностью. Это обстоятельство, в свою очередь, создает предпосылки для протекания таких реакций, которые невозможны при обычных условиях. По мнению Воробьева, метан при воздействии подземного электрического разряда может подвергнуться частичному дегидрированию, образуются свободные углеводородные радикалы – CH , CH_2 и CH_3 .

В середине 60-х годов Э.Б. Чекальюком выдвинута гипотеза о существовании тяжелых углеводородов в осадочном слое земной коры – в верхней мантии [62]. В результате экспериментальных исследований и в рамках термодинамической модели систем C-H , C-H-O обоснована возможность термодинамически равновесного существования тяжелых углеводородов в условиях верхней мантии. Исследования В.С. Зубко-

ва показали, что в условиях высоких температур и давлений метан не устойчив и молекулярный вес термодинамически равновесных углеводородов увеличивается с ростом давления и температуры [12-15]. С понижением температуры и давления происходит распад тяжелых углеводородов. Во флюиде при мольном соотношении $\text{H/C} < 4$ из газовой фазы выпадает твердый углерод – алмаз или графит по схеме:

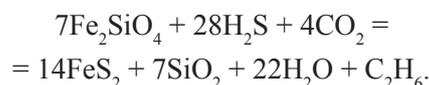


Александр Александрович Маракушев показал, что залежи солей и нефти в осадочных депрессиях пассивных континентальных окраин порождаются глубинными магматическими очагами на щелочной стадии их развития [26].



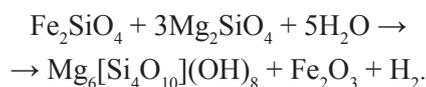
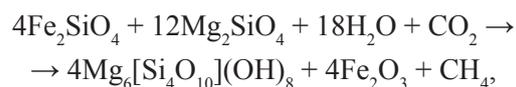
Естественно подчеркнуть, что с точки зрения глубинного происхождения ископаемых солей и нефти, этот парагенезис является вполне закономерным следствием общности происхождения газа, нефти и соли.

Показано, что Fe_2SiO_4 подвергается флюидной сульфуризации с генерацией сульфидных расплавов. Вовлечение в этот процесс оксидов углерода (CO_2 , CO) порождает углеводороды:



Подобными процессами определяется наблюдаемая пространственная связь углеводородов и сульфидных руд. Ими вносится существенный вклад в углеводородную специализацию депрессионных структур срединно-океанических хребтов [27].

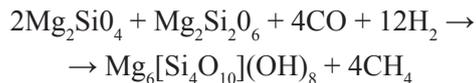
Химическая основа для абиогенных процессов нефти – серпентинизация из перидотитов, начиная с метаногенеза с помощью гидролиза оливина в серпентин в присутствии двуокиси углерода. Оливин состоит из форстерита и фаялита. В отсутствие двуокиси углерода образуется водород [53]:



Может образовываться также магнетит и магнезит.

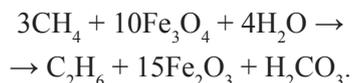
Скорость образования метана и водорода в океанической коре – до 10 млн т/год.

В работе [66] показано, что начало формирования офиолитового диапира связано с мантийной серпентинизацией дунит-гарцбургитовых ультрабазитов в восстановительных условиях в результате образования анионов (ОН) за счёт окиси углерода и водорода при участии никелиевого катализатора по схеме:



Образование антигорита с мельчайшими включениями (2-4 мкм) тэнита в условиях мантийной серпентинизации на глубинах 40-50 км подтверждено экспериментальными, термодинамическими данными (Т=450-600°C, Р=13-16 кбар). В изученных серпентинах обнаружены H_2 , CH_4 .

Превращения метана в высшие n-алканы через дегидрирование метана в присутствии катализатора на основе переходного металла (например, Fe, Ni). Это можно назвать шпинель гидролизом. Магнетит, хромит и илтменит являются Fe-шпинель группа минералов, найденных во многих породах. Высокие концентрации магматических магнетита, хромита и ильменита обеспечивают абиотический крекинг метана в высшие углеводороды в гидротермальных условиях:

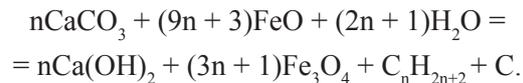


Можно заключить, что эти углеводороды, взаимодействуя при каталитической активности тонкодисперсных серпентинитов и железо-никелевых соединений (тэнит, пентландит, магнетиты), в условиях постоянно повышенных температур (Т>350°C) вследствие стадийного магматизма формировали все групповые компоненты нефти [66].

Следует отметить, что Арутюняном А.В. также принимается механизм дегидратации серпентинизированных ультрабазитовых серпентинитов на различных глубинах земной коры, вследствие которого происходит выделение геофлюидов, в том числе водородо- и углеродосодержащие. Этим механизмом автор объясняет и образование нефти в недрах Армении, отмечая, что в Армении нефть надо искать на глубинах приблизительно 10 км [4].

В работах [2,21] показано, что в мантийных условиях из FeO (вюстита), CaCO_3

(кальцита) и вода наряду с углеродом обнаруживаются также углеводороды, по реакции:

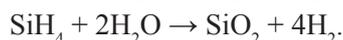
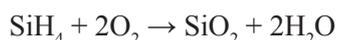


Автор работы [22], опираясь на космическую гипотезу В.Д. Соколова, предполагает, что источником углеводородов (нефти и газа) на Земле является органическое вещество космического происхождения, поступившее на Землю вместе с другим минеральным веществом из протопланетного газопылевого облака. Суть и причины формирования нефтяных и газовых месторождений и образования месторождений рудных полезных ископаемых одни и те же, это переход рудного вещества от рассеянного состояния к концентрированному в некотором ограниченном объеме разуплотненных пород.

Дмитрий Николаевич Тимофеев предполагает, что в нижней мантии от тепла ядра Земли, в результате распада карбидов, нитридов, гидридов и оксидов образуются газообразные соединения NO , N_2O , N_2O_4 , N_2O_5 , HCN , O_3 , N_2H_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , HN_3 . При поднятии этих газообразных соединений, давление в них снижается, газы расширяются, из-за этого охлаждаются, и в условиях астеносферы по термодинамическим характеристикам элементы этих газов наиболее стабильны в виде соединений с большим молекулярным весом, которые получили название «нитронефть». В мантии также синтезируются металлоорганические соединения, органосилоксаны, карбонилы, которые растворяются в нитронефти. В нитронефти присутствуют неперелеченные углеводороды, перекиси, амины, гидразин, озон и нитропарафины (нитрометан, гексанитроэтан и т.д.), нитроароматические соединения (тринитротолуол, гексанитробензол и т.д.), нитроамины (гексоген- $\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6\text{O}_6$, октоген- $\text{C}_4\text{H}_8\text{N}_8\text{O}_8$), карбонилы $\text{Fe}(\text{CO})_5$, $\text{Ni}(\text{CO})_4$, металлоорганические соединения, кремнеорганические соединения (органосилоксаны), сера, SO_3 .

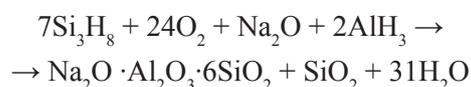
При поднятии нитронефти до глубин менее 10 км, нитронефть разлагается с образованием нефти, воды, N_2 , CO_2 рудных образований, гипсов и известняков. В случае избытка водорода в составе нитронефти происходит образование природного газа. При избытке кислорода нитронефть разлагается без образования углеводородов [58].

В работе [59] Д.Н. Тимофеев предлагает новую концепцию наличия в глубинах Земли подвижного вещества, основа которого – смесь различных соединений кремния с водородом – силанов (аналогов углеводородов) которому даётся название «силановая нефть». Как у метана, у силана есть ряд гомологов Si_2H_6 , Si_3H_8 , Si_4H_{10} , Si_5H_{12} , Si_6H_{14} ... Он образует и неопределённые соединения. Нахождение углерода в глубинах Земли в стабильном состоянии метана диктуется его термодинамическими характеристиками. По этим же законам в глубинах Земли кремний находится в состоянии силана. Большое положительное значение изобарного потенциала силана однозначно показывает на нахождение кремния в состоянии гидридов в мантии Земли, где температура высокая. На поверхности Земли силаны находятся не могут, поскольку самовозгораются или взрываются в контакте с атмосферой, а также реагируют с водой по реакциям:



Это отличает их от углеводородов, которые разлагаются медленно. Алюминий и железо могут взаимодействовать с поднимающимися веществами в геосферах мантии Земли с образованием подвижных соединений гидридов AlH_3 , FeH_3 или силинов, например, трисилина алюминия $\text{Al}(\text{SiH}_3)_3$ и трисилина железа $\text{Fe}(\text{SiH}_3)_3$. В поднимающемся подвижном веществе есть кислород, вероятно в свободном состоянии, в виде озона. Остальные, в том числе тяжелые элементы V, Cr, Ni, Pb, W, Pt, Hg, U ..., содержатся в подвижной фазе в малых количествах, в концентрациях, отражающих растворимость их в этих условиях. Смесь различных гомологов силана с подвижными соединениями алюминия и железа, кислородом, а также небольшим количеством соединений других элементов называется «Силановой нефтью». Показывается, что силановая нефть образуется путём экстракции ряда элементов Si, Al, Fe из геосфер мантии газами, исходящими при разрушении пород теплом ядра Земли. Дано объяснение происхождению корней материков и деплетированной мантии под океанами. Показано, что землетрясения в зоне Заварицкого, Беньофа происходят по причине взрывов здесь скоплений силановой нефти. Происходит быстрое поднятие силановой нефти и переход её в нестабильное состояние в

результате расходования кремния и выпадения SiO_2 при окислении силана, в оставшейся подвижной фазе увеличивается процентное содержание соединений углерода, в остатке получается нитронефть, имеющая большое содержание нитрованных углеводородов и некоторое количество остаточных силанов. Разложение нитронефти и силановой нефти происходит с выделением значительной энергии, что приводит к разогреву до высокой температуры окружающих пород из лёгких элементов Na, K, Ca, Mg. Породы лёгких элементов взаимодействуют с соединениями нитронефти и силановой нефти с образованием, при быстром разложении, расплавленных силикатных пород (магмы), например по реакции

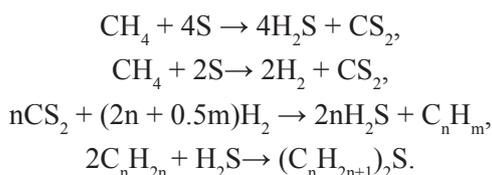


В ходе реакций образуется так же вода, CO, CO₂, N₂ которые при расширении в горячих пространствах магматических очагов вызывают землетрясения или, при прорыве на поверхность, вулканические проявления.

При разложении силановой нефти, сопровождающемся образованием силикатных пород, оставшаяся небольшая часть подвижной фракции, нитронефть накапливается в виде залежей на глубинах, примерно 5-30 км. Количество силановой нефти, поднявшейся и образовавшей силикатную кору Земли, примерно на два порядка больше, чем количество нитронефти, из которой образовались в коре соединения углерода.

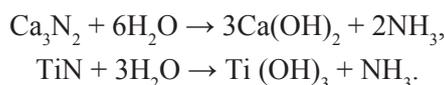
Нитронефть может со временем ближе просачиваться к поверхности Земли и разлагаться, образуя залежи углеводородов. Кроме углеводородов, при разложении нитронефти образуются карбонаты, азот, вода, углекислый газ и рудные залежи. Учитывая, что за время существования Земли на поверхность поднялось примерно 0,25·10²¹ кг углерода, количество нитронефти, поднимающейся из глубины к коре Земли, за год составляет около 55 миллионов тонн.

Михаил Абрамович Лурье и Федор Карлович Шмидт утверждают, что сера принимает участие в образовании нефти уже на начальных стадиях нефтегенеза, согласуется с данными о ее наличии в глубинных флюидах в виде H₂S и S [23,24]. Показано, что взаимодействие CH₄ с S при мантийных условиях приводит к образованию различных S-содержащих соединений и более высокомолекулярных углеводородов:



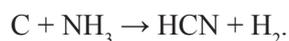
Геворгом Саркисовичем Симоняном установлено, что уже на ранних стадиях образования абиогенной нефти пары $N-Ni$ и $S-V$ выполняют системообразующую функцию [41,44,45].

Принимается, что азот, являясь одним из основных компонентов нефти, принимает участие в образовании нефти во всех стадиях нефтегенеза [40-50]. Так, по расчетам Сорохтина [53] в мантии количество азота приблизительно $4,07 \cdot 10^{21}$ г. В мантийных условиях возможны существования некоторых нитридов. Так, нитрид Fe образуется из смеси Fe и N при более 1700°C и 520 кбар [69], TiN в виде порошка, устойчив до 1300°C и 77 кбар [3]. Вода, проникая в глубь земли по трещинам в осадочных и кристаллических породах до магмы, реагирует с нитридами тяжелых металлов, образует аммиак:

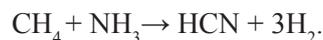


Термодинамическое моделирование эволюции системы $C-H-N-O$ [12-15] показало, что азот в PT -условиях нижней мантии становится одним из самых химически активных элементов. В составе мантийного газа относительно много N -содержащих углеводородов (дициан и дицианацетилен). В составе флюида, кроме N_2 , содержится значительное количество NH_3 . В последнее время на основе экспериментальных материалов вскрыта важная особенность летучих соединений H, C, N, O в продуктах плавления ранней мантии Земли – в силикатных расплавах [17, 18]. Так, в работе [18] показано, что при закалке алюмосиликатного расплава ($NaAlSi_3O_8$ 80 вес.%) + металлическая фаза $Fe(FeO$ 20 вес.%) + $H+C+N$ с добавлением азота (Si_3N_4 1, 3, 5, 7 вес.%), при высоком давлении, температуры и низких значениях химического потенциала кислорода образуются силикатные стекла с высокой концентрацией CH_4, H_2, NH_3, N_2 .

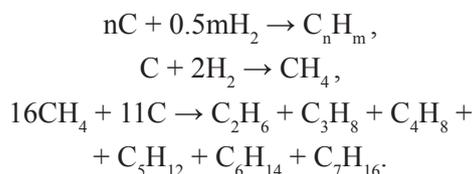
При 1000°C аммиак реагирует с углём, образуя синильную кислоту HCN и частично разлагаясь на азот и водород:



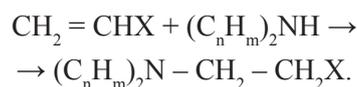
Непосредственное образование цианистого водорода из метана и аммиака основано на эндотермической реакции:



УВ могут синтезироваться и прямым взаимодействием углерода с водородом по реакции:

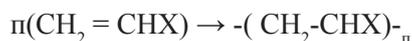


Как уже показано, в мантийных условиях возможно образование радикалов и бирадикалов (CH_3, NH_2, CH_2, NH). Взаимодействия образующихся радикалов с метаном и аммиаком приводят к получению алкиламинов, которые взаимодействуют с олефинами.

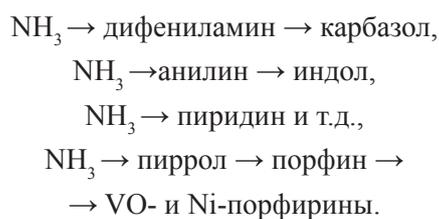


Этой реакцией объясняется отсутствие олефинов в подавляющем большинстве нефти.

Следует отметить, что в присутствии алкиламинов с пероксидами происходит полимеризация алкенов, с образованием высокомолекулярных веществ.



Из газообразных мантийных флюидов получают почти все азотистые соединения, входящие в состав нефти [35]:



Порфирины – самые распространенные пигменты в природе. К ним относятся гемоглобины, хлорофиллы, цитохромы и другие ферменты, они также присутствуют в выделениях животных, оперении птиц, раковинах моллюсков, нефти. Порфирины обнаружены не только в нефтях, но и в метеоритах осадочных (изверженных) горных породах, минералах эндогенного происхождения, а также в асфальтах, углях, торфе, сланцах, карбонатах, глубинных водах и т.д.

В молекуле любого порфирина имеется кольцо, которое составлено из четырех пир-

рольных фрагментов, которые соединены метиновыми мостиками в единую циклическую сопряженную систему, в основе которой лежит 16-членный макроцикл, включающий 4 атома азота (рис. 1). Родоначальник и простейший представитель порфиринов – порфин. В качестве заместителя могут выступать радикалы предельных и непредельных углеводородов, кислот, сложных эфиров, альдегидов, ароматических соединений т.д. Эти порфирины называются свободными порфириновыми основаниями и в природе встречаются довольно редко [1,5].

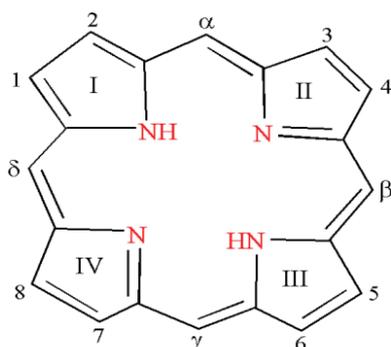


Рис. 1. Структурная формула порфина:
I-IV – пиррольные кольца в ядре порфина,
1-8 – атомы углерода ядра,
 α, β, γ и δ – атомы метиновых мостиков,
соединяющих пиррольные кольца

В природе порфирины находятся в виде металлокомплексов, образующихся при замещении иминовых водородов металлом. Например, белковые молекулы, включающие комплексы порфирина с магнием, – это зеленый пигмент хлорофилл, без которого был бы невозможен фотосинтез; комплексы порфирина с двухвалентным железом – гемоглобины, обеспечивающие ткани кислородом [5]. Комплекс порфирина с никелем – ключевая часть кофермента F430, играющего важную роль в метаболизме метана у бактерий [54]. Производные порфирина, содержащие кобальт, – витамин B_{12} , недостатка которого может спровоцировать анемию, нарушение функции мозга и нервной системы [1]. Единственный из известных порфиринов живых организмов, содержащий медь, это ярко-красный пигмент турацин, обнаруженный только в перьях экзотической африканской птицы турако.

Основными факторами, определяющими набор металлокомплексов геопорфиринов, являются, во-первых, количество и химические свойства металлов и, во-вторых,

термодинамическая и кинематическая стабильность отдельных металлопорфиринов в геологических условиях. Так, в восстановительных условиях нефтеобразования возможно наличие в этих условиях катионов кобальта, скандия, марганца, цинка, железа, ванадия и никеля [1,5,44,45]. Из этих металлов наименьшим радиусом характеризуются катионы никеля и ванадия и, вследствие этого, они легко внедряются внутрь порфиринового макроцикла нефти. Катионы никеля и ванадия обладают наивысшей энергией стабилизации лигандов в плоскоквадратных и октаэдрических системах и наиболее благоприятными электронными конфигурациями для комплексообразования с тетрапирролами. То есть образование металлокомплексов порфиринов с никелем и ванадием выгодно с энергетической точки зрения [5].

В природных нефтях преобладают металлоэтиопорфирины и металло дезоксофиллоэритроэтиопорфирины, содержащие изоциклическое кольцо, и с Ni^{2+} и $-VO^{2+}$ (рис. 2) в центре порфиринового ядра.

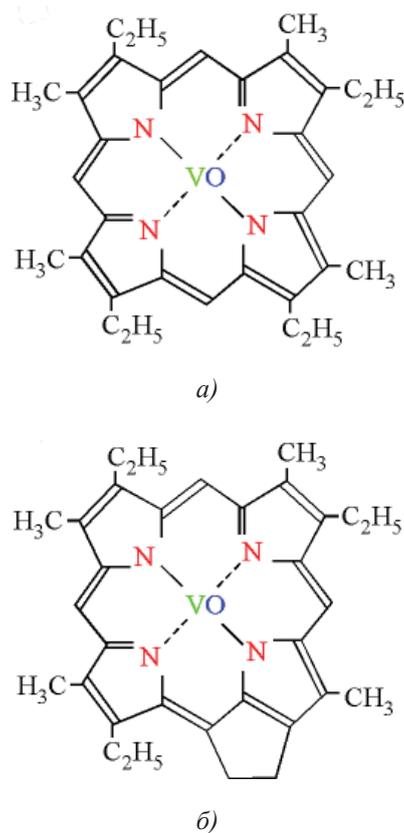


Рис. 2. Структурные формулы:
а – этиопорфирина ванадия,
б – дезоксофиллоэритропорфирина ванадия

Металлопорфириновые комплексы присутствуют в природных битумах в количестве до 1 мг/100 г, а в высоковязких нефтях – до 20 мг/100 г нефти; установлено, что 40% ванадилпорфиринов сосредоточено в дисперсных частицах, а оставшаяся их часть (и никель-порфирины тоже) содержится в дисперсной среде. Кстати, оба вида металлопорфиринов в составе асфальтенов вносят значительный вклад в поверхностную активность нефтей. Всернистых нефтях больше порфиринов в виде ванадиевого комплекса, а в малосернистых и особенно богатых азотом нефтях преобладают никелевые комплексы. Их концентрации одного порядка. Около 5-10% порфиринов нефти более конденсированные по отношению к алкилпорфиринам. Этим соединениям приписаны структуры бициклоалканопорфиринов, бензопорфиринов, циклоалканомонобензопорфиринов.

Следует особо отметить, что среди порфиринов биологического происхождения соединения с такими структурными особенностями не обнаружены. Металлопорфирины, имеющие в основе все пять перечисленных структур, представлены внефти в виде непрерывных изобарических серий. Начальные их члены содержат обычно 5-7 алкильных атомов углерода в боковых заместителях порфинного цикла, конечные – до 25-30. Максимальное содержание в каждом ряду приходится обычно на гомологи с 10-13 алкильными углеродными атомами [10].

Порфириновые комплексы нефти обладают каталитической активностью. Они играют определенную роль в процессе генезиса нефти. Данные металлы, *N* и *S* как в свободном состоянии, так и в составе различных соединений, обладают ярко выраженной каталитической активностью в различных реакциях. По количеству степеней окисления *V* напоминает азот. Известны соединения ванадия с +2, +3, +4 и +5 степенями окисления. Ванадий обладает способностью растворять водород, при этом образовывать гидрид с -3 степенью окисления. Соединения ванадия в степенях окисления +2 и +3 – сильные восстановители, в степени окисления +5 проявляют свойства окислителей [34]. В работе [29] было показано, что V_2O_5 , нанесенный на непористый стекловолокнистый носитель, обладает высокой каталитической активностью в температурном интервале 170-200°C, при окислении сероводорода до серы. Активность ванадиевых

катализаторов растет с ростом содержания V_2O_5 . Этим можно объяснить, что ванадиевые нефти являются тяжелыми и сернистыми. Интересно, что пары *Ni-N* и *V-S* по своим каталитическим свойствам являются своего рода антагонистами. В составе углеводородной системы их действия должны иметь разнонаправленный характер. *Ni* в свободном и связанном состояниях является катализатором гидрирующим агентом, а *N* и NH_3 – восстановительными агентами. В работе [30] установлено, что ванадилпорфириновые комплексы, синтезированные на основе нефтяных металлопорфириновых концентратов, стимулируют эпоксицирование в процессе окисления олефинов. Показано, что выходы полученных оксидов в зависимости от строения олефинов составляют 38-75%. Предложен механизм эпоксицирования при окислении олефинов в присутствии ванадилпорфириновых комплексов, допускающий образование протонированного дикислородного адукта, в качестве промежуточного комплекса. В работе [31] показано, что в присутствии каталитической системы никельпорфириновый комплекс и бутиллития активно идет димеризация 1-бутена.

Никелопорфирины участвуют в образовании метана и других углеводородов, а также они играют определенную роль в реакциях диспропорционирования водорода в процессе генезиса нефти.

Таким образом показано, что нефть образуется в недрах Земли из глубинных мантийных флюидов и является возобновляемым ресурсом [40-50,60,61]. Мы, сторонники абиогенной теории образования нефти, смотрим в будущее с оптимизмом. Мы полагаем, что запасов нефти и газа нам хватит еще на долгие столетия.

Химический состав нефти

Основную часть нефтей составляют углеводороды, различные по своему составу, строению и свойствам, которые могут находиться в газообразном, жидком и твердом состоянии. В состав нефти входит свыше четырехсот углеводородных соединений. В зависимости от строения молекул они подразделяются на три класса – парафиновые, нафтеновые и ароматические. Но значительную часть нефти составляют углеводороды смешанного строения, содержащие структурные элементы всех трех упомянутых классов. По количественному

соотношению содержащихся в нефти различных групп углеводородов все нефти сгруппированы в четыре класса:

- 1) метановые, содержащие более 66% метановых углеводородов;
- 2) нафтеновые, содержащие более 66% нафтенных углеводородов;
- 3) нафтенно-метановые, в которых содержание метановых и нафтенных углеводородов в сумме составляет более 66%;
- 4) все нефти «необычного состава», т. е. ароматические и др.

По содержанию парафина нефти подразделяются на три группы:

- 1) беспарафиновые – парафина до 1%;
- 2) слабопарафиновые – парафина 1-2%;
- 3) парафиновые – парафина свыше 2%.

По содержанию серы нефти делятся на две группы:

- 1) малосернистые – серы до 0,5%;
- 2) высокосернистые – серы более 0,5%.

По содержанию асфальтенов и смол выделяются три группы нефтей:

- 1) малосмолистые – смол менее 8%;
- 2) смолистые – смол 8-28%;
- 3) сильносмолистые – смол более 28%.

Алканы

Парафиновые углеводороды, или алканы – алифатические углеводороды, в молекуле которых атомы углерода связаны между собой и с атомами водорода одинарной связью [25,38,55]. В молекулах алканов атом углерода находится в состоянии sp^3 -гибридизации (рис. 3).

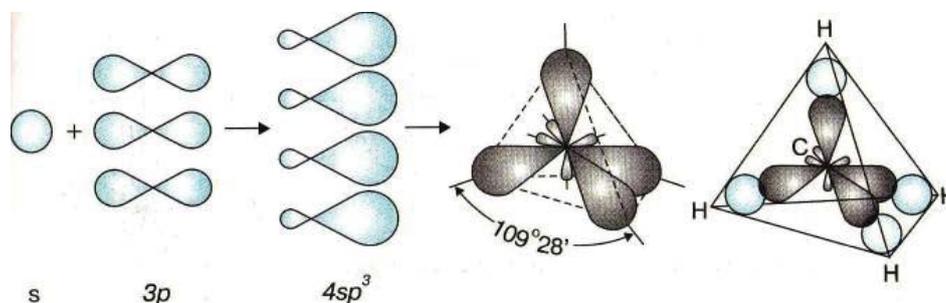
Общая формула парафинов C_nH_{2n+2} . В зависимости от количества атомов углерода в молекуле углеводороды могут принимать одно из трех агрегатных состояний.

Например, если в молекуле от одного до четырех атомов углерода ($CH_4 - C_4H_{10}$), то УВ представляют собой газ, от 5 до 16 ($C_5H_{12} - C_{16}H_{34}$) – это жидкие УВ, а если больше 16 ($C_{17}H_{36}$ и т.д.) – твердые (табл. 1). Общее содержание алканов в нефтях составляет 40-50% (об.), а в некоторых нефтях оно достигает 50-70%. Однако есть нефти, в которых содержание алканов составляет всего 10-15%. В основном нефть содержит двадцать-сорок индивидуальных нормальных и изомерных алканов, остальные присутствуют в незначительных количествах. Разветвленные алканы довольно широко представлены в нефтях, однако среди них хорошо изучены лишь низкомолекулярные C_4-C_{10} . Из слабоветвленного строения алканов в нефти наиболее часто встречаются метилзамещенные. Для подавляющего большинства нефтей метанового и нафтенно-метанового типа изомеры гексана по относительному их содержанию распределяются в следующий ряд:

гексан > 2-метилпентан > 3-метилпентан >
> 2,3-диметилбутан > 2,2-диметилбутан.

Среди гептанов указанных типов нефтей также преобладают нормальные изомеры. Однако, в отличие от гексановой фракции, в разветвленных гептанах преобладает не 2-замещенный, а 3-замещенный изомер. Последовательность распределения изомеров гептана, в большинстве случаев, подчиняется следующему правилу:

Гептан > 3-метилгексан > 2-метилгексан >
> 2,3-диметилпентан > 3-этилпентан >
> 2,4-диметилпентан > 2,2-диметилпентан >
3,3- > диметилпентан > 2,2,3-триметилбутан.



sp^3 -Гибридизация орбиталей атома углерода и строение молекулы метана

Рис. 3. Гибридизация алканов

Таблица 1

Физические свойства нормальных алканов

Название	Химическая формула	Температура кипения, °С	Температура плавления, °С	Плотность ρ_4^{20}
Метан	CH ₄	- 161,6	- 182,5	0,424
Этан	C ₂ H ₆	- 88,6	-183,2	0,546
Пропан	C ₃ H ₈	- 42,2	- 187,6	0,585
Бутан	C ₄ H ₁₀	- 0,5	- 133,3	0,579
2-метилпропан	C ₄ H ₁₀	-11,7	-139,4	0,563
Пентан	C ₅ H ₁₂	36,1	- 129,7	0,626
2-метилбутан	C ₅ H ₁₂	27,9	-159,9	0,620
2,2-диметилпропан	C ₅ H ₁₂	9,5	-16,6	0,613
Гексан	C ₆ H ₁₄	68,8	-95,3	0,659
2-метилпентан	C ₆ H ₁₄	60,0	-153,0	0,653
3-метилпентан	C ₆ H ₁₄	63,3	-118,0	0,664
2,3-диметилбутан	C ₆ H ₁₄	58,0	-128,5	0,661
2,2-диметилбутан	C ₆ H ₁₄	49,7	-99,9	0,649
Гептан	C ₇ H ₁₆	98,4	-90,6	0,684
2-метилгексан	C ₇ H ₁₆	90,1	-118,3	0,679
3-метилгексан	C ₇ H ₁₆	91,9	-119,4	0,687
3-этилпентан	C ₇ H ₁₆	93,5	-118,6	0,698
2,2-диметилпентан	C ₇ H ₁₆	79,2	-123,8	0,674
2,3-диметилпентан	C ₇ H ₁₆	89,8	-	0,695
2,4-диметилпентан	C ₇ H ₁₆	80,5	-119,2	0,673
3,3-диметилпентан	C ₇ H ₁₆	86,1	-134,5	0,693
2,2,3-триметилбутан	C ₇ H ₁₆	80,9	-24,9	0,690
Октан	C ₈ H ₁₈	125,7	-56,8	0,703
Нонан	C ₉ H ₂₀	149,5	-53,6	0,718
Декан	C ₁₀ H ₂₂	173,0	-30,3	0,730
Ундекан	C ₁₁ H ₂₄	195,8	-25,6	0,740
Додекан	C ₁₂ H ₂₆	214,5	-9,6	0,745
Тридекан	C ₁₃ H ₂₈	234,0	-6,0	0,757
Тетрадекан	C ₁₄ H ₃₀	252,5	5,5	0,764
Пентадекан	C ₁₅ H ₃₂	270,5	10,0	0,769
Гексадекан	C ₁₆ H ₃₄	287,0	18,1	0,775
Октадекан	C ₁₈ H ₃₈	317,0	28,0	0,777
Эйкозан	C ₂₀ H ₄₂	344,0	36,5	0,778
Пентакозан	C ₂₅ H ₅₂	259/2кПа	53,3	-
Триакоктан	C ₃₀ H ₆₂	304/2 кПа	65,9	0,780
Пентатриакоктан	C ₃₅ H ₇₂	331/2 кПа	74,6	0,781
Тетракоктан	C ₄₀ H ₈₂	-	80,8	-
Пентакоктан	C ₅₀ H ₁₀₂	421/2 кПа	93,0	-

В распределении изомеров октана, нонана и деканасуществуют довольно устойчивые закономерности. Общим для них является уменьшение отношения суммы мезозамещенных к сумме дизамещенных с ростом молекулярной массы. Из 18 изомеров октана обнаружено 17. Из 35 возможных изомеров нонана обнаружено 24.

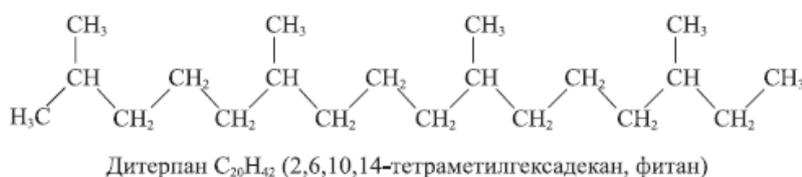
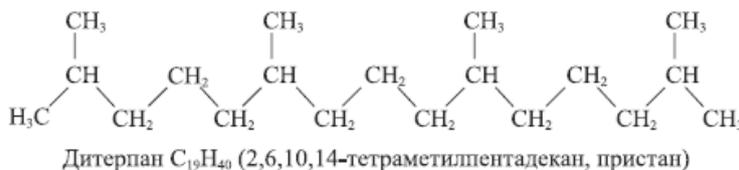
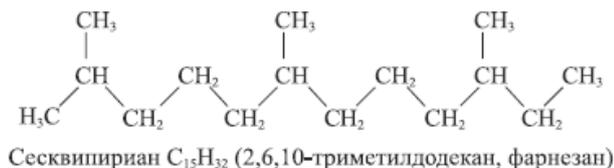
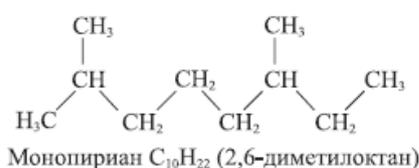
В нефтях метанового типа преобладают нормальные алканы (до 50%). В нефтях нафтенового типа содержатся преимущественно изоалканы (до 75% и более).

Так как нефти метанового типа относятся к старым нефтям, преобладание в них алканов нормального строения объясняют протеканием реакций отщепления боковых цепей у углеводородов изостроения. Преимущественное содержание изоалканов в нафтеновых нефтях свидетельствует, что они относятся к молодым, не претерпевшим ещё значительных превращений. В условиях пластового давления газообразные углеводороды растворены в нефти и в процессе её добычи выделяются вследствие снижения давления. Эти газы, которые сопровождают сырую нефть, называются попутными газами. Для этих газов характерно высокое содержание метана и наличие значительных количеств этана, пропана, бутанов и высших углеводородов вплоть до октана. Содержание жидких алканов в зависимости от месторождения нефти колеблется от 10 до 70%. Во всех нефтях присутствуют твёрдые алканы. Для всех твёрдых алканов укрепилось техническое название «**парафины**». Парафинами называют углеводоро-

ды состава $C_{17} - C_{35}$. Парафинов в нефтях содержится 0,1-5%. Однако встречаются высокопарафинистые нефти с содержанием 7-27% твёрдых парафинов. Твёрдые углеводороды с числом углеродных атомов $C_{36} - C_{55}$ называются **церезинами**. В состав церезинов входят алканы нормального и изостроения, которые могут содержать в молекуле циклоалкановые и ароматические структуры. По внешнему виду похожи на воск.

Парафины имеют температуру плавления 27-71°C. Нефтяные церезины имеют более высокую относительную молекулярную массу, а температура плавления их 65-88°C. При одной и той же температуре плавления церезины по сравнению с парафинами имеют более высокую плотность и вязкость. Отличаются они также и по строению кристаллов. Парафины образуют пластинки и пластинчатые ленты, переплетающиеся между собой. Кристаллы легкоплавкого парафина имеют большие размеры, чем тугоплавкого. Церезины же кристаллизуются в виде мелких игл, плохо соединяющихся между собой, и поэтому они не образуют прочных застывающих систем, как парафины. Церезин и парафин обладают различными химическими свойствами.

В нефти были обнаружены углеводороды изопреноидного строения. Содержание изопреноидных углеводородов в нефтях колеблется в пределах 3-4% и выше. Название «изопреноидные углеводороды нефти» весьма условно, оно отнесено к алканам разветвлённого строения, являющимся гидрированными аналогами изопреноидов.



Они обладают полиизопреновым скелетом, с характерным чередованием метильных заместителей в цепи через три метиленовые группы. К алифатическим изопреноидным углеводородам, найденным в настоящее время в нефтях, можно отнести 2,6-диметилалканы (C_5-C_{13}), 3,7-диметилалканы (C_{11}, C_{12}, C_{14}), 2,6,10-триметилалканы ($C_{14}-C_{18}$), 3,7,11-триметилалканы (C_{16}), 2,6,10,14-тетраметилалканы ($C_{19}-C_{25}$).

В парафиновых нефтях преобладают фитан – 2,6,10,14-тетраметилгексадекан ($C_{20}H_{42}$) и пристан – 2,6,10,14-тетраметилпентадекан ($C_{19}H_{40}$), а в нефтяных 2,6,10-триметилундекан, 2,6,10-триметилдодекан и 2,6,10-триметилтридекан.

Циклоалканы

Общее содержание нафтенов в нефтях составляет 25 – 75% (масс.).

Нафтены, или циклоалканы (табл. 2) – углеводороды, содержащие в молекуле циклы, построенные из атомов углерода, связанные между собой σ -связью. Следовательно, молекулы нафтенов, не имеющие заместителей, состоят из связанных между собой и замкнутых в кольца метиленовых групп CH_2 .

По сравнению с парафинами, нафтены имеют более высокую плотность и меньшую упругость паров и имеют лучшую растворяющую способность.

Таблица 2

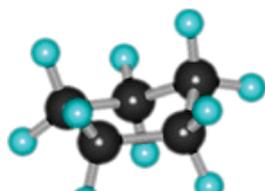
Физические свойства некоторых циклоалканов

Название	$T_{\text{плав}}$, °C	$T_{\text{кип}}$, °C	Плотность P_{4}^{20}
Циклопропан	-127	-33	0,6884
Циклобутан	-80	13	0,7038
Метилциклопропан	-177	0,7	0,6912
Циклопентан	-94,4	49,3	0,7454
Этилциклопропан	-149	35	0,6770
Метилциклобутан	-149	37	0,6931
Этилциклобутан	-143	71	0,7450
Метилциклопентан	-143	72	0,7488
Этилциклопентан	-138,4	103,4	0,7657
1,1-диметилциклопентан	-69,7	87,8	0,7523
цис-1,2-диметилциклопентан	-53,8	99,5	0,7723
транс-1,2-диметилциклопентан	-117,6	91,9	0,7519
Пропилциклопентан	-120,3	130,8	0,7756
Бутилциклопентан	-108,2	156,8	0,7843
Изопентилциклопентан	-	169,0	0,4840
Циклогексан	6,6	80,9	0,7781
Метилциклогексан	-126,6	100,8	0,7692
Этилциклогексан	-114,4	132,0	0,7772
1,1-диметилциклогексан	-33,5	119,5	0,7840
цис-1,2-диметилциклогексан	-50,1	128,0	0,7965
транс-1,2-диметилциклогексан	-89,4	125,0	0,7760
Пропилциклогексан	-94,5	154,7	0,7932
Бутилциклогексан	-78,6	179,0	0,7997
Пентилциклогексан	-	204,0	0,8040
Декалин	-40	186	0,8960
Адамантан	270	-	1,0800

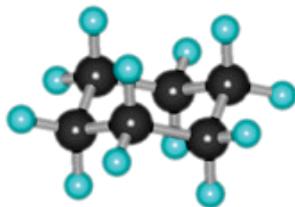
По числу циклов в молекуле циклоалканы подразделяются на моноциклические (общая формула C_nH_{2n}), бициклические (общая формула C_nH_{2n-2}) и полициклические (C_nH_{2n-4} , C_nH_{2n-6} и т.д.) (три-, тетра-, пента- и гексациклические с короткими боковыми цепями-терпаны, стераны).

Общая формула моноциклических циклоалканов C_nH_{2n} . При обычных условиях первые два члена C_3H_6 и C_4H_8 газы, (C_5H_{10} – $C_{16}H_{32}$) жидкости, начиная с $C_{17}H_{34}$ – твердые.

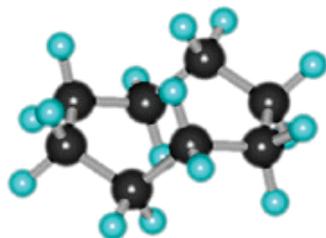
Моноциклические циклоалканы являются преобладающими компонентами нефти. Они представлены преимущественно метилзамещёнными циклопентанами и циклогексанами. Преобладают соединения, замещённые в положении 1,3 и 1,2,3.



Циклопентан



Циклогексан

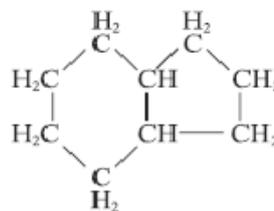
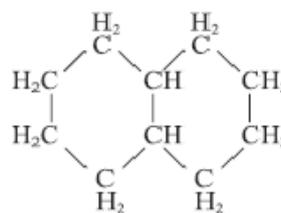
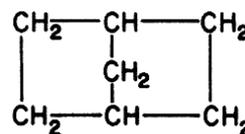


Циклооктан

Циклогексановые гомологи более распространены, чем циклопентановые. В небольшом количестве в нефтях найдены алкилциклопентаны.

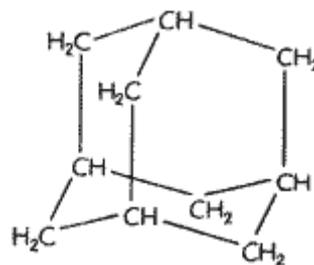
Из бициклических циклоалканов в нефтях найдены конденсированные декалин $C_{10}H_{18}$ (бицикло [4.4.0] деканан), пенталан (бицикло [3.3.0] окталан), гидриндан (бицикло [4.3.0] нонан), и мостиковый норборнан (бицикло [2.2.1] гептан), (бицикло [3.2.1] октан), (бицикло [3.3.1] но-

нан) и их гомологи. Наиболее широко распространены имеющие практическое значение декалины.

Гидриндан C_9H_{16} Декалин $C_{10}H_{18}$ Норборнан C_7H_{12}

Кроме конденсированных, бициклоалканы могут быть представлены в нефтях гомологами дициклопентила и циклогексила, циклопентилциклогексила и дициклогексилметана.

Из трициклических циклоалканов в нефтях обнаружен лишь адамантан $C_{10}H_{16}$ (трицикло [3.3.1.1] деканан) и его гомологи. Молекула адамантана очень устойчивая. Кристаллическая решётка у него такая же, как у алмаза.

Адамантан $C_{10}H_{16}$

Моноциклические циклоалканы с длинными боковыми цепями, а также циклоалканы сложной конденсированной структуры представляют собой при обычной тем-

пературе твёрдые вещества. Они являются компонентами парафинов и церезинов.

Ароматические углеводороды-арены

Общее содержание аренов в нефтях составляет 10-20% масс., а в ароматических нефтях их содержание доходит до 35%. Наиболее богаты аренами молодые нефти.

Ароматические углеводороды – соединения, содержащие в молекуле особую циклическую группировку из шести атомов углерода, которая называется бензольной группировкой (бензольное ядро) [25,38,55]. Каждый атом углерода в молекуле бензола находится в состоянии sp^2 -гибридизации. Он связан с двумя соседними атомами углерода и атомом водорода тремя σ -связями (рис. 4).

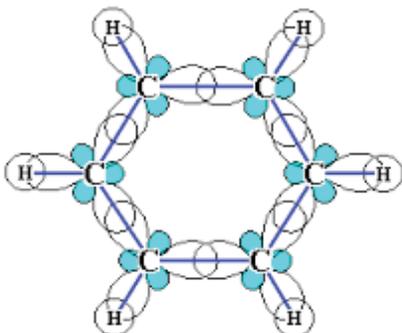


Рис. 4. Схема образования σ -связей бензола

В результате образуется плоский шестиугольник: все шесть атомов углерода и все σ -связи C–C и C–H лежат в одной плоскости. Электронное облако четвертого электрона (p -электрона), не участвующего в гибридизации, имеет форму гантели и ориентировано перпендикулярно к плоскости бензольного кольца. Такие p -электронные облака соседних атомов углерода перекрываются над и под плоскостью кольца. В результате шесть p -электронов образуют общее электронное облако и единую химическую связь для всех атомов углерода. Две области большой электронной плоскости расположены по обе стороны плоскости σ -связей. p -Электронное облако обуславливает сокращение расстояния между атомами углерода. В молекуле бензола они одинаковы и равны 0,140 нм. В случае простой и двойной связи эти расстояния составили бы соответственно 0,154 и 0,134 нм. Значит, в молекуле бензола нет простых и двойных связей (рис. 5).

Молекула бензола – устойчивый шестичленный цикл из одинаковых CH-групп, лежащих в одной плоскости. Все связи между атомами углерода в бензоле равноценны, чем и обусловлены характерные свойства бензольного ядра.

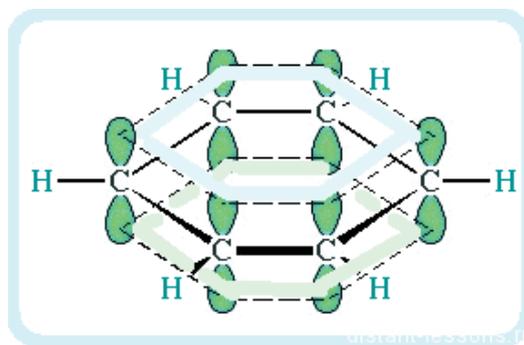


Рис. 5. Схема образования π -связей бензола

Различают одноядерные (одна бензольная группировка в молекуле) и полиядерные ароматические углеводороды, содержащие две или более бензольные группировки. В молекулах аренов в качестве боковых цепей могут находиться углеводородные радикалы с неразветвлённой или разветвлённой углеродной цепочкой, а также содержащие двойные или тройные связи и циклические группировки.

Общая формула моноциклических аренов C_nH_{2n-6} , где $n \geq 6$. Арены являются ненасыщенными соединениями (табл. 3). В нефти присутствуют все метилзамещённые изомеры бензола до $C_{10}H_{14}$ включительно. Толуол, м-ксилол и 1,2,4-триметилбензол представляют основные компоненты нефти. Среди дизамещённых гомологов бензола преобладают 1,3-, среди триалкилбензолов – 1,3,5 и 1,2,4-изомеры.

Полиядерные ароматические углеводороды (табл. 4) бывают несопряженными и сопряженными.

Углеводороды, в которых два или более бензольных кольца связаны простой связью, в соответствии с числом колец называют би-, тер- и т.д. фенилами, например: бифенил, п-терфенид. Ди- и полиарилалканы называются как арилзамещённые алканы: дифенилметан, дифенилэтан и их метилпроизводные, трифенилметан. арены, такие как нафталин (2), антрацен, фенантрен, флуорен(3), пирен, хризен, перилен(4) и их алкильные (главным образом, метильные) производные.

Таблица 3

Физические свойства некоторых аренов

Название	$T_{\text{плавл.}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{кип.}}, ^\circ\text{C}$	Плотность ρ_4^{20}
Бензол	5,5	80	0.8765
Толуол	-95	110	0.8669
Этилбензол	-94	136	0.8665
<i>o</i> -Ксилол	-25	144	0.8802
<i>m</i> -Ксилол	-47	139	0.8642
<i>n</i> -Ксилол	13	138	0.8611
1,2,4-триметилбензол	-44	169	0.8758
1,3,5-триметилбензол	-45	165	0.8652
Пропилбензол	-99	159	0.8600
Изопропилбензол	-96	152	0.8620
трет-бутилбензол	-58	169	0,8669
<i>n</i> -бутилбензол	-89	183	0,8662
1-Метил-2-пропилбензол	-60	185	0.8747
1-Метил-3-пропилбензол	-61	182	0.8610
1-Метил-4-пропилбензол	-62	183	0.8584
1,2,3,4- тетраметилбензол	-6	205	0,9014
1,2,3,5- тетраметилбензол	-24	193	0,8906
1,2,4,5- тетраметилбензол	+79	197	-
<i>n</i> -амилбензол	-78	205	0,8618
Пентаметилбензол	-14	210	0,8830
Гексаметилбензол	+166	265,0	-
Стирол	-31	145	0.9090
Фенилацетилен	-45	142	0.9300

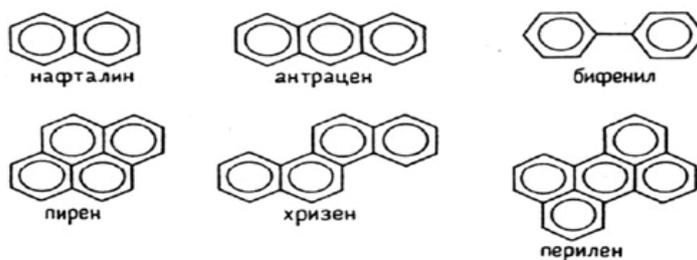


Таблица 4

Физические свойства некоторых полиядерные ароматических углеводородов

Название	$T_{\text{плавл.}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{кип.}}, ^\circ\text{C}$	Плотность ρ_4^{20}
Нафталин	+80,3	218,0	1.1400
α -метилнафталин	+34,6	241,1	1,029
2,7-диметилнафталин	+97,0	262,3	-
β -этилнафталин	-7,0	258,0	0,9922
α -этилнафталин	-13,8	258,7	1,0081
Дифенил	69	256	1.0400
Антрацен	216	342	1.2500
Фенантрен	199	340	1.1800
Флуорен	116	295	1.2000
Пирен	150,0	392,0	1,2770
Хризен	254,0	448,0	1.2700
Перилен	278	400	-

Среднее содержание аренов, характерное для нефтей СНГ различных типов (в% масс, в расчёте на арены): бензольные – 67%, нафталиновые – 18%, фенантроновые – 8%, хризеновые и бензофлуореновые – 3%, пиреновые – 2%, антраценовые 1%, прочие арены – 1. Гомологи фенантрена присутствуют в значительно большем количестве, чем гомологи антрацена.

В нефти присутствуют также гибридные углеводороды- полициклические углеводороды, молекулы которых содержат циклоалкановые структуры, конденсированные с аренами: индин, тетралин, флуорен, аценафтен. Ареновые циклы гибридных углеводородов имеют преимущественно короткие (метильные или этильные) заместители, циклоалкановые кольца – один или два довольно длинных алкильных заместителя.

Непредельные углеводороды

Непредельные, или ненасыщенные углеводороды – это углеводороды, в молекуле которых имеются углеводородные атомы, затрачивающие на связь с соседними атомами углерода более одной валентности – две или три.

Непредельные углеводороды называют ненасыщенными, так как они содержат меньшее число атомов водорода, чем предельные с тем же числом атомов углерода в молекуле.

Алкены – ненасыщенные соединения, содержащие двойную связь C=C. Раньше эти соединения называли *олефинами*.

Общая формула алкенов C_nH_{2n} . В молекулах алкенов атом углерода находится в состоянии sp^2 -гибридизации [25,38,55] (рис. 6, табл. 6).

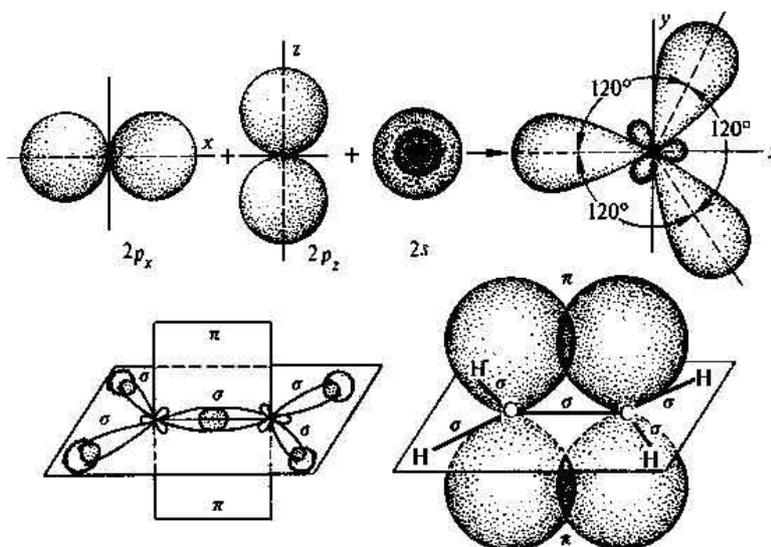


Рис. 6. sp^2 -Гибридизация орбиталей углерода и строение молекулы этилена

Таблица 6

Физические свойства алкенов

Название	$T_{\text{плав.}}$, °C	$T_{\text{кип.}}$, °C	Плотность ρ_4^{20}
Этен	-169,4	-103,8	0,570
Пропен	-185,2	-47,7	0,610
Бутен-1	-185,4	-6,3	0,630 ⁻¹⁰
Цис-бутен-2	-139,3	3,7	0,644 ⁻¹⁰
Транс-бутен-2	-105,8	0,9	0,660
Изобутилен	-140,8	-6,9	0,626
Пентен-1	-165,2	30,1	0,611
Гексен-1	-139,8	63,5	0,673
Бутадиен-1,3	-108,9	-4,47	0,640
2-метилбутадиен-1,3	-146,0	34,07	0,681

Ранее считалось, что непредельные углеводороды либо не содержатся в нефтях, либо содержатся в незначительных количествах. В конце прошлого века было показано, что в ряде нефтей Восточной Сибири, Татарии и других районов России содержание алкенов может достигать до 15-20% от массы нефти. В небольших количествах они найдены и в канадской нефти. Из неё выделены углеводороды от C_6H_{12} до $C_{13}H_{26}$. В небольших количествах непредельные углеводороды присутствуют в продуктах простой перегонки нефти.

Значительное количество непредельных углеводородов содержится в газах термической и каталитической переработки нефтяных фракций (до 25%). Большое количество газообразных алкенов содержится и в жидких продуктах крекинга – бензинах. Непредельные углеводороды являются важнейшим сырьём для нефтехимической промышленности. На их основе производят большую часть всех нефтехимических продуктов.

Гетеросоединения нефти

Гетероорганические соединения, кроме углерода и водорода, содержат главным образом кислород, сера и азот. Они могут составлять 10-20% на сырую нефть. В состав нефти входит около 380 сложных гетеросоединений [25,38,55]. Большинство из указанных соединений относится к классу сернистых соединений.

Соединения серы

В настоящее время в нефтях обнаружено более 250 серосодержащих соединений [25,38,55]. В нефтях содержатся как неорганические, так и органические соединения серы: элементарная сера, сероводород, тиолы или меркаптаны, сульфиды, ди- и полисульфиды, тиофены. Из них основную долю составляют сульфиды и тиофены. Существуют и смешанные серо- и кислородсодержащие соединения – сульфоны, сульфоксиды и смешанные серо- и азотсодержащие соединения – тиазол и бензтиазол.

Элементарная сера содержится лишь в нефтях, связанных с известняковыми или сульфатно-доломитовыми отложениями. Количество элементарной серы может колебаться от 0,0001 до 0,1% масс. Она содержится в нефтях в растворённом состоянии. Количество растворённого в нефтях сероводорода может достигать до 0,02% масс.

Меркаптаны содержат тиольную (меркаптановую) группу-SH. Общая формула тиолов: R-SH. Меркаптаны встречаются, главным образом, в бензиновых и керосиновых фракциях. Содержание меркаптанов в различных нефтях колеблется от 0 до 75% от всех содержащихся в них сернистых соединений. Из разных нефтей выделено более 50 меркаптанов с числом углеродных атомов от 1 до 8. Сюда относятся алкил-, циклоалкил- и арилмеркаптаны.

Общая формула сульфидов нефти R-S-R¹. В нефтях найдено более 40 сульфидов, главным образом алкилсульфиды, в незначительных количествах обнаружены алкилциклоалкил-, алкилфенил- и дифенилсульфиды, алкилпроизводные тиопирана. Алкил-, циклоалкил- и арилсульфиды составляют 50-70%, алкилтофаны 40-50% масс. от суммы сернистых соединений лёгких и средних фракций нефтей. В керосиновых и масляных фракциях содержатся полициклические сульфиды:



Дисульфиды – соединения общей формулы R-S-S-R¹. Дисульфиды находятся в нефтях в небольших количествах. Дисульфиды – тяжёлые жидкости с неприятным запахом, почти нерастворимые в воде и легко растворимые в органических растворителях.

Соединения азота

Содержание азота в нефти редко превышает 1%. Оно снижается с глубиной залегания нефти и мало зависит от характера вмещающих их пород. Азотистые соединения сосредоточены в высококипящих фракциях и особенно в тяжёлых остатках-смолах [25,38,55]. Обычно азотсодержащие соединения нефти делят на две большие группы: азотистые основания и нейтральные азотистые соединения. Азотистые основания сравнительно легко выделяются минеральными кислотами и потому наиболее изучены. В настоящее время в нефти и его фракциях выделено более 50 индивидуальных

азотистых оснований. Алкиламины в нефти не обнаружены. Амины основного характера представлены преимущественно третичными аминами – производными пиридина, хинолина, изохинолина, в меньшей степени акридина. Значительно реже представлены гомологи анилина. Нейтральные азотсодержащие соединения нефти представлены арилпроизводными пиррола, индола, карбазола, бензокарбазола и амидами кислот. Убедительных доказательств наличия в нефти самого пиррола и простейших его алкилзамещенных пока нет.



Интересным типом азотсодержащих соединений являются нефтяные порфирины, довольно подробно изученные в настоящее время.

Соединения кислорода

Кислород в нефтях встречается в связанном состоянии в составе нафтеновых кислот (около 6%), фенолов (не более 1%), а также жирных кислот, кетонов эфиров, а также вместе с азотом и серой в асфальтово-смолистых компонентах [25,38,55].

Основная часть кислых соединений нефтей имеет характер карбоновых кислот, общей формулы C_nH_mCOOH . Впервые кислые соединения были обнаружены в Бакинском керосине. Было установлено, что кислоты с числом углеродных атомов в молекуле от 8 до 11 содержат циклопентановое

кольцо. Исследования показали, что карбоксильная группа несвязана непосредственно с пятичленным кольцом, а отделена от него одной или несколькими метиленовыми группами, следовательно, входит в одну из боковых цепей. Из Румынской и Западно-Украинской нефтей выделили кислоты C_8-C_{11} , как с пятичленным, так и шестичленным нафтеновым кольцом. Поскольку эти кислоты оказались производными моноциклических нафтенов с общей формулой $C_nH_{2n-1}COOH$, то они получили название нафтеновых кислот. Нафтеновые и высшие кислоты найдены во всех нефтях, но в незначительных количествах (от сотых долей до 3%).

Исходя из этого, в последнее время все чаще кислоты, выделенные из нефти, стали называть не нафтеновыми, а нефтяными. Наиболее изученный класс кислородсодержащих соединений нефти – нефтяные кислоты. В бензиновых фракциях встречаются только алифатические кислоты, так как температура кипения простейших алициклических и ароматических кислот выше $200^\circ C$. Эти кислоты имеют преимущественно нормальное или слаборазветвленное строение (с одним метильным заместителем в боковой цепи). Алифатические кислоты обнаружены также и в высококипящих фракциях. В настоящее время из нефтей выделены все кислоты нормального строения, содержащие до 25 атомов углерода в цепи. По мере повышения температуры кипения нефтяных фракций в них появляются алифатические кислоты разветвленной структуры, содержащие два и более метильных заместителя в основной цепи. Наиболее интересной группой полиметилзамещенных алифатических кислот являются кислоты изопреноидной структуры. В настоящее время выделены 2,6,10-триметилундекановая, 3,7,11-триметилдодекановая, 2,6,10,14-тетраметилпентадекановая (пристановая) и 3,7,11,15-тетраметилгексадекановая (фитановая) кислоты.

Нефтяные фенолы, несмотря на значительное содержание их в нефти, изучены недостаточно. Наиболее известны низшие фенолы (C_6-C_9). Например, в Западно-Сибирских нефтях наблюдается следующая закономерность в распределении фенолов, крезолов и ксиленолов: концентрация фенолов возрастает в ряду $C_6 < C_7 < C_8 < C_9$.

Среди крезолов преобладают орто-изомер, а у ксиленолов 2,4- и 2,5-диметилфенолы.

Из бензиновой фракции Калифорнийской нефти выделено 6 индивидуальных кетонов: ацетон, метилэтил-, метилпропил-, метилизопропил-, метилбутил- и этилизопропилкетоны. В некоторых нефтях кетоны составляют основную часть алифатических нейтральных кислородсодержащих соединений. В средних и высококипящих фракциях нефтей обнаружены циклические кетоны типа ацетилизопропилметилциклопентана и флуоренона. К нейтральным кислородсодержащим соединениям нефти относятся также сложные и простые эфиры. Большинство сложных эфиров содержится в высококипящих фракциях или нефтяных остатках. Многие из них являются ароматическими соединениями, иногда представленными внутренними эфирами – лактонами.

В высококонцентрированном виде смолисто-асфальтовые вещества находятся в природе в виде природных битумов. Соотношение между смолами и асфальтенами в нефтях составляет от 9:1 до 7:1. Смолы представляют собой очень вязкие малоподвижные жидкости, а иногда и твердые аморфные вещества от темно-коричневого до бурого цвета. Смолистые вещества заключают около 93% кислорода в нефтях. Содержание углерода в смолах колеблется в пределах 79-87%, а водорода в нефтях 9-11%. Содержание серы в отдельных смолах достигает 7-10%. Содержание кислорода достигает 1-7%, а азота не превышает 2%. Плотность смол близка к 1,1 кг/л, молекулярная масса от 600 до 1000.

Асфальтены представляют собой черное твердое аморфное вещество. Они являются более высокомолекулярными соединениями, чем смолы. Асфальтены отличаются от смол не только несколько меньшим содержанием водорода (1-2%), но и большим содержанием железа, ванадия, никеля и др. Плотность асфальтенов выше 1,14 кг/л, молекулярная масса от 2000 до 4000. Предполагают, что асфальтены являются продуктами конденсации смол. Если смолы растворяются в жидких углеводородах всех групп, то асфальтены нерастворимы в метановых углеводородах, частично растворимы в нафтеновых и лучше растворяются в ароматических. В «белых» нефтях смолы содержатся в малых количествах, а асфальтены вообще отсутствуют.

Металлы в нефти

В составе нефти обнаружено более 60 микроэлементов, половина из них – метал-

лы [3]. Средние концентрации микроэлементов в нефтях уменьшаются в следующем ряду: Cl, V, Fe, Ca, Ni, Na, K, Mg, Si, Al, I, Br, Hg, Zn, P, Mo, Cr, Sr, Cu, Rb, Co, Mn, Ba, Se, As, Ga, Cs, Ge, Ag, Sb, U, Hf, Eu, Re, La, Sc, Pb, Au, Be, Ti, Sn.

В природных нефтях и твердых битумах металлы находятся в следующих формах: Cu, Fe, Pb и U образуют истинные растворы; Zn, Cu, Ni, U, Ca, Mg, Fe и V образуют коллоидные растворы, адсорбированные на активной поверхности нефть/вода; Cu, Zn, Ge, Au находятся в составе полярных смол в виде солей органических кислот; Hg, Sb, As, V, Ni, Fe, Cu, Co, Cr образуют металлоорганические соединения, а V и Ni образуют металлопорфириновые комплексы [44]. Установлено, что концентрация большинства микроэлементов возрастает с увеличением молекулярной массы и ароматичности асфальтенов, а фракции асфальтенов, обогащенные микроэлементами, всегда имеют повышенное содержание азота, серы и кислорода [25,38,55].

Предполагают, что атомы металлов создают комплексные соединения с гетероатомами асфальтенов по донорно-акцепторному типу.

На золоторудном проявлении Пионерское Дегдеканского рудного поля Центральной Колымы, в зоне битуминизации осадочных пород отмечается увеличение концентрации золота на порядок и более по сравнению с кларковыми содержаниями. Содержание золота в битуме составило в среднем 520 г/т [8,9], что значительно превышает содержание этого металла во многих коренных его месторождениях. На золоторудных месторождениях Витватерсранд в Южной Африке и Мурунтау в Узбекистане показан факт совместного нахождения золота и нафтидов [63]. Проявления золота в количестве от 0,438 мг/т обнаружены в нефтях Мексики и Альберты в Канаде. Ассоциация золота и других металлов с углеводородами и органическим веществом вызвана их способностью к образованию металлоорганических соединений различного типа. Золото в количестве до 2 г/т на одну из фракций обнаружено в гидротермальных битумах в древних вулканических трубках Сибири.

Нефти содержат также другие металлы – Mo, Pb, Ag, Zn, Cr и т.д.

Молибден в нефтях содержится в количестве нескольких г/т. Например, содержание молибдена в твердых битумах и тяжелых

нефтях Атабаски, Колд-Лейк и Ллойдминстер составляет соответственно 10, 7.3 и 3.3 г/т. Среднее содержание молибдена в Венесуэльской нефти составляет 60 г/т.

Олово обнаружено менее чем в половине нефтей на западе США. Серебро присутствует в зольных остатках нефтей на западе США менее 1 г/т. Среднее содержание в нефтях Алберти цезия, рубидия и европия составляет соответственно 4,3, 0,015 и 0,94 г/т. В ряде нефтеносных районов – Челекен и Галф-Кост, в пробуренных на нефть скважинах образуются пробки из самородного свинца и цинка или их сульфидов.

Особого внимания заслуживают ванадий и никель, концентрации которых в нефтях намного выше, чем в живом веществе. Ванадий и никель были в числе первых металлов, обнаруженных в нефти. Максимальное содержание ванадия в нефти-6 кг/т. В нефти в свите Офисина в пределах Восточно-Венесуэльского бассейна среднее содержание ванадия составляет 335 г/т. В девонских нефтях Альберты в Канаде ванадий содержится в среднем количестве 13,6 г/т. В нефтях Иллинойса ванадия 0,35÷1,5 г/т, а в арабских – 9,52÷51 г/т. Зольный остаток нефтей из месторождений на западе США содержит 5–50% ванадия [67,88]. Ванадий присутствует почти во всех месторождениях нефти Западного Казахстана. В Акбулакской нефти содержится ванадия до 400 г/т, а Бузачинской нефти до 300 г/т [32,33,42,46]. В пределах Уральского рудного пояса нефти содержат до 569 г/т ванадия, а твердые битумы содержат ванадий до 1230 г/т [67,68].

Список литературы

1. Абызгильдин Ю.М., Михайлюк Ю.И., Яруллин К.С., Раговская А.А. Порфирины и металлопорфириновые комплексы нефтей. – М.: Наука, 1977. – 88 с.
2. Алексеев В.А., Дюжева Т.И., Мельник Н.Н. Водородно-углеродная дегазация Земли и образование мелкодисперсного углерода при высоких давлениях и температурах // Дегазация Земли: геотектоника, геодинамика, геоморфология, нефть, газ, углеводороды и жизнь. 10-22 октября 2010. – М.: ГЕОС, 2010. – С. 21-22.
3. Андриевский Р.А., Урбанович В.С., Кобелев Н.П., Торбов В.И. Высокотемпературная консолидация и физико-механические свойства нанокристаллического нитрида титана // Докл. РАН. – 1997. – Т. 356, № 1. – С. 39-41.
4. Арутюнян А.В. Земная кора Малого Кавказа, офиолиты, вулканизм, нефтегазоносность, сейсмичность // Вестник ОНЗ РАН, 2, NZ6006. doi:10.2205/2010NZ000024, 2010.
5. Аскарлов К.А., Березин Б.Д., Евстигнеева Р.П. и др. Порфирины: структура, свойства, синтез. – М.: Наука, 1985. – 333 с.
6. Воробьев А.А. Физические условия залегания и свойства глубинного вещества. (Высокие электрические поля в земных недрах). – Томск: ТГУ, 1975.
7. Гаврилов В.П. Возможные механизмы естественного восполнения запасов на нефтяных и газовых месторождениях // Геология нефти и газа. – 2008. – № 1. – С. 57-65.
8. Гамянин Г.Н., Горячев Н.А., Бахарев А.Г. и др. Условия зарождения и эволюции гранитоидных золоторудно-магматических систем в мезозоидах северо-востока Азии. – Магадан: СВ КНИИ ДВО РАН, 2003. – 196 с.
9. Ганжа Г.Б., Ганжа Л.М. Золото-битумная минерализация в черносланцевой толще, Центральная Колыма // Руды и металлы. – 2004. – № 4. – С. 24-32.
10. Гилинская Л.Г. Спектры ЭПР комплексов V(IV) и структурнефтяных порфиринов. // Журнал структурной химии. – 2008. – Т. 49, № 2. – С. 259-268.
11. Губкин И.М. Учение о нефти. – М.: Наука, 1975. – 387 с.
12. Зубков В.С. К вопросу о составе и формах нахождения флюида системы C–H–N–O–S в РТ-условиях верхней мантии // Геохимия. – 2001. – № 2. – С. 131-145.
13. Зубков В.С., Лузин В.Ф., Андреев В.Ф. Нефть и газ в современном мире. – Иркутск: ИГК, 2003. – С. 23-45.
14. Зубков В.С., Степанов А.Н., Карнов И.К., Бичкинский В.А. Термодинамическая модель системы C–H в условиях высоких температур и давлений // Геохимия. – 1998. – № 1. – С. 95-101.
15. Зубков В.С. О двух ветвях мантийного флюида. Геология и металлогения докембрия юга Сибири. – Иркутск, 1999. – С. 39-43.
16. Каграманов Ю.Р. К проблеме пресспектив нефтегазоносности Арарат-Арагацской впадины. – Ереван: Асогик, 2010. – 141 с.
17. Кадик А.А., Куровская Н.А., Игнатъев Ю.А., Кононова Н.Н., Колташев В.В., Плотноченко В.Г. Влияние летучести кислорода на растворимость азота, углерода и водорода в расплавах $FeO - Na_2O - SiO_2 - Al_2O_3$, металлической фазой железа при 1.5 ГПа и 1400°C // Геохимия. – 2011. – № 5. – С. 451-461.
18. Кадик А.А., Колташев В.В., Крюкова Е.Б., Плотноченко В.Г. Изучение форм растворения летучих соединений водорода, углерода, азота и кислорода в магматических расплавах ранней мантии земли методами ИК и КР спектроскопии // Вестник ОНЗ РАН. – 2011. – №3. NZ6031, doi:10.2205/2011NZ000161.
19. Кропоткин П.Н. Проблемы происхождения нефти // Советская геология. – 1955. – № 47. – С. 104-125.
20. Кудрявцев Н.А. Генезис нефти и газа. – Л.: Недра, 1973. – 216 с.
21. Кучеров В.Г., Бенделиани Н.А., Алексеев В.А., Кенней Д.Ф. Синтез углеводородов изминералов при давлении до 5 ГПа // Доклады РАН. – 2002. – Т. 387, № 6. – С. 789-792.
22. Кучин Е.С. Об основных вопросах эндогенного рудообразования // Отечественная геология. – 2001. – № 1. – С. 20-30.
23. Лурье М.А., Шмидт Ф.К. Конденсационные превращения эндогенного метана под воздействием серы – возможный путь генезиса нефти // Российский химический журнал. – 2004. – Т. XLVIII, № 6. – С. 135-147.
24. Лурье М.А., Шмидт Ф.К. О связи содержания серы и других характеристик нефти. Абиогенный вклад в нефтеобразование // Химия и технология топлив и масел. – 2007. – № 4. – С. 3-6.
25. Магеррамов А.М., Ахмедова Р.А., Ахмедова Н.Ф. Нефтехимия и нефтепереработка: учебник для высших учебных заведений. – Баку: Баки Университети, 2009. – 660 с.
26. Маракушев А.А., Маракушев С.А. Образование нефтяных и газовых месторождений // Литология и полезные ископаемые. – 2008. – № 5. – С. 505-521.
27. Маракушев А.А., Панеях Н.А., Маракушев С.А. Образование сульфидных руд и углеводородов в срединно-океанических хребтах // Глубинная нефть. – 2014. – Т. 2, № 5. – С. 689-698.
28. Менделеев Д.И. Сочинения. – Л.-М.: АН СССР, 1949. – Т. 10. – С. 302-310.
29. Микенин П.Е., Цырульников П.Г., Котолевич Ю.С., Загоруйко А.Н. Ванадий-оксидные катализаторы селективного окисления сероводорода на основе структурированных микроволокнистых носителей // Международная конфе-

- рентия «Каталитические процессы нефтепереработки, нефтехимии и экологии», октябрь 2013, Ташкент, Республика Узбекистан: сборник тезисов докладов. – Новосибирск: Изд-во Института катализа СО РАН, 2013. – С. 54-55.
30. Мираламов Г.Ф., Мамедов Ч.И. Каталитическое эпосидирование олефинов в присутствии ванадилпорфиринового комплекса // Нефтехимия. – 2006. – Т. 46, № 1. – С. 28-30.
31. Мираламов Г.Ф. Димеризация 1-бутена в присутствии каталитической системы никель-порфириновый комплекс и бутиллития // Нефтегазовые технологии. – 2005. – № 1. – С. 72-73.
32. Надиров Н.К., Котова А.В., Камьянов В.Ф. и др. Новые нефти Казахстана и их использование: Металлы в нефтях. – Алма-Ата: Наука, 1984. – 448 с.
33. Насиров Р.Н., Солодовников С.П., Якуцени С.П. Сопоставление результатов определения ванадия в нефтях методами ЭПР и ФРРА // Нефтяное хозяйство. – 1992. – № 10. – С. 27-28.
34. Неорганическая химия / под ред. акад. Д. Третьякова. Том 3. Химия переходных элементов. Книга 1. – М.: Академия, 2007. – 352 с.
35. Несмиянов А.Н., Несмиянов Н.А. Начала органической химии. – М.: Химия, 1970. – Т. 2. – 824 с.
36. Николаев А.Я. Биологическая химия. – М.: МИА, 2001. – 496 с.
37. Озерова Н.А. Ртуть как индикатор участия мантийных флюидов в формировании ртутьсодержащих углеводородных месторождений. Современное состояние теории происхождения, методов прогнозирования и технологий поисков глубинной нефти. 1-е Кудрявцевские чтения. Материалы Всероссийской конференции по глубинному генезису нефти. – М.: ЦГЭ, 2012. – С. 339.
38. Петров А.А., Бальян Х.В., Трошенко А.Т. Органическая химия: учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1981. – 592 с.
39. Рюмин А.А., Копятевич М.С., Грибков В.В. О типизации ванадиеносных нефтей // Геология нефти и газа. – 1989. – № 6.
40. Симонян Г.С. Влияние азота на глубинный цикл углевода при генезисе нефти. // Международная конференция «Каталитические процессы нефтепереработки, нефтехимии и экологии», октябрь 2013, Ташкент, Республика Узбекистан: сборник тезисов докладов. – Новосибирск: Изд-во Института катализа СО РАН, 2013. – С. 136.
41. Симонян Г.С. Новый возможный путь образования нефти // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 4. – С. 175-176.
42. Симонян Г.С. Перспективы получения металлов из нефти // Инновационные технологии и проекты в горно-металлургическом комплексе, их научное и кадровое сопровождение: сборник трудов Международной научно-практической конференции. – Алматы: КазНТУ, 2014. – С. 446-449.
43. Симонян Г.С. Роль мантийного азота в нефтеобразовании. 2-е Кудрявцевские Чтения. Материалы Всероссийской конференции по глубинному генезису нефти и газа. – М.: ЦГЭ, 2013. – С. 293-296.
44. Симонян Г.С. Роль металлопорфиринов никеля и ванадия в абиогенном образовании нефти // Современные наукоемкие технологии. – 2015. – № 9. – С. 82-85.
45. Симонян Г.С. Роль порфиринов в генезисе нефти // Материалы международной научно-методической конференции: Интеграция науки и образования в вузах нефтегазового профиля, 2014. – Уфа: РИЦ УГНТУ, 2014. – С. 147-150.
46. Симонян Г.С. Экологические проблемы получения металлов из нефти. IV Международная конференция по химии и химической технологии: сборник материалов. – Ер.: Институт общей и неорганической химии НАН РА, 2015. – С. 270-272.
47. Симонян Г.С. Элементный и химический состав нефти. Техника и технологии XXI века: монография. Книга 4 / под общ. ред. И.Б. Красиной. – Ставрополь: Логос, 2015. – С. 170-189.
48. Симонян Г.С. Эндогенное образование ванадиевых руд и нафтидов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 5. – Ч. 2. – С. 273-276.
49. Симонян Г.С., Пирумян Г.П. Роль азота в генезисе нефти // Сборник научных трудов «Фундаментальные и прикладные проблемы науки». – №6. VIII Международный симпозиум по фундаментальным и прикладным проблемам науки. – М.: РАН, 2013. – С. 142-152.
50. Симонян Г.С., Пирумян Г.П. Роль азота в эндогенном образовании нефти. Современная наука: актуальные проблемы и перспективы развития: монография. Книга 4 / под ред. проф. Н.А. Тарасенко. – Ставрополь: Логос, 2014. – С. 84-100.
51. Соколов Б.А. Новые идеи в геологии нефти и газа. – М.: МГУ, 2001. – 480 с.
52. Соколов В.Д. Космическое происхождение битумов // Бюллетень МОИП. – VIII, нов. сер. – 1889.
53. Сорохтин О.Г., Ушаков С.А. Развитие Земли. – М.: МГУ, 2002. – 506 с.
54. Стил Дж.В., Этвуд Дж.Л. Супрамолекулярная химия / пер. с англ. – М.: ИКЦ Академия, 2007. – Т. 1. – 480 с.
55. Сыркин А.М., Мовсумзаде Э.М. Основы химии нефти и газа. – Уфа: УГНТУ, 2002. – 109 с.
56. Таубе П.Р., Баранова А.Г. Химия и микробиология воды. – М.: Высшая школа, 1983. – 263 с.
57. Те Л.А. Физико-химические исследования парамагнитных отложений Прикаспийской впадины: автореф. дис. ... канд. хим. наук. – Караганда, 2007. – 21 с.
58. Тимофеев Д.Н. Структура мантии Земли и синтез углеводородов в свете теории химических процессов // Глубинная нефть. – 2014. – Т. 2, № 9. – С. 1455-1469.
59. Тимофеев Д.Н. Силановая нефть и глобальные процессы трансформации Земли // Восьмые научные чтения Ю.П. Булашевича. Геодинамика, глубинное строение, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей. – Екатеринбург: ИГ УрО РАН, 2015. – С. 316-320.
60. Тимурзиев А.И. Современное состояние теории происхождения и практики поисков нефти: тезисы к созданию научной теории прогнозирования и поисков глубинной нефти. // Глубинная нефть. – 2013. – Т. 1, № 1. – С. 18-44.
61. Тимурзиев А.И. Мантийные очаги генерации углеводородов: геолого-физические признаки и прогнозно-поисковые критерии картирования; закономерности нефтегазоносности недр как отражение разгрузки в земной коре мантийных УВ-систем // Глубинная нефть. – 2013. – Т. 1, № 10. – С. 1498-1544. – URL: http://journal.deepoil.ru/images/stories/docs/DO-1-10-2013/5_Timurziev_1-10-2013.pdf
62. Чекалюк Э.Б. Нефть верхней мантии. – Киев: Науково думка, 1967. – 256 с.
63. Шило Н.А. Витватерсранд. Физика рудогенеза // Известия секции наук о земле РАЕН. – 2008. – Вып. 16. – С. 3-12.
64. Шумлянский В.А. Глубинные флюиды в рудообразовании амагматических областей Украины. Дегазация Земли и геотектоника: тезисы докладов III Весноюзн. совещ. – М.: Наука, 1991. – С. 32-34.
65. Эйгенсон А.С. О противостоянии двух концепций нефтегазообразования // Химия и технология топлив и масел. – 1998. – № 3. – С. 3-5.
66. Юркова Р.М. Мантийно-коревая серпентинизация ультрабазитов как источник углеводородных флюидов // Фундаментальный базис новых технологий нефтяной и газовой промышленности. – М.: ГЕОС, 2002. – С. 98-107.
67. Якуцени С.П. Распространенность углеводородного сырья, обогащенного тяжелыми элементами-примесями. Оценка экологических рисков. – СПб.: Недр, 2005. – 372 с.
68. Якуцени С.П. Глубинная зональность в обогащенности углеводородов тяжелыми элементами-примесями // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2010. – Т. 5, № 2. – URL: http://www.ngtp.ru/rub/7/30_2010.pdf
69. Dillion T., Jeanzol R. High pressure temperature phase of iron nitride: Preliminary results // Abstr. AGU Meet., San Francisco, Calif., Dec. 7-11, 1992. – Eos 1992. – V. 73, № 43. – P. 64.

УДК 553.96:66.04:661.183

НОВЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ НЕТОПЛИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА БУРЫХ И НЕКОНДИЦИОННЫХ УГЛЕЙ

Фазылов С.Д., Сатпаева Ж.Б., Нуркенов О.А., Карипова Г.Ж.,
Мулдахметов М.З., Животова Т.С., Мукашев А.Б.

*Институт органического синтеза и углехимии Республики Казахстан, Караганда,
e-mail: nurkenov_oral@mail.ru*

Рассмотрены основные направления комплексного химико-технологического подхода в нетопливном использовании химического потенциала бурых и некондиционных углей. Описаны экстракционные методы получения широкого класса химических веществ, которые могут использовать в различных отраслях промышленности. Отказ от применения высоких температур и пиролиза при переработке твердых горючих ископаемых методом экстракции способствует наибольшей сохранности природного потенциала углей, исключает термическое разрушение целевых продуктов – гуминовых веществ, восков, смол и др. Подробно рассмотрены наиболее важные углепродукты, получаемые экстракционным способом из бурых и некондиционных углей. Показано, что количество и состав переходящих в раствор целевых органических компонентов может изменяться в широких пределах в зависимости от природы исходного угля, типа растворителя и условий предварительной подготовки сырья.

Ключевые слова: бурый уголь, гуминовые вещества, удобрения, стимуляторы роста растений, углещелочной реагент, горный воск, сорбенты.

NEW PROSPECTS OF NON-FUEL USE OF CHEMICAL POTENTIAL OF BROWN AND SUBSTANDARD COAL

Fazylov S.D., Satpaeva Zh.B., Nurkenov O.A., Karipova G.Zh.,
Muldakhmetov M.Z., Zhivotova T.S., Mukashev A.B.

*Institute of Organic Synthesis and Coal Chemistry of the Republic of Kazakhstan, Karaganda,
e-mail: nurkenov_oral@mail.ru*

The main directions of complex chemical-technological approach in the fuel use of the chemical potential of brown coal and sub-standard are studied. This paper describes the extraction methods for a broad class of chemicals that can be used in various industries. Elimination of high temperatures and pyrolysis in the processing of raw solid fuels through the use of extraction method promotes maximum preservation of the natural potential of coal, and eliminates thermal destruction of target products – humic substances, waxes, resins, etc. The most important coal products obtained by the extraction method of brown and off-grade coal are studied in great detail. It is shown that the number and composition of the target organic components that pass into solution may vary within wide limits depending on the nature of the raw coal, the type of solvent and the preconditioning of raw materials.

Keywords: lignite, humic substances, fertilizers, plant growth stimulants, lignin-alkaline reagent, mineral wax, sorbents.

В настоящее время мировое сообщество осознало необходимость поиска новых энергохимических источников в связи с приближающимся исчерпанием нефтяных ресурсов нашей Планеты. Поэтому наряду с поиском альтернативных источников топлива и энергии заслуживают особого внимания вопросы использования ресурсов угля, как потенциального источника углеводородов, химических продуктов и водорода [25, 3, 18]. Основными угледобывающими странами в мире являются Германия, Россия, США, Австралия, Польша, Казахстан и Китай. Россия обладает обширной сырьевой базой углей, уступая по их количеству только США. Общие мировые ресурсы бурых углей оцениваются в 4.9 трлн.т. [25]. Однако в настоящее время только 1-2% добываемого угля используется непосредственно химической промышленностью,

15-20% потребляет металлургический комплекс и около 75-80% угля направляется на производство энергии.

Комплексный химико-технологический подход к освоению этих ископаемых обеспечивает получение широкого класса химических веществ, которые могут использовать в различных отраслях промышленности. Это обстоятельство должно вызывать значительный интерес к данным видам твердых горючих ископаемых не только как топливу, но и как к сырью для производства органических гуминовых удобрений [29], стимуляторов роста растений, структурообразователей почв [31], горного воска (монтан-воск) [26], красителей, стабилизаторов и разжижителей буровых растворов в нефтехимии [17], композиционного жидкого топлива из низкосортного угля («Термоугля») [21], разнообразных материалов для

бытовой химии и химической технологии [4]. Эти направления нетопливного использования углей основаны на способности компонентов бурых углей экстрагироваться различными растворителями (водой и органическими растворителями). Отказ от применения высоких температур и пиролиза при переработке твердых горючих ископаемых методом экстракции способствует наибольшей сохранности природного потенциала углей, исключает термическое разрушение целевых продуктов – гуминовых веществ, восков, смол и др. При этом количество и состав переходящих в раствор целевых органических компонентов может изменяться в широких пределах в зависимости от природы исходного угля, типа растворителя и условий предварительной подготовки сырья.

Наряду с исследованием состава и структуры угля важнейшими задачами углехимии являются усовершенствование известных и создание новых процессов получения различных продуктов из угля. Такие задачи могут быть решены за счет модифицирующей обработки углей, способствующей повышению выхода и качества продуктов. Согласно данным [19, 30], предварительная обработка углей некоторыми химическими реагентами или использование методов физического воздействия приводит к изменению их состава, структуры и увеличению выхода низкомолекулярных продуктов в ходе их переработки. Известен ряд различных физических методов активации углей, например, вальцевание, перетирание и другие воздействия с приложением сдвиговых усилий; дробление, измельчение как результат сравнительно высокочастотного механического удара [7]; ультразвуковые колебания в жидких средах; фазовые превращения (криолиз), электрогидравлический удар в жидких средах, облучение и др. [3].

Среди эффективных химических методов модифицирования, позволяющих повысить реакционную способность угля, выделяются: алкилирование, сольватация растворителями, окислительная и кислотная обработка [3, 22]. Обработка минеральными кислотами приводит к деминерализации углей. Последние могут найти применение в качестве реакционно- способного сырья для переработки в жидкие топлива [21], ценные органические вещества и углеродные (сорбентные) материалы. Согласно ис-

следованию [33], обработка углей раствором соляной кислоты приводила к изменению распределения размера пор по объему за счет образования пустот в угольной матрице в ходе частичного удаления дискретных минералов. Одновременно с деминерализацией происходит увеличение содержания гидроксильных и карбоксильных групп. Ниже более подробно остановимся на наиболее важных углепродуктах, получаемых экстракционным способом из бурых и некондиционных углей.

Гуминовые вещества

Бурые угли, окисленные и выветрившиеся каменные угли низкой степени метаморфизма, содержат до 70-75% гуминовых веществ. В химическом плане гуминовые вещества представляют собой сложную смесь высокомолекулярных и полифункциональных соединений алициклической, гидроароматической, ароматической и гетероциклической природы, включающих непредельные связи с различными функциональными группами [10, 11]. В основе получения гуминовых удобрений и препаратов из углей лежит свойство гуминовых кислот каустобиолитов образовывать водорастворимые соли. Наиболее распространенным методом получения гуминовых удобрений и препаратов является «выщелачивание» гуминовых веществ из ископаемого сырья с образованием водорастворимых солей с натрием, калием и аммонием. Поэтому их используют в качестве стимуляторов роста для опрыскивания семян, посевов, замачивания клубней и черенков. При применении гуминовых удобрений происходит сокращение сроков созревания на 10-15 дней, увеличение урожайности на 10-15%.

Гуминовые препараты содержат высокое количество углерода, однако в их составе содержание основных питательных элементов – азота, фосфора и калия очень незначительно. Поэтому, говорить о них, как об источнике NPK не приходится. Следовательно, природа положительного влияния этих удобрений на рост и развитие растений и почвенное плодородие иная. Установлено, что применение гуминовых удобрений существенно изменяет условия почвенного питания растений, повышая капиллярную влагоемкость почв и вызывая активное усиление процессов мобилизации питательных веществ в усвояемой для растений форме [23].

Для повышения питательности ценности гуминовых веществ в настоящее время многие предприятия России и др. стран стали выпускать гуматизированные органоминеральные удобрения. Они представляют собой модифицированные гуминовыми веществами стандартные минеральные удобрения (карбамид, аммиачная селитра, суперфосфат, аммофос и др.). Например, НПО «Реализация экологических технологий» (г. Санкт-Петербург) в качестве гуминового компонента использует гуминовый препарат, известный на рынке как «Лигногумат». «Препараты «Гумат универсал», «Гумат+7» «Гумат-80», выпускаемые Иркутской фирмой, характеризуются оптимальным соотношением основных элементов питания, высоким содержанием гумата, а также наличием в составе различных микроэлементов [28, 12].

Углекислотный реагент

Реагент представляет собой продукт взаимодействия измельченного бурого угля с содой каустической или едким калием (гуматы натрия или калия). Массовая доля гумата натрия или калия (в расчете на сухую массу) в УЩР составляет 33-42%, остальная часть – балластный угольный остаток, глина. УЩР производятся также с добавками полимерных материалов, например сополимеров марки «Полиплас» и другие высокомолекулярные полимеры акрилового ряда [15, 16].

Реагент углекислотный натриевый или калиевый предназначается для обработки буровых растворов с целью уменьшения показателей фильтрации, ингибирования и улучшения реологических свойств. Обладая многофункциональными свойствами, является интенсивным пептизатором твердой фазы, особенно глинистой, эффективным понизителем вязкости, эмульгатором и реагентом-регулятором рН.

Впервые углекислотные реагенты (УЩР) были применены для обработки растворов, используемых в буровой технике, взамен карбоксилметилцеллюлозы и других дорогостоящих химических продуктов. При обработке УЩР глинистых промысловых жидкостей ускоряется прохождение скважин, предотвращаются отвалы и набухание пластов, уменьшается фильтрация жидкой фазы. В этом отношении УЩР обладают существенным преимуществом по сравнению с другими реагентами. Они способны в те-

чение 30 мин снизить водоотдачу промысловых жидкостей до 5 см³ даже в условиях применения морской воды и мало коллоидных глин, которые в необработанном виде имеют водоотдачу свыше 30 см³. Благодаря этому УЩР широко применяют на морских промыслах [15, 16, 32]. Основным недостатком УЩР является большая чувствительность к действию агрессивных ионов, т.е. при высокой минерализации среды, происходит выпадение твердой дисперсной фазы и возрастание показателя фильтрации. Самым эффективным является УЩР, который содержит 13% бурого угля и 2% каустика.

Сырой буроугольный воск

Сырой буроугольный воск (синонимы: горный воск, монтан-воск, битум-А). Одним из основных продуктов экстракционной обработки низкосортных углей является горный воск. Крупнейший производитель восков в мире – Германия, выпускает до 50 тыс. т восков в год, что составляет 80% мирового производства. В Бразилии ежегодно производится 10 тыс. т этого продукта, который производится из карнаубской пальмы [13].

В России и других угольных странах, в том числе и Казахстане, воски не производятся, хотя их дефицит в стране, по экспертным оценкам составляет около 5 тыс. т в год. Сырой буроугольный воск, извлекаемый из битуминозных бурых углей путем экстракции органическими растворителями (бензол, толуол, спирты и др.), представляет собой смесь собственно восковых компонентов и смол.

В зависимости от способа извлечения различают «битум А», извлекаемый холодным или кипящим растворителем при нормальном давлении, «битум Б», извлекаемый растворителями при повышенной температуре и давлении, «битум С», полученный из сырья, освобожденного от «битума А» и обработанного соляной кислотой. Собственно, битумами общепринято считать только «битум А». Количественный выход сырого воска (битум А) из угля, выраженный в процентах к массе угля, обозначается термином «битуминозность». Содержание восковых и смоляных составляющих в битуме колеблется в широких пределах в зависимости от многих факторов – применяемых при экстракции растворителей, условий экстракции, видов сырья и др. [20]. Восковая

часть продукта представлена главным образом, сложными эфирами высших жирных одноосновных кислот (C_1 - C_{32} и выше) и высокомолекулярных одноатомных, редко – двухатомных спиртов с четным числом атомов углерода. В зависимости от природы объекта, из которого извлекался воск, а также параметров экстракции химический состав восковой части и смол может изменяться в широком диапазоне. Все видовое многообразие восков по производственному критерию можно свести к следующим основным типам:

- исходные или сырые воски, представляющие собой экстракты, извлеченные органическими растворителями из бурого угля;

- обессмоленные воски, полученные путем удаления из сырых восков смолистой части;

- рафинированные воски, т.е. осветленные, полученные удалением пигментных веществ из обессмоленных восков;

- этерифицированные воски, полученные путем этерификации рафинированных восков моно-, и ди- или полиатомными спиртами или их смесями.

Внешний вид и физические свойства битумов различны. Они могут иметь желтую, светло-коричневую, бурую или почти черную окраску. Одни из них твердые и хрупкие, другие – аморфные порошки, а третьи – маслянистые и смолоподобные продукты разной вязкости [5].

Благодаря ряду ценных свойств горный воск и продукты его переработки применяются более чем в 200 отраслях промышленности: в литейном производстве, в изготовлении полирующих и защитных композитов для различных покрытий, в бумажной, кожевенной промышленности, в косметике, медицине, в бытовой химии и многих других. Стоимость одной тонны горного воска-сырца достаточно высока и составляет около 3000 евро [6]. По мере переработки сырого воска в более квалифицированные продукты – обессмоленные, рафинированные, этерифицированные воски – его стоимость значительно увеличивается.

Для приемлемой экономической эффективности угольное сырье должно иметь битуминозность выше 6-6,5%. Для повышения извлечения восков из бурых углей применяют различные растворители или их смеси, а также выше отмеченные методы физико-химического воздействия. Все эти

методы ориентированы на традиционный вид сырья – высокобитуминозные бурые угли и не дают возможности вовлечь в переработку их низкобитуминозные виды. Смолистые вещества, являющиеся отходом обессмоленного воска, могут найти применение в производстве антикоррозионных покрытий, антиокислительных и полифункциональных присадок к смазочным маслам, в качестве флотореагентов [14, 27].

Сорбционные материалы

Ископаемые угли являются уникальным сырьем для получения адсорбентов, т.к. вся их масса пронизана развитой системой пор, образующихся в процессе углефикации и имеющих различные размеры. После извлечения битумов по существующей технологии экстракцией органическими растворителями, остается значительное количество проэкстрагированного угля, который далее может направляться на получение сорбентных материалов. Наличие карбоксильных и фенольных групп в структуре гуминовых кислот обеспечивает образование прочных комплексов этих кислот с ионами металлов, в том числе с ионами тяжелых металлов. Поэтому представляется возможным использовать их в качестве сорбентов для очистки сточных вод и детоксикации почв от ионов тяжелых металлов. Ионы Cu^{2+} , Ni^{2+} и Zn^{2+} относятся к ярко выраженным комплексообразователям и помимо замещения Na^+ , K^+ и NH_4^+ в карбоксильных группах образуют координационные связи с другими группами (амино- и метоксигруппы, эфирный кислород и т.д.) – донорами электронов, присутствующими в структуре гуминовых кислот. При взаимодействии катионов железа с гуматами достигается высокая степень очистки воды (до 99%), тогда как катионы меди, никеля и цинка связываются с гуматами слабее (до 80%) [8].

Для повышения механической прочности, кислото-, водостойкости и сорбционной емкости гуматсодержащие материалы подвергают обработке различными реагентами; силикатом натрия, желирующими полимерами (желатином, поливиниловым спиртом и др.) [24]. Исследованы кислотные и сорбционные свойства полимерных комплексов гумата натрия и его амино- и нитропроизводных с казеинатом натрия, полиакриламидом, мочевино- и триазиноформальдегидными смолами по отношению к ионам меди, никеля и свинца [1]. Полимер-

ные комплексы экстракционных гуминовых соединений приобретают в сравнении с исходными компонентами нерастворимость в воде, стойкость к щелочным и кислотным растворам, способность к водопоглощению и удерживанию воды в массе, огнестойкость, более высокие сорбционные свойства по отношению к ионам переходных металлов (от 70 до 95%) [2, 9].

В настоящее время в развитых странах производят и используют до 300-400 г сорбентов на одного человека в год. Потребность в углеродных сорбентах исчисляется сотнями тысяч тонн.

Основными производителями и поставщиками сорбентных материалов на мировом рынке являются иностранные компании ChemvironCarbon, Norit, SutcliffeSpeakmanCarbon и др. С учетом, что стоимость 1 тонны углеродных сорбентов на мировом рынке достигает 2-4 тыс. долларов, можно отметить об экономической эффективности нетопливного использования ископаемых углей.

Таким образом, из анализа научной литературы можно отметить следующие перспективные направления нетопливного использования химического потенциала бурых и некондиционных углей:

- биостимуляторов для сельского хозяйства, как для растениеводства, так и для животноводства;

- гуминовых удобрений и структурообразователей почв;

- сорбционных и ионообменных препаратов, которые представляют практический интерес в качестве сорбентов металлов из сточных вод, при дезактивации радиоактивных вод, для извлечения металлов из бедных руд,

- реагентов для регулирования реологических свойств водных суспензий и растворов;

- красителей для древесины, картона и технической бумаги.

Комплексная химико-технологическая переработка бурого угля позволит получать из низкосортного сырья с высокой рентабельностью много ценных продуктов, возможно изготовление очень широкого класса новых химических материалов. Такой комплексный подход полной квалифицированной переработки сырья позволяет значительно улучшить технико-экономические показатели всего процесса.

Список литературы

1. Аккулова З.Г., Амирханова А.К., Жакина А.Х., Утегенова А.С. Новые гуминовые сорбенты для очистки минерализованных вод угольных шахт // Химический журнал Казахстана. – 2010. – №3. – С. 254-258.
2. Амирханова А.К., Аккулова З.Г., Валитов Д.А. Крахмал-гуматные полимерные комплексы // Известия НТО «Казах». – 2010. – №3(28). – С. 15-19.
3. Антонок С.Н., Кравченко В.В., Федорова Г.А., Томиленко А.С., Лулева Т.Г., Федоров А.М. Комплексная переработка бурых углей с получением восков и углеродных адсорбентов. Сообщение 1. Получение восков // Вестник МИТХТ. – 2014. – Т.9, №1. – С. 53-58.
4. Аронов С.Г., Нестеренко Л.Л. Химия твердых горючих ископаемых. – Харьков: Изд-во Харьковского госуниверситета, 1960. – 371 с.
5. Белькевич П.И., Голованов Н.Г. Воск и его технические аналоги. – Минск: Наука и техника, 1980. – С. 17.
6. Белькевич П.И., Голованов Н.Г. Битумы торфа и бурого угля. – Минск: Наука и техника, 1989. – 128 с.
7. Болдырев В.В. Механохимия и механохимическая активация твердых веществ // Успехи химии. – 2006. – Т. 75, № 3. – С. 203-226.
8. Будаева А.Д., Золтоев Е.В., Бодоев Н.В., Бальбурова Т.А. Сорбция ионов тяжелых металлов гуматами аммония, натрия и калия // Фундаментальные исследования. – 2005. – № 9. – С. 112-113.
9. Валитов Д.А., Саликова Н.С., Жолболсынова А.С., Аккулова З.Г., Амирханова А.К. Структурирование и реологические свойства водных растворов казеината натрия, модифицированного гуматом натрия // Известия НАН РК. Сер. хим. – 2010. – №4. – С. 6-9.
10. Гороява А.И., Орлов Д.С., Щербенко О.В. Гуминовые вещества. – Киев: Наук. Думка, 1995. – 304 с.
11. Гуминовые вещества в биосфере / под ред. Д.С. Орлова. – М.: Наука, 1993. – 238 с.
12. Джусипбеков У.Ж., Нургалиева Г.О., Баяхметова З.К., Масакбаева К.Ж., Мырзахметова Н.О. Определение агрохимической эффективности новых видов удобрительных продуктов на основе фосфогипса и гумата натрия // Химический журнал Казахстана. – 2013. – №1. – С. 56-62.
13. Жеребцов С.И. Экстракционные технологии и продукты переработки бурых и некондиционных углей // Уголь. – 2007. – № 9. – С. 30-34.
14. Зеленин Н.И., Никитин Е.Е., Тер-Акопян Л.Д. Экстракционные смолы твердых топлив как присадки к маслам // Тезисы докл. республ. научно-техн. совещания. – Минск, 1980. – С. 136-137.
15. Князова А.С., Кидалов Н.А., Голованчиков А.В. Корреляционный анализ экспериментальных данных по реологии водно-глинистых суспензий с добавлением углещелочного реагента (УЩР) // Известия волгоградского государственного технического университета. – 2014. – Т. 20, № 6(133). – С. 11-14.
16. Князова А.С., Кидалов Н.А., Голованчиков А.В. Реологические свойства и гидродинамика в трубопроводах водно-глинистых суспензий с добавлением углещелочного реагента для формовочных смесей // Известия волгоградского государственного технического университета. – 2014. – Т. 7, № 1(128). – С. 69-71.
17. Коробецкий И.А. Уголь – химическое сырье XXI века // ТЭЖ и ресурсы Кузбасса. – 2007. – № 3. – С. 32.
18. Кричко А.А., Лебедев В.В., Фарберов И.Л. Нетопливное использование углей. – М.: Недра, 1978. – 215 с.
19. Липович В.Г. Химия и переработка угля. – М.: Химия, 1988. – 336 с.

20. Мальцев С.Г. Определение выхода бензольного экстракта из бурого угля. Методические указания по выполнению лабораторных работ по курсу «Химическая технология первичной и глубокой переработки нефти и газа» специальности 240403 «Химическая технология природных энергоносителей и углеродных материалов». – Томск, 2008.
21. Николаева С.В., Латыпова Ф.Н., Шавшукова С.Ю. Современные процессы переработки угля // Башкирский химический журнал. – 2009. – Том 16, № 3. – С. 122-125.
22. Олбрайт Л.Ф., Голдсби А.Р. Алкилирование. Исследования и промышленное оформление процесса. – М.: Химия, 1982. – 324 с.
23. Орлов Д.С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. – М: Изд-во МГУ, 1990. – 325 с.
24. Патент РФ 2455062. Способ получения сорбента для сорбции тяжелых металлов / Дунин-Барковский Р. – Л.: опубл. 10.07.2012. бюлл. №12.
25. Плакиткина Л.С. Анализ развития угольной промышленности в основных странах мира // Горная промышленность. – 2011. – № 2. – С. 18-29.
26. Родэ В.В., Жарова М.Н., Костюк В.А. и др. Основные проблемы получения и использования буроугольного воска // Химия твердого топлива. – 1974. – № 6. – С. 105-118.
27. Родэ В.В., Новаковский Е.М. Получение горного воска из битуминозных бурых углей // Химия твердого топлива. – 1995. – № 3. – С. 43-49.
28. Умаров Т.Ж., Победоносцева О.И., Беглов Б.М. Получение комплексного фосфорно-азотно-гуматного удобрения под названием Фагум // Химическая промышленность. – 2004. – № 6. – С. 313-316.
29. Хитрова В.И. Действие органо-минерального удобрения гумат «Плодородие» на урожай и качество яровой пшеницы // Агрехимический вестник. – 2010. – № 5. – С. 36-37.
30. Хренкова Т.М. Механохимическая активация углей. – М: Недра, 1993. – 176 с.
31. Царёва Л., Кудашкин А. Влияние сроков окучевания и «Гумата+7» на урожайность картофеля // Главный агроном. – 2012. – № 5. – С. 43-45.
32. Шумейко М.В. Производство углещелочных реагентов и гуминовых стимуляторов роста растений // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2008. – № 10. – С. 373-376.
33. Zhang H., Mo Y., Sun M. The influence of acid treatment on structure and property of coals / Proceed. Int. Conf. Coal Sci. & Technol. – Okinawa, Japan, 2005. – P. 102-104.

УДК 532.542.2

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР РАБОТ ПО МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ, НА ПРИМЕРЕ СИСТЕМ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ

Юлдашев Б.Э.

*Центр по разработке программных продуктов и аппаратно-программных комплексов
при Ташкентском университете информационных технологий, Ангрен,
e-mail: baxrom@rambler.ru*

Высокие темпы развития строительства трубопроводных систем городов и сельских населенных пунктов Республики Узбекистан для обеспечения потребности в жидких и газообразных продуктах, ставит задачу о необходимости построения адекватной системы управления, разработке четкой концепции совершенствования его форм и методов, позволяющих эффективно решать социально-экономические задачи. Именно поэтому, правительство Республики Узбекистан особое внимание уделяет разработке комплексных программ совершенствования управления, формированию экономического хозяйствования, развитию хозяйственного расчета и методов руководства, модернизации организационных структур, связанных с обеспечением населения целевым продуктом. Это, в свою очередь, требует строительство новых и реконструкции существующих сетей, что требует значительные капитальные вложения. Поэтому одной из актуальных проблем является решение вопросов бесперебойной и надежной эксплуатации объектов. В данной статье проведен анализ изучения истории развития исследования методов гидрогазодинамического расчета простых и сложных трубопроводов и информатизации систем газоснабжения. В ней приведены основные особенности математического и программного обеспечения жизненного цикла газотранспортной сети и относящейся к ней информации, методы расчета закольцованной сети газопровода.

Ключевые слова. Гидравлический расчет; подвод; отбор; кольцевая и лучевая сети; модель; программный комплекс, информатизация систем газоснабжения, математическое моделирование.

ANALITICAL REVIEW OF THE WORK ON MATHEMATICAL MODELING OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS ON THE EXAMPLE OF GAS SUPPLY SYSTEMS

Yuldashev B.E.

*Centre for the development of software products and hardware-software complexes
at the Tashkent University of Information Technologies, Angren,
e-mail: baxrom@rambler.ru*

High growth rates in the construction of piping systems in urban and rural settlements of the Republic of Uzbekistan for the need for liquid and gaseous products, puts the problem of the need to build an adequate system of management, the development of a clear vision of improving its forms and methods to effectively solve social and economic problems. That is why the Government of the Republic of Uzbekistan pays special attention to the development of comprehensive programs for improving the management, the formation of economic management, the development of cost accounting and management methods, modernization of organizational structures associated with the provision of the desired product. This, in turn, requires the construction of new and reconstruction of existing networks, which requires significant capital investment. Therefore, one of the pressing problems is to address the smooth and reliable operation of the facilities. This article analyzes the study of the history of the study of methods of calculation of hydro-simple and complex pipeline gas supply systems and information. It shows the main features of mathematical and software life cycle of the gas transmission network and related information, methods of calculation loopback network pipeline.

Keywords: Hydraulic calculation, supply, selection, ring and radial network model; software system, informatization of gas supply systems, mathematical modeling.

Введение

Высокие темпы развития строительства трубопроводных систем городов и сельских населенных пунктов Республики Узбекистан для обеспечения потребности в жидких и газообразных продуктах, ставит задачу о необходимости построения адекватной системы управления, разработке четкой концепции совершенствования его форм и методов, позволяющих эффективно решать социально-экономические задачи. Именно поэтому, правительство Республики Узбекистан особое внимание уделяет разработке

комплексных программ совершенствования управления, формированию экономического хозяйствования, развитию хозяйственного расчета и методов руководства, модернизации организационных структур, связанных с обеспечением населения целевым продуктом. Это, в свою очередь, требует строительство новых и реконструкции существующих сетей, что требует значительные капитальные вложения. Поэтому одной из актуальных проблем является решение вопросов бесперебойной и надежной эксплуатации объектов.

Перспективы капитального строительства Республики Узбекистан, благоустройства его территорий, улучшение экологических и бытовых условий, а также стремление к росту благосостояния населения привели к значительному увеличению потребления водных и топливно-энергетических ресурсов. Возрастающие объемы потребления и расхода ресурсов могут быть покрыты не только за счет проектирования и строительства новых сетей, сооружений и их реконструкции, но и за счет использования резервов мощностей, правильной эксплуатации и эффективным управлением, существующим промыслов, магистральных газопроводов и подземных хранилищ газа и резервуаров, обеспечивающих неравномерность потребления целевых продуктов.

Анализ состояния, связанное с эксплуатацией и управлением трубопроводных систем Республики Узбекистан, показал, что в настоящее время ряд общетеоретических проблем исследован недостаточно; большинство населенных пунктов не обеспечены необходимым объемом питьевой воды, топливно-энергетическими ресурсами; промышленность слабо обеспечена контролирующими системами расхода воды, газа и топлива.

Трубопроводные сети подземных и надземных коммуникаций городов Узбекистана представляют собой сложную систему, нормальное функционирование которых требует решения большого круга научно-технических задач. Это связано со спецификой планировочной структуры городов, их историческим развитием, уровнем инженерного обеспечения, условиями рельефа местности, дефицитом топливно-энергетических и водных ресурсов.

Имеющиеся недостатки связаны, прежде всего, с отсутствием четкой, научно обоснованной концепции в практике проектирования, управления и эксплуатации инженерных систем.

Интенсификация работы трубопроводных систем, определение перспективы их развития с учетом урбанизации населенных пунктов, проведение работ по уточнению фактических нагрузок, поиск резервов и повышение эффективности при эксплуатации и управлении трубопроводными сетями, эффективность проектных работ для создаваемых, расширяемых и реконструируемых трубопроводных инженерных сетей, а также оперативное управление их функциони-

рованием в значительной мере зависят от адекватности и корректности используемых на всех этапах проектирования и эксплуатации математических моделей потокораспределения и организационно-экономических методов моделирования, являющихся базой для повышения эффективности функционирования и управления инженерных сетей.

Среди вопросов совершенствования эксплуатации и управления трубопроводными системами наиболее важной задачей является проектирование новых, реконструкция существующих инженерных сетей с учетом оптимального количества технологических объектов, мест размещения и зон обслуживания.

Нуждаются в более глубокой разработке проблемы планирования и экономического стимулирования отрасли коммунального хозяйства с учетом взаимосвязи со всей системой народнохозяйственного баланса республики.

В связи с этим разработку математических моделей, вычислительных алгоритмов и исследование компьютерных моделей в этом направлении представляется актуальной проблемой дальнейшего развития автоматизации научных исследований для различных предметных областей, в частности трубопроводных систем. С другой стороны актуальность исследований проблем по анализу состояния и функционирования трубопроводных систем (ТС) при различных условиях и в обеспечении потребности потребителей в целевом продукте в настоящее время весьма высока. Это связано со значительным количеством угроз нормального функционирования трубопроводных систем (изношенность оборудования, чрезмерная концентрация транспортных коммуникаций и т.д.).

В 1847 году вышла статья Г. Кирхгофа, где описан метод решения задачи о линейном распределении гальванического тока в многоконтурной электрической цепи.

По мнению историков науки, она послужила толчком формирования и развития теории графов, топологии, операционного исчисления, теории гидравлических цепей и других отраслей точной науки. Сформированные в этой статье две гипотезы, известные как два закона Кирхгофа, на сегодняшний день в том, или ином виде используются при моделировании трубопроводного транспорта нефти и газа, теплоснабжения, потоков транспортных средств и т.д.

Из-за отсутствия единой теоретической базы, аналогов закона Г. Ома, применимость законов Кирхгофа к гидравлическим системам теоретически была доказана позже – 30-е годы прошлого века. Публикации М.М. Андрияшева (1932), В.Г. Лобачева (1934) и Х. Кросса (1936) показали, что аналогом закона Ома при моделировании гидравлических цепей, может служить формула Дарси, которая для малосжимаемых жидкостей выражает линейную связь между перепадом давления и квадратом расхода в развитом турбулентном режиме течения. На основе применения данной формулы построена теория гидравлических цепей, что отражена в монографиях А.П. Меренкова, В.Я. Хасилева (1985) [1] и Е.В. Сенновой, В.Г. Сидлера (1987) [2]. Дальнейшее развитие данного направления непосредственно связано с развитием возможностей компьютерного парка и, в определенном смысле, новыми вычислительными способами.

При проектировании сети газопроводов с лучистой структурой, в частности, магистральных газопроводов широко используется метод коэффициента расхода [3], отражающий изменения пропускной способности отдельно взятого участка относительно эталонного газопровода. Данный метод, учитывающий параллельные и последовательные подключения участков в сети, обобщен для случаев концентрированного отбора газа и постоянного уклона отдельных участков [4]. С использованием обобщенного метода коэффициентов расхода решены отдельные задачи проектирования многониточных, многозвенных магистральных газопроводов с учетом концентрированных отборов газа.

При расчете многоконтурных сетей газопроводов аналогом метода коэффициента расхода служат законы Кирхгофа и замыкающие их соотношения между узловыми давлениями и участковыми расходами газа. Реализацией положения теории графов, общих для цепи постоянного электрического тока и трубопроводного транспорта, достигаются решения многочисленных практических задач. Тем не менее, большие размеры, в тоже время разреженность матриц инцидентий и базисных контуров требуют разработки более тонких экономичных алгоритмов построения основных матриц, основных деревьев и фундаментальных контуров сети и решения системы смешанных уравнений.

Используемые при решении задач методы Лобачева-Кросса, Выханду, верхней релаксации и комбинированные методы зачастую не сходятся [2]. Причиной тому, по нашему мнению, наряду с многомерностью искомым и неверным заданием начальных данных, может быть образование нештатных ситуаций, связанные несогласованностью основных параметров. Первая из них выражается в нехватке потенциальной энергии подводов газа на преодоление силы сопротивления сети или для обеспечения необходимого наименьшего статистического давления в узлах отбора. Второй тип нештатной ситуации в сети образуется при наличии более одного узла подвода и выражается «давкой» подвода с меньшим давлением.

Математическое и информационное обеспечение газотранспортной сети. Особенности информации

Технический прогресс в различных областях народного хозяйства Республики Узбекистан в значительной мере зависит от степени использования средств автоматизации, информационных технологий и уровня автоматизации процессов управления. Вместе с тем возможности современных компьютерных систем и развитие математических методов моделирования используются далеко не полностью из-за неформализации многих задач, а также несовершенства или отсутствия ряда алгоритмов, обеспечивающих возможность произвести анализ функционирования объекта, обработать поступающую информацию и принять соответствующие решения по оптимальному управлению многосвязных систем.

В связи с этим разработка и исследование компьютерных моделей, вычислительных алгоритмов и на их основе создание объектно-ориентированных программных средств в этом направлении представляется актуальной проблемой дальнейшего развития автоматизации научных исследований для различных предметных областей, в частности трубопроводных систем. С другой стороны актуальность исследований проблем по анализу состояния и функционирования трубопроводных систем (ТС) при различных условиях, а также определения их «узких мест» в обеспечении потребности потребителей в целевом продукте в настоящее время весьма высока. Это связано со значительным количеством угроз нор-

мального функционирования трубопроводных систем (изношенность оборудования, чрезмерная концентрация транспортных коммуникаций, политические акции и т.д.). Под «узким местом» мы понимаем тот элемент системы, который ограничивает производственные возможности данной системы. При этом «узкое место» представляет собой не обязательно сам аварийный элемент, но узел или транспортную дугу, ограничивающую манёвр по переадресации потоков целевого продукта для удовлетворения потребителя.

Под **компьютерными моделями** здесь понимаются модели, реализованные в определённой программной среде. При моделировании физических и технологических процессов на ПЭВМ экспериментатору необходимо иметь представление о классах программных средств, их назначении, инструментарии и приёмах работы. Это знание позволяет при наличии информации об объекте, разработать информационную модель и преобразовать её в компьютерную модель объекта. Тогда на базе этих моделей можно путём проведения вычислительных экспериментов определить оптимальные параметры, значимые факторы, а также дать анализ статических и динамических процессов, происходящих в действующем объекте с последующим прогнозированием его состояния и оптимальным управлением.

В настоящее время опубликованы решения многих локальных задач, касающихся в частности гидравлики, оптимизации, надёжности объектов. Однако в глобальном масштабе все вопросы создания и решения отдельных задач без систематизации и без учёта реальных факторов по оптимальному функционированию и управлению трубопроводных систем остаются одной из глобальных проблем дальнейшего развития науки и техники.

Поэтому необходимым становятся автоматизации научных исследований для решения глобальных проблем, имеющих наиболее актуальные значения, и построение удобных для работы специалистов инструментария, работающих в данной предметной области. При решении практических задач во многих областях человеческой деятельности бывает затруднительно, а то и просто невозможно использовать формализованные и теоретически обоснованные методы. Так, например, при построении топологии трубопроводных систем, изменение

гидравлических, экономических параметров, режимов работы и др.

При решении этих задач в целом необходимо использовать опыт и интуицию специалиста, работающего в данной предметной области. Опыт и интуиция специалиста при решении сложной задачи формируются в большинстве случаев в процессе многолетней интенсивной работы в данной предметной области и являются одним из основополагающих элементов как база знаний для формализации и математического моделирования сложных динамических процессов, происходящих в трубопроводных системах.

Предстоит решение непростых вопросов, на которые необходимо ответить сегодня, чтобы знать, по каким направлениям двигаться завтра. Для этого следует обосновать выбор адекватных моделей, математических методов, вычислительных алгоритмов и соответствующих программных средств, позволяющих анализировать сложные динамические процессы, происходящие в трубопроводных системах.

Наши исследования, проведённые в предыдущих годах, а также участие и публикации в трудах международных форумов убеждают нас в том, что современные требования к автоматизации научных исследований, проектирования, реконструкции, анализа и управления трубопроводных сетей определяют необходимость разработки нового подхода для решения актуальных проблем, возникающих при решении конкретных задач.

Развитие информационных технологий и различных сред программирования дают возможность создания компьютерных приложений на основе объектно-ориентированного программирования. Сущностью развиваемого подхода является разработка качественно нового подхода в рамках современных информационных технологий (база данных, сети, операционные системы).

Под **объектно-ориентированными программными комплексами** здесь понимаются программные комплексы, предназначенные для решения определенного класса прикладных задач конкретной предметной области и обеспечение пользователя максимально дружественным интерфейсом.

Такой подход, по нашему мнению, позволяет создать программные продукты, реализующие полученные математические модели, на современном технологическом

уровне, с удобным интерфейсом пользователя и возможностью стандартизации данных и успешной их пересылкой по компьютерным сетям.

Поэтому для специалистов в области трубопроводного транспорта целевого продукта необходимо создать удобный инструмент, с помощью которого можно будет проводить вычислительный эксперимент по анализу состояния функционирования, проектирования, реконструкции и управлению сложными процессами, происходящими в ТС включая технико-экономические показатели.

Одной из важнейших особенностей информационного обеспечения анализа функционирования, проектирования и реконструкции трубопроводных систем транспорта газа является сбор и подготовка информации и создание баз данных.

Ограничимся анализом особенностей типичного информационного поля на примере объектов городского газоснабжения.

Газопроводные сети (ГС) подземных и надземных коммуникаций городов представляют собой сложную систему, нормальное функционирование которой требует решения большого круга научно-технических задач. Это связано со спецификой планировочной структуры городов, их историческим развитием, уровнем инженерного обеспечения, наличием промышленных объектов, условиями рельефа местности, дефицитом топливно-энергетических ресурсов и другими факторами.

Оптимальное проектирование и управление трубопроводными сетями связано с необходимостью получения и обработки больших объемов информации, которая должна быть представлена в распоряжение разработчиков в виде осмысленных и объективных данных, основанных на собранной и правильно истолкованной информации, которая характеризует всё многообразие факторов, условий, требований, норм и показателей.

Всю необходимую информацию можно классифицировать по следующим основным признакам: источники поступления, содержательный смысл, форма представления, степень стабильности, место в системе, методы сбора и хранения.

Основными источниками поступления информации, относящиеся к ГС, являются:

- генеральные планы застройки города и проекты размещения строительства на перспективу;

- комплексные схемы трубопроводных систем городов на уровне мощностей источников, предусмотренных перспективным развитием;

- материалы обследования эксплуатируемых трубопроводных сетей городов;

- схемы существующих трубопроводных сетей.

Содержательный смысл информации можно разделить по следующим признакам: натуральные данные, расчётные данные, нормативные данные. К натуральным данным относятся: конфигурация сети, диаметры, уклоны, трассы, расходы и т.д. К расчётным данным относятся: существующие расходы при заданной нагрузке и скорости, максимальная пропускная способность, коэффициент сезонной или часовой неравномерности и нагрузки при отказе определенных участков и другие. В число нормативных данных входит наименьшие нормативные давления в узле подключения потребителя, допустимые диаметры толщины ГС и другие, предусматриваемые СНиПом и т.д. По форме представления информации можно разделить на табличные и графические.

В табличной форме представляются, например основные потребители и объемы потребления, существующие и полагаемые мощности ГРП, ГРС и другие. Они являются необходимой частью графически заданной топологии сети, представляющей собой систему большого взаимодействующего количества двухполюсных элементов двух типов – активных элементов и линий связи. Входами сети являются все её узловые вершины, через которые в сеть поступает целевой продукт, а выходами – все узловые вершины, через которые осуществляется отбор целевого продукта. К активным элементам ТС следует отнести газораспределительные пункты и газораспределительные станции. Линии связи, представляющие собой участки трубопровода, являются пассивными элементами, кроме того к пассивным элементам следует также отнести, компенсаторы, различные регулируемые и нерегулируемые задвижки и другие. Общий поток целевого продукта, подаваемый в сеть, равен суммарному потоку, потребляемому из сети.

Граф сети содержит n вершин и m дуг. Каждой реальной дуге i поставлен в соответствие активный или пассивный элемент и переменная величина – расход q_i . Каждой

j -ой вершине графа ставится в соответствие другая переменная величина – давление P_j . Совокупность величин $q_i (i=1, m)$ и $P_j (j=1, n)$ образует два вектора

$$\vec{q} = \{q_1, q_2, \dots, q_m\} \text{ и } \vec{P} = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$$

которые полностью определяют потоко-распределение в ТС.

По степени стабильности информация делится на два класса:

- 1) устойчивая по времени (диаметры, уклоны, материалы труб и т.д.);
- 2) переменная, изменяющаяся во времени (наполнение и расход, давление, напоры и т.д.).

В практических расчетах переменную информацию в определенных условиях можно заменить среднестатистическими показателями. Эти условия в работе Р.И. Хуррамовой [5] оцениваются через меры стабильности. Иначе объект рассматривается как динамически функционирующий, а математическая модель характеризуется как модель с распределенными параметрами. В этом случае можно отличить периодичность и переходность процессов.

Информацию по месту в системе можно представить как входную, промежуточную и выходную. Так, например, для решения задач анализа работы эксплуатируемых трубопроводных сетей входной информацией являются: конфигурация сети, диаметры, расходы, длины труб, материал труб и т.д. Выходной информацией являются гидравлические характеристики при различных режимах работы ТС.

Сбор данных о реальном состоянии трубопроводных сетей производится эксплуатационными организациями на основании дежурных планов инвентаризации сетей, проведения замеров, сбор и обработка статистических данных.

Информация о перспективных проработках берётся из генеральных планов развития жилищного строительства городов, комплексных схем развития трубопроводных сетей и планов социально-экономического развития.

Интенсивно меняются методы хранения информации: бумажные носители, перфокарты, магнитные и телеграфные ленты, магнитные барабаны, носители на основе полупроводников. Разнородность информации порождает определенные неудобства, которые сегодня не являются проблемой

при разработке и реализации объектно-ориентированных программ и компьютерных моделей.

Общая структура систем проектирования и реконструкции ТС и подготовка базы данных как это мы, представляем на рис. 1. Здесь же выделены структурные единицы, охватываемые программой «Конструктор».

Составляющие жизненного цикла газоснабжения, как объекты математического моделирования газодинамического состояния газопровода

Эксплуатацию современных трубопроводных систем нельзя представить без помощи современной компьютерной техники и информационных технологий [6], поскольку магистральные ТП имеют большую масштабность, динамично развиваются, концентрируются по мощности, повышается уровень централизации.

Годовая добыча природного газа в мире составляет более 2 трлн. нм^3 . Из них было 70 млрд. нм^3 добывается в Республике Узбекистан.

Природные газы можно разделить на 3 группы: тощие (или сухие, метановые; более тяжелые углеводороды содержатся менее 50 г/м^3), жирные (попутные; тяжелые углеводороды содержатся выше 150 г/м^3) газы и газоконденсаты (состоят из тощего газа и паров конденсата с C_5 – бензина, легроина, керосина) [7].

Наряду с природным газом в энергетике и в быту используют продукты сухой перегонки (например, коксовый газ) и генераторные газы (продукты мокрой перегонки) местного назначения. Данный способ использовали еще в конце XIX века и до сих пор используют в регионах, где добывается уголь.

Технологическая линия газоснабжения начинается из бурения скважины, стенки которой укрепляют стальными обсадными трубами кольцевой просвет, между которыми заливается бетоном. Газ из забоя к устью скважины движется по фонтанной трубе, где впервые ставится газодинамическая задача о гидравлическом расчете движения газа по фонтанной трубе. В инженерной практике расчет производится по формуле Адамова [8].

В работе Хужаева [9] предложено обобщение формулы Адамова с учетом постоянного температурного градиента Земли.

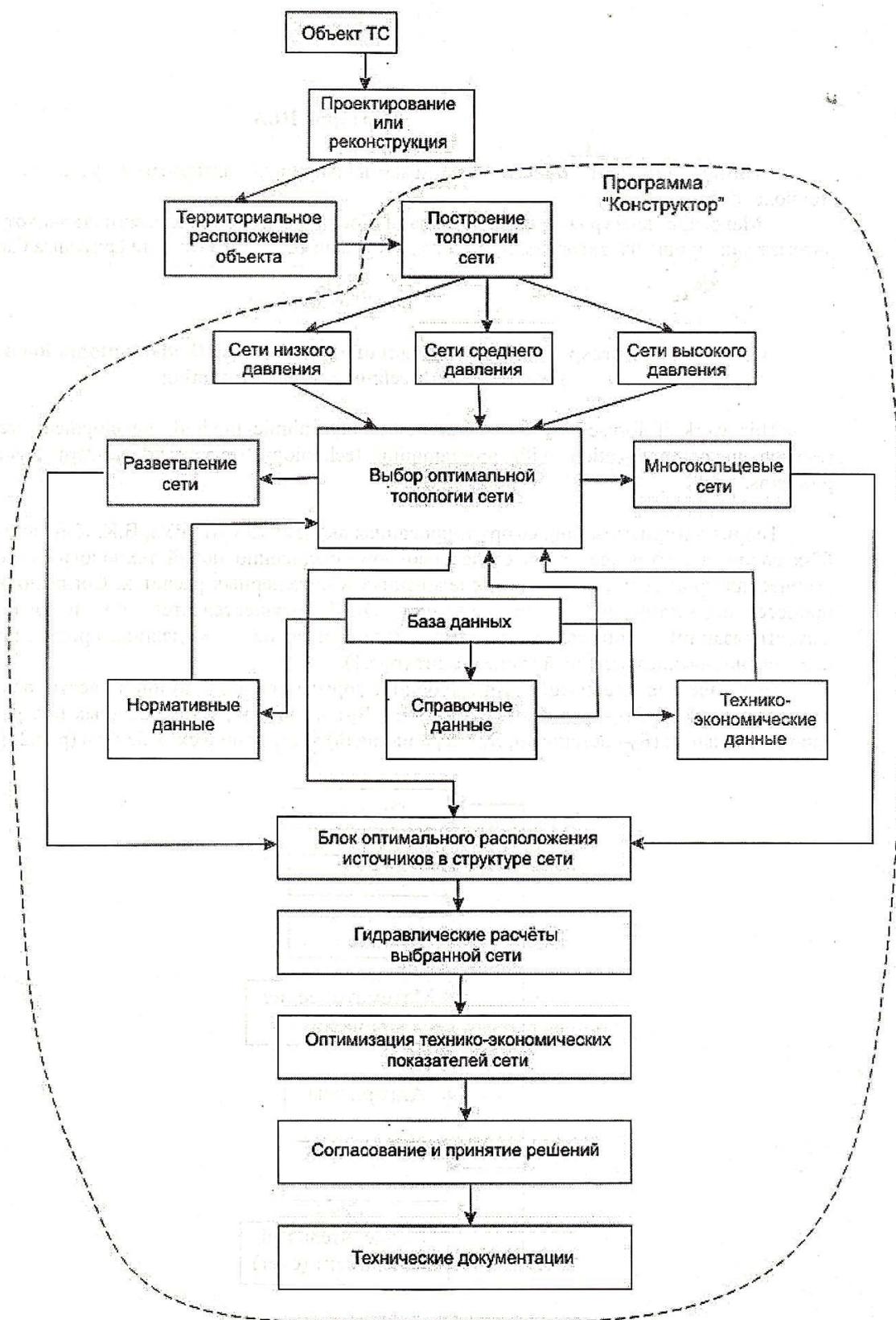


Рис. 1. Общая структура систем проектирования и реконструкции ТС

В работе Коротаяева [8] расположение скважин характеризуется как батарейное (по рядам), равномерное (по какой-либо правильной геометрической схеме), осевое или смешанное. Выбор расположения скважин осуществляется на основе технологических, технических, экономических и природных, геологических условий обеспечивающие равномерное падение давления в пластах долгое время, например без обводнений.

В ходе эксплуатации скважин придерживаются определенные режимы с постоянной депрессией, забойного давления, дебита скважины, скорости фильтрации на забое скважины. В зависимости от этих режимов формируется схема трубопроводной транспортировки газа до пункта переработки газа. По топологии внутри промысла схемы могут иметь линейную, лучевую, кольцевую и смешанную структуры. Сбор газа из промыслов осуществляется через газосборочные коллекторы. Расчет сети сбора газа проводится как с точки зрения гидравлики, так и по экономии приведенных затрат.

В ходе эксплуатации месторождений наблюдаются своеобразные изменения показателей. Пластовое давление и дебит постепенно падают, состав добываемых нефти, газа или газоконденсата смещается в сторону легких углеводородов.

При составлении плана размещения скважин и выбора оборудования, в основном, опираются на показатели начального периода эксплуатации промысла. Возможны варианты поэтапной обработки месторождения, когда сначала осваиваются верхние, а в дальнейшем нижние пласты. В этом случае в процессе проектирования учитываются изменения технологического процесса в перспективе, в частности, установки дожимных компрессорных станций (ДКС).

Целью использования ДКС являются: обеспечить рабочее давление, необходимое для доставки по магистрали до точки назначения; увеличение газоотдачи пласта путем понижения давления на всем пути движения газа; увеличение дебитов добывающих скважин (или депрессии) и увеличение технико-экономических показателей магистрального газопровода (МГ).

Выбор мощности КС, в том числе дожимных, осуществляется исходя их предполагаемого расхода газа: с увеличением объ-

ема транспортируемого газа общая потеря давления в сети увеличивается, а степень сжатия газа в КС уменьшается. Пересечение этих двух кривых изменения давления определяет необходимые параметры устанавливаемого КС.

Чтобы выделить тяжелые углеводороды, входящие в состав бензина, керосина и других, природный газ подвергается низкотемпературной сепарации (в условиях Республики Узбекистан 1-й, 2-й и 3-й ступени – до -160°C и ниже). В результате этого товарный газ становится сухим (тощий газ).

На дальние расстояния товарный газ транспортируется магистральным газопроводом, который, обычно, начинается из головной компрессорной станции.

Головная КС, а также дожимные КС представляют силовыми установками всей сети газопроводов с высоким, средним и низким рабочим давлением. КС состоит из нагнетателей газа с определенной компоновкой. Для изменения давления газа с массовым расходом M при компримировании отдельным нагнетателем используется формула:

$$P_{\text{вых}}^2 = aP_{\text{ex}}^2 + bM^2,$$

где $P_{\text{вых}}$, P_{ex} – давление в подпоре и на выкиде; a , b – эмпирические постоянные данного нагнетателя.

В работе [8] система уравнений установившегося режима течения в линейном участке газопровода принимается в виде

$$\begin{cases} \frac{dp}{dx} = \lambda \frac{\rho w^2}{2D} + \rho g \frac{dz}{dx} + \frac{d(\rho w^2)}{dx}, \\ \frac{d(\rho w)}{dx} = 0, \quad p = \rho ZRT. \end{cases}$$

Производительность линейного участка с длиной L через массовый расход газа определена формулой

$$M = \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{(P_{\text{н}}^2 - P_{\text{к}}^2) D^4}{ZRT \left(\lambda \frac{L}{D} + 2 \ln \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{к}}} \right)}}.$$

Она входит в серию формул [3, 11, 22], учитывающая возрастание кинетической энергии газа через слагаемое $2 \ln(P_{\text{н}}/P_{\text{к}})$. Данный фактор значителен для малой протяженности L и со значительным изменением давления по длине участка. В остальных случаях можно использовать для коммерческого расхода формулу [6, 8]:

$$Q = K \sqrt{\frac{(P_n^2 - P_k^2) D^5}{ZT\lambda L \bar{\rho}}}$$

где $\bar{\rho} = \rho_{\text{газ}} / \rho_{\text{возд}}$; K – коэффициент, учитывающий размерность единиц изменения показателей.

В литературе принято, что одноконтурный с постоянным диаметром газопровод считается простым, иначе он является сложным.

Гидравлический расчет сложного газопровода является предметом исследования многочисленных работ.

В работах [6], [10] ограничились приведением описания метода коэффициента расхода и способов реализации его при расчете параллельных и последовательных подключений газопроводов.

В работе [8] приведены упрощенные формулы для совместного расчета КС (с одно-, двух – и трехступенчатым сжатием) и МГ, позволяющие определить фактическую пропускную способность сети газопровода.

При разности геодезических отметок профиля трассы газопровода $\Delta z > 200$ м при гидравлическом расчете следует учитывать рельефность трассы. В работе [8] предлагается следующая формула для производительности к многозвенного перегона

$$M = \left(\frac{P_n^2 - P_k^2 (1 + aZ_k)}{bL(1 + \frac{a}{2L} \sum_{i=1}^k (z_i - z_{i-1}) l_i)} \right)^{\frac{1}{2}}$$

где $b = \frac{16ZRT}{\pi^2 D^5} \lambda$, $a = \frac{2g}{ZRT}$.

В работе [16] данная формула обобщена с учетом телескопичности многоконтурного газопровода и конечным числом узлов централизованного отбора/подкачек газа.

Значение коэффициента сверхжимаемости Z для линейного участка газопровода определяется по среднему значению давления на участке

$$P_{cp} = \frac{2}{3} \left(P_n + \frac{P_k^2}{P_n + P_k} \right)$$

Следует отметить, что в нашей работе Z имеет значение равной 1, если рассматривается газораспределительная сеть ($P_{cp} < 1,2$ МПа). При расчетах коллекторов сбора газа, коль-

цевых структур среднего и высокого давления ($P_{cp} \geq 1,2$ МПа) можно использовать уравнение Редлиха-Квонга, решение которого адекватно при большом интервале изменения статистического давления и температуры газа.

В работе [8] для определения коэффициента сопротивления предлагается пользоваться эмпирической формулой

$$\lambda_T = 0,067 \left(\frac{158}{Re} + \frac{2k}{D} \right)^{0,2}$$

которая уместна только в трех турбулентных режимах течения газа.

Здесь

$$Re = \frac{wD}{\nu} = \frac{wD\rho}{\mu}$$

– критерий Рейнольдса; ν, μ – коэффициенты кинематической и динамической вязкости газа; k – эквивалентная шероховатость живого сечения трубопровода.

Для расчета коэффициента сопротивления в работе [7], придерживаясь в рамках СНиП II-37-67, предлагается использовать формулы Стокса $\lambda = 64 / Re$ при $Re < 2000$, формулы $\lambda = 0,0025 Re^{1/3}$ при $2000 < Re < 4000$

и формулы ВНИИГаз $\lambda = 0,1 \left(\frac{k_s}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}$

при турбулентных режимах течения.

В работе [11] использован обобщенный коэффициент сопротивления Лейбензонна в виде кусочно-аппроксимационного одночлена.

Учет местного сопротивления арматуры при расчете МГ осуществляется использованием формулы $\lambda_{расч} = 1,05 \lambda_T$ при квадратичном законе сопротивления. При остальных режимах течения местное сопротивление учитывается с добавлением эквивалентной длины, соответствующей данной арматуре.

Для лучистой структуры сети газопроводов обсуждается метод путевого отбора газа, согласно которому общий объем отборов в узлах ГП распределяется по всему пути равномерно, вследствие чего перепад давления в сети низкого давления описывается формулой

$$\Delta p = aQ^2 L \left(1 - x + \frac{2n+1}{6n} x^2 \right)$$

где $x = Q_{пут} / Q$; n – количество подключений потребителя; Q – общий расход; $Q_{пут}$ – интенсивность путевого отбора.

В целом, когда расход газа распределяется на транзитный Q_T и путевой отбор $Q_{\text{пут}}$, то расчетный расход определяется как

$$\Delta\rho = a(Q_T + \alpha Q_{\text{п}})^2 L = aQ^2 L(1 - x + \alpha x^2)^2.$$

В этой расчетной формуле при полном распределении газа по пути ($x=1$) или при $n=\infty$ следует принимать

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0,577.$$

Так как в распределительных ГП $n>5$, то в среднем можно принимать $\alpha=0,55$:

$$Q_p = Q_T + 0,55Q_{\text{п}}$$

Такое сравнение позволяет заменить путевой отбор эквивалентным ему единственным узлом отбора и транзитный расход заменить узловым для конечной точки ГП.

Одним из решающих факторов, обеспечивающих надежность сети газопроводов под нагрузкой и воздействиями, является выбор толщины стенки трубопровода в зависимости от материала его изготовления. В работе [8] перечислены постоянные (под внутренним давлением, под собственным весом, температурные) и кратковременные (снеговая, от обледенения и ветровая) нагрузки, учитываемые через поправочный коэффициент. В зависимости от этих факторов выбирается толщина трубопровода, сохраняя внешний диаметр в рамках сортамента по ГОСТу. Соответственно этому живое сечение (пропускная способность тоже) уменьшается, но обеспечивается надежность сети.

Из более поздних работ [12] известно, что разработаны электромагнитные дефектоскопы. В зависимости от характеристик отраженных от стенки электромагнитных волн определяются наличие отверстия (или отверстий), свищей, щелей и других дефектов трубопровода.

Многочисленные работы [6, 8, 10] имеют материал о подземных газохранилищах, о режимах их эксплуатации в зависимости от различных внутренних и внешних факторов.

Для освещения особенностей расчета закольцованной сети газораспределения и коллектора сбора газа из промысла обратимся далее к другим источникам.

Аналитический обзор информатизации систем газоснабжения

Информатизация газотранспортной отрасли началась в конце 60-х – начале 70-х го-

дов. К этому времени относятся первые работы, посвященные моделированию и оптимизации режимов работы газотранспортных объектов, с использованием электронных вычислительных машин. В этих работах публикуются алгоритмы расчета газосборных, водопроводных, тепловых сетей, магистральных газопроводов и компрессорных и насосных станций.

В рамках Концепции «Развитие научных исследований по информационно-коммуникационным технологиям в Узбекистане на 2008-2015 годы» намечены разработки соответствующих информационных и объектно-ориентированных программных продуктов для анализа статических и динамических режимов функционирования, оперативного управления и принятия решений в сложных технологических системах, в том числе и в системах газоснабжения городов.

С распространением ЭВМ в научных подразделениях газовой отрасли появляются работы, где совершенствуются методы численного моделирования и оптимизации эксплуатационных режимов, закольцованных магистральных газопроводов совместно с компрессорными станциями, алгоритмы поиска максимальной производительности газопровода и ряд других работ.

Задача потокораспределения в газопроводных сетях является центральной задачей проектирования и управления системы газоснабжения. Усовершенствованию методов решения этой задачи посвящено множество работ [13]. Особенности предлагаемых алгоритмов являются возможность расчета сетей произвольной конфигурации и отсутствие специальных требований к разбиению сетей на части. Дальнейшее развитие решения этой задачи можно найти в работе А.А. Бондаренко [14]. В ней описываются методы и алгоритмы декомпозиционного и агрегативного моделирования сложных газопроводных сетей больших размеров. Применены теория графов, численные методы решения системы нелинейных алгебраических уравнений, общая теория систем, методы нелинейного математического программирования. Предлагаемые методы и алгоритмы могут быть использованы в качестве алгоритмического обеспечения автоматизированной системы моделирования систем газоснабжения.

Работа [15] содержит богатую информацию о существующих методах гидравличе-

ского расчета кольцевых газораспределительных сетей и их анализ. На основе проведенного анализа даются рекомендации по выбору методов расчета на ЭВМ газораспределительных сетей, состоящих из газопроводов с одинаковым и различными коэффициентами гидравлического сопротивления.

В работе [16] рассмотрена задача оптимизации диаметров газопроводов по критерию минимума металлозатрат. Однако математическая модель задачи и метод ее реализации в данной работе совершенно другие. Газопроводная часть произвольной топологии преобразуется в древовидную структуру, вершины которой определенным образом классифицируются. В соответствии с классификацией вершин формируются цели, для каждой из которых последовательно решается задача оптимизации диаметров. Решаемая задача является задачей целочисленного линейного программирования, поскольку в постановке задачи учитывается требование дискретности стандартных значений диаметров труб. При решении задачи используется метод «ветвей и границ».

Работы М.Г. Сухарева и Е.Р. Ставровского [17] по праву можно считать основой информатизации газотранспортной отрасли. В их работах рассмотрены такие важнейшие методические вопросы, как моделирование стационарных и нестационарных течений природного газа в магистральных газопроводах и их системах, моделирование работы компрессорного оборудования, модели оптимизации и оптимального развития газотранспортных систем и др. Впервые в мировой практике к решению приведенных задач были применены цифровые вычислительные машины. Наряду с теоретическими положениями приводятся примеры расчетов реальных объектов на ЭВМ.

Неотъемлемой частью информатизации являются методические аспекты моделирования. В перечисленных выше работах заложены основы методического аппарата для решения многих важнейших вопросов для отрасли. Результаты этих работ получены благодаря экспериментальным и теоретическим исследованиям многих ученых в области трубопроводной гидравлики.

Отмечая этапы развития информатизации газотранспортной отрасли, следует упомянуть о разработке алгоритмов решения ресурсоемких задач, к которым, напри-

мер, относятся задачи, связанные с исследованием нестационарных течений в газопроводах. В работах, посвященных обоснованию расчетных формул для газопроводов и их систем, разработке методов оптимизации стационарных режимов магистральных газопроводов и их систем. Часть работ посвящена распределительным сетям газоснабжения. Приняты нормативные документы, регламентирующие процедуры проектирования и эксплуатации газопроводных систем.

К началу 90-х годов следует отнести этап массовой компьютеризации газотранспортной отрасли. Диспетчерские службы, проектные и научно-исследовательские институты оснащаются персональными компьютерами, средствами мониторинга режимов работы газопроводов и компрессорных станций. С этого времени начинается интенсивное развитие информационных технологий в газотранспортной отрасли. Широко внедряются автоматизированные системы управления технологическими процессами транспорта газа. Разрабатываются информационные базы данных газотранспортных предприятий, широко применяются геоинформационные технологии. Для диспетчерских служб разрабатывается программное обеспечение моделирования, прогнозирования и оптимизации режимов работы магистральных газопроводов. Методическое обеспечение программных комплексов в основном базируется на перечисленных выше работах. По сути дела на этапе компьютеризации появляется возможность внедрить большинство математических и алгоритмических моделей функционирования и управления объектами транспорта газа, разработанных на протяжении последних десятилетий. Эффективная информатизация привела к качественным изменениям диспетчерского управления технологическими процессами в газовой отрасли, особенно в транспорте газа.

Но до сих пор решение ряда проблем, поставленных еще на первых этапах информатизации, остается открытым. Так, в последнее десятилетие возник интерес к поиску оптимальных режимов магистральных газопроводов при нестационарных режимах течения газа.

Интенсивное развитие компьютерных технологий заставляет по-новому подойти к некоторым проблемам. Так, созданные еще в середине 80-х, в начале 90-х годов про-

граммы анализа и оптимального синтеза систем газораспределения при современном уровне развития информационных технологий уже не отвечают требованиям, предъявляемым к ним.

В то же время, остаются вопросы, связанные с обоснованностью применения моделей для гидравлического расчета газопроводов. До сих пор для гидравлических расчетов стальных и полиэтиленовых трубопроводов используются одни и те же формулы. Отличаются лишь численные значения коэффициента шероховатости. Такая экстраполяция гидравлических моделей течения, как выясняется, сделана без достаточного обоснования.

Единая система газоснабжения Республики Узбекистан обеспечивает более чем на половину внутренние потребности страны в энергоносителях и имеет первостепенное значение в пополнении бюджета за счет экспорта газа. Большинство объектов системы, находящиеся главным образом вблизи крупных агломераций, из-за неравномерности потребления газа в суточном и недельном циклах, работает в нестационарном режиме. Кроме того, нестационарность обуславливается аварийными ситуациями, переключением компрессорных мощностей и увеличением спроса на газ при резких похолоданиях. Изменение параметров газового потока вдоль трассы происходит достаточно медленно, поэтому управляющие воздействия следует проводить заблаговременно, например «набивая трубу» в нерабочие дни, чтобы обеспечить покрытие возрастающего спроса в будни.

Нестационарные режимы характерны для многих газотранспортных предприятий. Оптимальная эксплуатация технологических объектов является одним из мероприятий, способствующих энергосбережению в газовой отрасли. Поэтому одной из важнейших задач оперативного управления газотранспортными системами является выбор оптимальных режимов эксплуатации при нестационарных течениях. Разработка математических методов решения этой задачи позволяет увеличить функциональные возможности автоматизированных систем управления газотранспортными предприятиями (АСУ ГТП).

Изучение нестационарных течений в длинных газопроводах началось в 30-х годах XX века. Классическими исследованиями в этом направлении следует считать ра-

боты И.А. Чарного [22], в которых дан вывод уравнений движения и предложены методы их интегрирования.

С развитием информатизации и компьютеризации газовой отрасли возник интерес к поиску оптимальных режимов магистральных газопроводов. С учетом нестационарности течения в точной (наиболее адекватной) постановке задача сводится к оптимизации системы с распределенными параметрами. Критерием оптимизации служит минимум энергетических затрат. Математические сложности и нетехнологичность формально оптимального решения заставляли до сих пор довольствоваться подходами с эвристической составляющей.

В некоторых зарубежных комплексах, предназначенных для диспетчерского управления газотранспортными системами, например SIMONE, оптимальный нестационарный режим ищется при ограничивающих предположениях. Методической базой для SIMONE послужили результаты исследования ряда ученых (Kralik J., Stiegler P. и др.). Разработанные ими расчетные процедуры исходят из того условия, что на выходе компрессорных станций поддерживается постоянное максимально возможное давление. Это предположение не приемлемо для отечественных газопроводов.

Методы определения оптимальных режимов магистральных газопроводов при стационарном течении газа хорошо известны и проверены практикой, соответствующие исследования представлены работами М.Г. Сухарева, Е.Р. Ставровского и др. Эти методы пригодны также в условиях медленно меняющихся – квазистационарных – режимов процесса транспорта газа по трубопроводу. Но для тех случаев, когда расход и давления газа претерпевают существенные изменения в суточном и/или недельном циклах, целесообразно разработать модели, более адекватно отражающие условия функционирования. Чтобы покрыть пиковые потребности в газе, необходимо заблаговременно «набить трубу». Управляющие воздействия, выбранные оператором интуитивно, могут быть далеко не оптимальными.

В заключении хотелось остановиться на монографии В.Е. Селезнева и др. [18]. Причиной тому является то, что в этой работе воплощены, по крайней мере, две положительные черты современной информатизации. Во-первых, датируемая 2007 годом

монография выставлена в Интернет и регулярно сопровождается авторским коллективом. Во-вторых, приведенные в монографии «методы позволяют проводить обучение специалистов трубопроводного транспорта эффективной работе при штатном и нештатном функционировании сетей трубопроводов, включая аварийные ситуации». Эти тренажеры созданы на базе высокоточных газодинамических и прочностных симуляторов трубопроводных систем.

По мнению авторов монографии, создание аналогичных компьютерных тренажеров, демонстрирующих состояние и функционирование трубопроводных сетей, полезно для газовой, нефтяной, химической и нефтехимической отраслей промышленности, а также энергетики.

Методы расчета закольцованной сети газопровода

Из курса физики известно, что при расчете электрической цепи постоянного тока производится анализ структуры (декомпозиция) цепи, выискивая симметричность, параллельность и последовательность соединений. При положительном решении этой задачи возникает возможность реализовать законы Ома для расчета отдельных частей цепи и/или цепи в целом.

К сожалению, не всегда удается определить такие облегчающие особенности расчета электрической цепи. В таких случаях обращаются к способу, который был разработан Г. Кирхгофом (1847 г.). Данный способ позволяет рассчитывать произвольную цепь гальванического тока с ограниченным количеством контуров.

В статье Г. Кирхгофа впервые были сформулированы 1-я и 2-я гипотезы автора, которые как 2-й и 1-й законы Кирхгофа поныне используются при моделировании электрических цепей, сети трубопроводного транспорта нефти, газа, нефтепродуктов, холодной и горячей воды и т.д.

Отсутствие единой теоретической базы для гидравлического расчета с точки зрения сопротивления трения – аналога закона Ома для электрического участка сети – явилось причиной более позднего применения аналогов законов Кирхгофа при расчете гидравлических цепей.

30-е годы прошлого века были продуктивными в этом смысле, т.к. начали реализовывать закон Дарси при расчете гидравлических цепей и вышли в свет работы М.М. Андрияшева (1932 г.), В.Г. Лобачева (1934 г.) и Х. Кросса (1936 г.).

Успехи в этом направлении более подробно описаны в монографиях А.П. Меренкова и В.Я. Хасилева [1] и Е.В. Сенновой и В.Г. Сидлера [2].

Для замыкания законов Кирхгофа служит закон Ома для части электрической цепи в виде линейной зависимости между падением напряжения U и силой тока I

$$U = \frac{\rho_l l}{F} I = R$$

где R , l , F , ρ_l – сопротивление, длина, площадь поперечного сечения проводника и удельное сопротивление материала проводника. Направление тока берется согласно направлению падения напряжения.

Для сети трубопроводного транспорта несжимаемой жидкости ($\rho \approx const$) использование формулы Дарси приводит к замыкающей законов Кирхгофа формуле [1, 2]

$$P_n - P_k = \frac{\lambda l}{2DF^2 \rho} M |M| + \rho g \Delta z,$$

где $\lambda, D, \Delta z$ – коэффициент сопротивления, диаметр и изменение нивелирной высоты трубопровода; P_n, P_k – значения статического давления в начале и конце участка; g – ускорение силы гравитации; Q – массовый расход жидкости на участке.

Так как зависимость между падением давления и расходом жидкости реализуется для каждого из участков сети, то образуется матрица больших размеров. Если через m, n и s обозначим соответственно количество вершин, узлов и базисных контуров, то будем иметь дело с основной матрицей инцидентий A с размерностью $m \times n$ и матрицей B базисных контуров с размерностью $m \times s$. Решение задач с такими большими размерами проблематично даже в случае линейной зависимости между искомыми, как это описывается законом Ома для части электрической цепи. В этом смысле задачу можно облегчить с применением положений теории графов.

То пришли к совокупности уравнений [2]

$$\begin{cases} Ax = Q, \\ By = 0, \\ y + H = SXx \end{cases}$$

для описания состояния многоконтурной сети трубопроводов.

Векторы – столбцы

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T,$$

$$y = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T,$$

$$Q = (Q_1, Q_2, \dots, Q_m)^T$$

$$\text{и } H = (h_1, h_2, \dots, h_m)^T$$

представляют расходы и перепады давления в дугах (ветвях и хордах), интенсивностей отбора и напоры в вершинах. (Для удобства векторы-столбцы обозначены знаком транспонирования). Вектор-столбец H учитывает изменение нивелирной высоты и мощность нагнетателя.

Первая группа уравнений в системе называют представлением 1-го закона Кирхгофа, вторая группа – представлением 2-го закона Кирхгофа, а третья группа – замыкающие соотношения в матричной форме. Замыкающие соотношения записаны для несжимаемой жидкости, когда реализуется квадратичным законом сопротивления [2].

Диагональные матрицы сопротивлений и модулей расходов имеют вид

$$S = \begin{bmatrix} s_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & s_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & s_n \end{bmatrix},$$

$$X = \begin{bmatrix} |x_1| & 0 & \dots & 0 \\ 0 & |x_2| & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & |x_n| \end{bmatrix}.$$

Использование термина «совокупность» к последним двум представлениям состояния сети обусловлено тем, что количество уравнений превышает количество неизвестных. Соответственно, «совокупность» содержит линейно-зависимые уравнения. В связи с этим из группы уравнений $Ax = Q$ совокупности удаляются лишние уравнения, чтобы обеспечить однозначность решения уже системы (обычно убираются уравнения относительно тех вершин-источников, значения, давления которых заданы).

При рассмотрении электрической цепи диагональная матрица X превращается в единичную матрицу, а система – в линейную.

Для решения полученной нами смешанной системы, состоящей из линейных и нелинейных уравнений, можно использовать метод Ньютона, разработанный для приближенного решения системы нелинейных уравнений.

Для реализации этого метода система представляется в виде $f(x) = 0$, где использовали векторную функцию

$$f(x) = \begin{cases} U(x) = Ax - Q, \\ V(x) = By + BH - BSXx. \end{cases}$$

Если известно нулевое приближение x^0 к решению, то $f(x)$ можно разложить в ряд Тейлора вокруг точки x^0 и ограничить первыми двумя членами:

$$f(x^0 + \Delta x) \approx f(x^0) + f'(x^0)\Delta x.$$

Т.к. $x^0 + \Delta x$ является решением системы, то для нахождения приращений Δx_k имеем систему линейных уравнений

$$f_i(x^0) + \sum_{k=1}^n \frac{\partial f_i(x^0)}{\partial x_k} \Delta x_k = 0.$$

$$\Delta x_k = 0. \quad i = (1, 2, \dots, n) \quad (*)$$

Решение данной линейной системы используется для следующего приближения $x^1 = x^0 + \Delta x$ к решению системы.

В работе [2] предложено использовать из решения $U(x)$ в части $V(x)$ и тем часть, соответствующая $V(x)$, заменить системой

$$V(x_{(x)}) = 2BSXB^T \Delta x_{(B)}.$$

В обоих случаях процесс приближения продолжается до необходимой точности.

К сожалению, с увеличением элементов графа (узлов, ветвей, хорд, фундаментальных контуров) этот метод становится «капризным». Изменение расхода на одной из контуров может вызвать перемены направления обхода других контуров. Чтобы избежать этого разработан метод Лобачева-Кросса, когда в (*) оставляются только диагональные элементы, а члены с коэффициентами

$$\frac{\partial f_i(x^0)}{\partial x_k}, \quad \text{при } i \neq k$$

отбрасываются.

Проблема сходимости процесса остается открытой, хотя предложены различные способы улучшения сходимости. Напри-

мер, в модификации Л. Выханду [2] метода Лобачева-Кросса предлагается заменить производные $\partial f_i / \partial x_k$ на выражения

$$\frac{\partial f_i}{\partial x_k} - f_i(x^0) \frac{\partial^2 f_i}{\partial x_k^2} \left(2 \frac{\partial f_i}{\partial x_k} \right).$$

Или предложено использовать групповую релаксацию или комбинацию разных методов.

Приведем другие способы расчета закольцованных сетей.

В монографии В.В. Грачева, С.Г. Щербакова и Е.Е. Яковлева [19] решены линеаризованные задачи с одним и двумя кольцами в нестационарной постановке. Топология сети учитывалась в плоскости изображения операционного исчисления. Стационарное решение получили при $t \rightarrow \infty$. Но, в силу линейности исходной системы уравнений, решение относилось к классу линеаризованных решений.

В работе [18] предложены математические модели потокораспределения в разветвляющихся сетях с учетом разделения импульса, общей массы, масс отдельных компонентов и энергии смеси газов, а вопросы расчета закольцованных сетей затрагивались в части литературного обзора.

В ранее цитированной уже работе [16] разработана формула гидравлического расчета рельефного многозвенного участка с концентрированными отборами и подкачками газа, где многониточность газопровода учитывали в рамках вновь разработанного обобщенного метода коэффициента расхода.

В работе [23] предложен способ расчета распределения сжимаемых и несжимаемых жидкостей в узлах разветвления в параллельные нити газопровода при различных режимах течения.

Следует отметить, что в двух последующих работах решение задачи получается точное.

Использование кольцевой сети направлено на увеличение надежности газоснабжения [7]. Резервирование пути газа до потребителя является половинчатым решением задачи надежности. В дополнении к этому структурное резервирование должно обеспечить резервной мощностью, выражающейся в запасах диаметрах и входных давлениях. Такие требования обусловлены удлинением пути транспортировки и расхода газа по обходной линии.

Кольцевые сети используются не только в системе городского газораспределения. Они применяются также при высоких давлениях, например, при сборе газа в коллектор, в магистральных газопроводах (путем соединения параллельных нитей).

Особые требования к городским сетям высокого давления связано тем, что они представляют верхний уровень городской сети газоснабжения, надежность которых определяет надежность всей сети. Надежность городской сети высокого давления обеспечивается путем кольцевания и дублирования отдельных участков. При этом предлагается использовать трубы с одинаковым диаметром, в крайнем случае – с разностью, не превышающей 15-20% от основного диаметра. Особенностью кольцевой сети является также то, что при увеличении количества колец уменьшается резерв давления.

Сети низкого давления представляют низкий уровень иерархии, поэтому к резервированию по этим трем показателям не очень строгое. К тому же эти сети в зависимости от количества ГРП имеют больше узлов питания, а протяженность ветвей будет меньше, но с возможностью подключения питания в середине ветвей.

Согласно [7] гидравлический расчет кольцевой сети начинается с первого этапа – предварительного распределения потоков с соблюдением первого закона Кирхгофа во всех узлах сети и согласно этому осуществить подбор диаметров всех участков газопроводов. По участковым расходам и ограничений на градиенте давления вычисляются участковые диаметры, а далее диаметры, как уже отметили выше, подбираются согласно ГОСТу.

Это недостаточно, т.к. должны выбрать наименьшие диаметр и толщины труб, чтобы сократить капитальные вложения, должны учитывать прогнозный рост газовых нагрузок и обеспечить надежность газоснабжения (резервировать пути, диаметры и давления).

При этом возможно, что по замкнутым контурам потеряется баланс давления. Восстановление баланса давления во всех замкнутых контурах составляет второй этап решения задачи потокораспределения сети (увязка сети).

По мнению автора [24] методы расчета потокораспределения, в основном, можно разделить на алгебраические и экстремаль-

ные. Метод Лобачева-Кросса, его модификации и другие увязочные методы относятся к алгебраическим методам.

Экстремальным методам решения задач потокораспределения относятся:

1) условная минимизация специальной функции с учетом только одного из законов Кирхгофа, отвечающей какому-либо вариационному принципу;

2) метод построения функции для последующего решения задачи безусловной минимизации;

3) переход к задачам нелинейного программирования.

Экстремальные методы, независимо от того, что задачи линейные и нелинейные, достаточно медленные и обладают большой размерностью.

В работе Акбасова сформирован и доказан ряд утверждений о необходимости, достаточности и недостаточности информации для гидравлического расчета и управления закольцованной сети с активными и пассивными элементами, а также для решения задач идентификации сети по структуре, параметрам и состоянию. Представлены графы сетей теплоснабжения городов Казахстана, в частности, гг. Алма-Аты, Лениногорска, Уральска, Караганды и др., которые проанализированы с точки зрения связности и избыточности структур; по последовательности, радиальности и древовидности структуры; по степени централизации, компактности. Разработаны рекомендации отдельных действующих сетей.

Обращение к истории разработки методов расчета закольцованных сетей позволяет выработать концепцию дальнейшего развития методов математического моделирования подобных сложных объектов.

Работы, посвященные исследованию методов расчета трубопроводных сетей, начаты в довоенные годы М.М. Андрияшевым, В.Г. Лобачевым и Х. Кроссом.

Математическое обеспечение для анализа трубопроводных систем в межотраслевом аспекте представлено монографией Меренкова А.П. и Хасилева В.Я. «Теория гидравлических цепей».

Работы московской школы (Сухарев М.Г., Ставровский Е.Р. и др.), иркутской школы (Меренков А.П., Новицкий Н.Н., Сеннова Е.В., Сидлер В.Г., Сумароков С.В. и др.), харьковской школы (Евдокимов А.Г., Тевяшев А.Д. и др.), воронежской школы (Квасов И.С., Панов М.Я., Щербаков В.И. и др.) и таш-

кентской школы (Садуллаев Р.) продолжают это направление, развивают методы теории гидравлических цепей и служат базой для математического моделирования и оптимизации газопроводных сетей.

Представленный материал, конечно же, не претендует на полноту отражения результатов. За рамкой анализа остались неизотермичность процесса транспортировки по трубопроводам (формулы В.А. Шухова, эффект Джоуля-Томсона), численные методы решения задач газодинамического состояния газопроводов, динамические процессы и другие. Тем не менее, можно сделать вывод о том, что закольцованная сеть газопроводов пользуется не только в городском газораспределении, но и при сборе газа из месторождений.

Не разработан ряд вопросов, в том числе вопросы нештатных ситуаций в сетях различной структуры. Поэтому данное исследование направлено на решение данных задач, **целью**, которой является: усовершенствование моделей и алгоритмов расчета теории гидравлических цепей применительно к многоконтурным сетям газопроводов.

Список литературы

1. Меренков А.П., Хасилев В.Я. Теория гидравлических цепей. – М.: Наука, 1985. – 278 с.
2. Сеннова Е.В., Сидлер В.Г. Математическое моделирование и оптимизация развивающихся теплоснабжающих систем. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1987. – 222 с.
3. Трубопроводный транспорт нефти и газа / под общ. ред. В.А. Юфина. – М.: Недра, 1988. – 368 с.
4. Садуллаев Р., Вагапов И.Х., Зайниев Н.З., Хужаев И.К., Хуррамова Р.И. Расчёт магистрального газопровода с учётом рельефа местности // Газовая промышленность. – М., 2003. – №8. – С. 58-59.
5. Хуррамова Р.И. Развитие моделей, методов и алгоритмов функционирования и управления режимами работы системы магистральных газопроводов: автореф. ... канд. техн. наук. – Т., 2005. – 22 с.
6. Трубопроводный транспорт нефти и газа / под общ. ред. В.А. Юфина. – М.: Недра, 1978. – 407 с.
7. Ионин А.А. Газоснабжение: учеб. для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1989. – 438 с.
8. Коротаев Ю.П., Ширковский А.И. Добыча, транспорт и подземное хранение газа. – М.: Недра, 1997. – 487 с.
9. Рахимов А.Х., Хужаев И.К. Уточнение формул Шухова и Адамова для закачивающей скважины // Вестник ТашГУ. – 2006. – № 2. – С. 9-15.
10. Новоселов В.Ф., Гольянов А.И., Муфтахов Е.М. Типовые расчеты при проектировании и эксплуатации газопроводов. – М.: Недра, 1982. – 136 с.
11. Хужаев И.К. Развитие математических моделей диффузионного горения и транспортировки газа по трубопроводу: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Ташкент, 2009. – 47 с.
12. Селезнёв В.Е., Алёшин В.В., Прялов С.Н. Математическое моделирование трубопроводных сетей и систем каналов. Методы, модели и алгоритмы. – М., 2007. – 695 с.

13. Тевяшев А.Д., Федоров Н.В. и др. Расчет сетей большой размерности с использованием метода декомпозиции. Харьк. ин-т инж. коммунал. стр-ва. – Харьков, 1984. – 11 с.
14. Бондаренко А.А. Математическое моделирование сложных газопроводных сетей для решения задач оперативно-технологического управления: дис. ... канд. техн. наук. / Харьковский политехн. ин-т, № ГР 01780021474: 214 с.
15. Comparison of methods flow computation in pipe networks, Tingsanchali T., Chup.C, “Appl, Simul and Madell, Prog, IASTED Int Sump Francisco, May 16-18, 1983 “Auchheim e.a., 5, a.51-54.
16. Садуллаев Р. и др. Оптимизация параметров при проектировании городских газопроводных сетей // Материалы II Республиканской конференции «Методологические и прикладные аспекты САПР и АСУ в отраслях народного хозяйства». – Т., 1985. – С. 24-27.
17. Сухарев М.Г., Ставровский Е.Р. Расчеты систем транспорта газа с помощью вычислительных машин. – М.: Недра, 1971. – 206 с.
18. Селезнев В.Е., Алешин В.В., Прялов С.Н. Современные компьютерные тренажеры в трубопроводном транспорте: математические методы моделирования и практическое применение / под ред. В.Е. Селезнева. – М.: МАКС Пресс, 2007. – 200 с.
19. Грачев В.В., Щербаков С.Г., Яковлев Е.Е. Динамика трубопроводных систем. – М.: Наука, 1987. – 438 с.
20. Селезнев В.Е., Алешин В.В., Прялов С.Н. Математическое моделирование магистральных трубопроводных систем: дополнительные главы. – М.: МАКС Пресс, 2009. – 356 с.
21. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. – М.: Наука, 1976. – 888 с.
22. Чарный И.А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. – М.: Недра, 1975. – 296 с.
23. Хужаев И.К., Садуллаев Р., Арифжанов А.Ш. Об управлении процессами транспортировки сжимаемых и несжимаемых сред по параллельным трубопроводам // Автоматизация в промышленности. – М., 2008. – № 6. – С. 19-20.
24. Акбасов А.Р. Разработка интеллектуальной системы управления тепловыми сетями города: дис. ... д-ра техн. наук / Казахский нац. тех. универ. им. К.И. Сатпаева. – Алматы, 2011. – 110 с.

УДК 620.178.1:539.533

РОЛЬ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ В ФОРМИРОВАНИИ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

Юров В.М., Гученко С.А., Лауринас В.Ч.

*Казахстанский государственный университет им. Е.А. Букетова, Караганда,
e-mail: exciton@list.ru*

В работе показано, что поверхностное натяжение элементов многокомпонентных плазменных потоков играет существенную роль в процессе зародышеобразования, дальнейшего роста пленки покрытия и, в конечном счете, в формировании структуры и свойств плазменных покрытий. Разработанные методы определения поверхностного натяжения осаждаемых покрытий могут оказать помощь в выборе технологических параметров осаждения, режимов ионного и лазерного облучения. Экспериментально показано, что формирующаяся в процессе плазменного осаждения пленка представляет собой нелинейную открытую систему, в которой происходят автоволновые процессы, приводящие к самоорганизации структуры покрытия и улучшенными эксплуатационными характеристиками. При этом одним из управляющих параметров является поверхностное натяжение. Полученные экспериментальные данные по формированию ячеистой структуры покрытий укладываются во все рассмотренные модели: концентрационного переохлаждения, связанного с наличием радиального градиента концентрации примеси нитрида титана или циркония; ячеек Бенара, возникновение которых обусловлено наличием вертикального градиента температуры; ячеистой дислокационной структуры, связанной с наличием пластических деформаций в покрытии. Показана связь поверхностного натяжения покрытий с их жаростойкостью и коррозионной стойкостью. Предложены методы оценки температуры плавления осаждаемых покрытий.

Ключевые слова: плазменные покрытия, поверхностное натяжение, наноструктура, нанокompозит, микротвердость, критический радиус, самоорганизация.

THE ROLE OF SURFACE TENSION IN THE FORMATION OF PLASMA COATINGS

Yurov V.M., Guchenko S.A., Laurinas V.Ch.

Karaganda State University named after E.A. Buketov, Karaganda, e-mail: exciton@list.ru

It is shown that the surface tension elements multicomponent plasma flow plays an important role in the nucleation process, the further growth of the film coating and, ultimately, in the formation of structures and properties of the plasma coating. A method for determining the surface tension of deposited coatings can assist in choosing the technological parameters of deposition, ion mode and the laser irradiation. It is shown experimentally that the emerging in the process of plasma deposition film is a non-linear open system in which the autowave processes that lead to self-organizing structure of the coating and improved performance. At the same time one of the control parameters is the surface tension. The experimental data on the formation of a cellular structure coatings fit all these models: the concentration of hypothermia associated with the presence of a radial gradient of the impurity concentration of titanium nitride or zirconium; Benard cells which is caused by the presence of the vertical temperature gradient; cellular dislocation structure associated with the presence of plastic deformation in the coating. The connection between the surface tension of coatings to their heat resistance and corrosion resistance. The methods of evaluation of the melting point of the deposited coatings.

Keywords: plasma coating, surface tension, nanostructure, nanocomposite, microhardness, the critical radius, self-organization

Введение

Вопросам создания твердых и сверхтвердых нанокompозитных покрытий, закономерностей формирования их фазово-структурных состояний, посвящено значительное число работ (см., например, обзоры [1-5]). Это связано как с общим развитием нанотехнологий, так и с широкими возможностями практического использования таких покрытий в различных областях техники и промышленности.

В последние годы возрос интерес к высокоэнтропийным (многоэлементным, многофазным) покрытиям, которые обладают уникальными свойствами и которые трудно получить методами традиционной металлургии [6-10]. Хотя вопрос о природе сверх-

твердости покрытий окончательно не решен, все-таки не возникает сомнений в том, что высокая прочность нанокompозитных покрытий обусловлена, прежде всего, наноразмерностью их зеренной структуры.

В настоящем обзоре мы рассмотрим вопросы, которые еще не полностью исследованы, а именно – роль поверхностного натяжения в формировании и свойствах покрытий.

1. Три стадии образования покрытий

Хотя способы получения наноструктурных материалов и покрытий довольно разнообразны [11], но все они основаны на механизме интенсивной диссипации энергии, обобщенной в трех стадиях формирования.

На первой стадии идет процесс зародышеобразования, который из-за отсутствия соответствующих термодинамических условий, не переходит в массовую кристаллизацию. Вторая стадия представляет собой формирование вокруг нанокристаллических зародышей аморфных кластеров, которые – на третьей стадии – объединяются в межкристаллитную фазу с образованием диссипативной структуры.

Каждая из перечисленных стадий представляет собой сложный процесс. Достаточно указать на процесс образования зародышей новой фазы, теория которых развивается уже более 100 лет и основные положения которой были заложены еще Гиббсом и затем развиты Фольмером, Беккером и Дёрингом, Странским и Каишевым, Френкелем, Зельдовичем [12].

В случае кристаллизации переохлажденного расплава критический радиус зародыша r_k можно выразить через переохлаждение ΔT [12]:

$$r_k = 2M\sigma T_0 / \rho q \Delta T, \quad (1)$$

где M – молекулярный вес; ρ – плотность зародыша; q – теплота плавления; T_0 – равновесная температура двух фаз бесконечно большого радиуса, σ – межфазное поверхностное натяжение кристалла-зародыша.

В большинстве работ считается, что гомогенное зарождение металлических кристаллов начинается при переохлаждении $\Delta T = 0,2 \cdot T_{пл}$ от температуры плавления. Полагая $T_0 = T_{пл}$, получим:

$$r_k = 10M\sigma / \rho q. \quad (2)$$

Все величины, входящие в выражение (2) (кроме σ) экспериментально определяются с большой точностью и приведены в справочниках. Для чистых металлов величина поверхностного натяжения σ_0 определена нами в работе [13]. Межфазное поверхностное натяжение на границе кристалл – расплав $\sigma \approx 1/3 \sigma_0$ [14]. Тогда расчет по классической формуле (2) дает значение для критического радиуса порядка микрона или его долей, что на три порядка больше экспериментально наблюдаемых величин. В работе [15] для поверхностного натяжения нанокристалла нами получено следующее выражение:

$$\sigma(r) = \sigma_\infty \left(1 - \frac{d}{r} \right), \quad (3)$$

где d – критический радиус, характеризующий размерные эффекты.

Из формулы (3) вытекает условие гомогенного образования зародыша кристалла: $r = r_k \geq d/3$. Для 55 металлов значения d определены в работе [15] (табл. 1).

Из таблицы 1 видно, что значения критического радиуса гомогенного зарождения чистых металлов формируются в области 1 и 2 нм. Электронное строение атомов металлов в этом случае не играет существенной роли.

В таблице 2 приведены значения критического радиуса гомогенного зарождения некоторых чистых металлов, полученные в работе [16].

Таблица 1

Критический радиус гомогенного образования чистых металлов (М)

М	r_k , нм												
Li	0,5	Sr	2,8	Sn	0,7	Cd	0,6	Fe	1,0	Gd	2,5	Ac	2,3
Na	0,7	Ba	2,9	Pb	0,8	Hg	0,3	Co	0,9	Tb	2,4	Th	3,2
K	1,2	Al	0,7	Se	0,6	Cr	1,3	Ni	0,9	Dy	2,5	U	1,4
Rb	1,4	Ga	0,3	Te	1,2	Mo	2,2	Ce	1,8	Ho	2,5	Np	0,9
Cs	1,7	In	0,5	Cu	0,8	W	2,8	Pr	2,0	Er	2,5	Pu	0,9
Be	0,6	Tl	0,8	Ag	1,0	Mn	0,9	Nd	2,1	Tm	2,4	Am	2,1
Mg	1,0	Si	1,6	Au	1,1	Tc	1,7	Sm	2,1	Yb	2,2	Bk	1,7
Ca	2,3	Ge	1,3	Zn	0,5	Re	2,7	Eu	2,7	Lu	2,7	-	-

Таблица 2

Критический радиус гомогенного образования некоторых металлов [16]

М	r_k , нм						
Ga	0,9	Ge	0,9	Cu	1,1	Pb	1,1
Sn	1,2	Ag	1,2	Bi	0,8	Hg	0,8

Сравнение значений r_k из таблиц 1 и 2 показывает их хорошее соответствие, что говорит в пользу развитого подхода. В случае гетерогенного образования зародышей критический радиус увеличивается.

Еще сложнее оказываются вторая и третья стадии формирования покрытия, когда рост пленки определяется условиями на подвижной границе раздела фаз. Такого рода задачи получили название «проблема Стефана», последний обзор которой дан в работе [17].

С математической точки зрения краевые задачи такого типа принципиально отличны от классических задач. Вследствие зависимости размера области переноса потока от времени, к этому типу задач неприменимы классические методы разделения переменных и интегральных преобразований Фурье, так как, оставаясь в рамках классических методов математической физики, не удаётся согласовать решение уравнения с движением границы раздела фаз.

Применительно к нашим задачам, мы использовали решение задачи Стефана, предложенной в работе [18], заменив поток электронов на поток атомов на поверхности подложки. Тогда для плотности потока атомов или ионов $\rho(r, t)$, формирующих покрытия, мы получим следующее уравнение:

$$\rho(r, t) = \text{const} \cdot J_0\left(\frac{2r}{R}\right) \cdot \frac{1}{\beta(t)}, \quad (4)$$

где J_0 – функция Бесселя нулевого порядка; r – текущая координата; R – геометрический размер подложки; $\beta(t)$ – скорость движения раздела фаз.

График функции $\rho(r)$ показан на рис. 1.

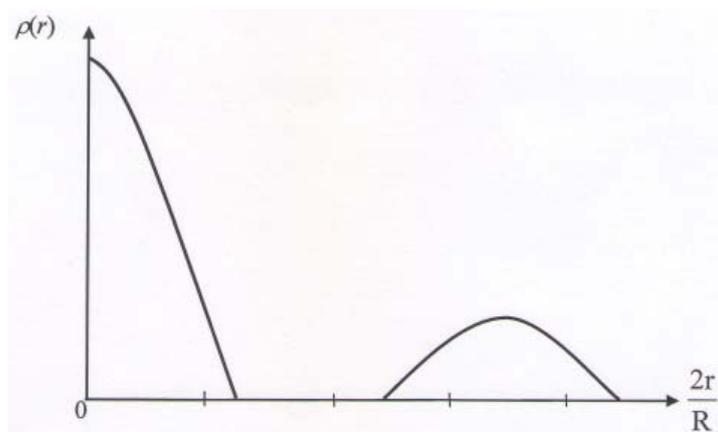


Рис. 1. График функции $\rho(r)$ при $r > 0$

Из рис. 1 и формулы (4) следует, что поток атомов, формирующих покрытие, распадается, образуя «островки». Полученный результат согласуется с «островковой» моделью формирования ионно-плазменных покрытий [11].

Из (4) также следует, что с увеличением скорости роста покрытия $\beta(t)$ плотность потока атомов падает и это приводит к ухудшению качества покрытия. Такая ситуация характерна в том случае, когда теплофизические параметры подложки и наносимого материала сильно различаются. Чтобы исправить такую ситуацию, необходимо использовать композиционные (многоэлементные) катоды для нанесения покрытий.

2. Прямой и обратный эффект Холла-Петча

Выше мы уже отметили, что высокая прочность нанокompозитных покрытий обусловлена, прежде всего, наноразмерностью их зеренной структуры.

Экспериментальные исследования механических свойств наноматериалов показали, что предел прочности, твердость многих металлов (Pd, Cu, Ag, Ni и др.) значительно выше, чем в соответствующих массивных аналогах [19, 20]. Увеличение твердости и прочности с уменьшением размера зерна до некоторого критического размера практически характерно для всех кристаллов. Это вытекает из известного уравнения Холла-Петча, что предел текучести σ_T зависит обратно пропорционально от среднего размера зерна d [20]:

$$\sigma_T = \sigma_M + kd^{-1/2} \quad (5)$$

где σ_M – предел прочности монокристалла, k – некоторый размерный коэффициент.

Соотношение (5) достаточно хорошо выполняется в широком диапазоне значений d вплоть до 1 мкм.

Значения σ_T , полученные экстраполяцией в область размера $d < 100$ нм в 2-3 раза превышают таковые для традиционных материалов [19, 20].

Можно констатировать, что твердость металлов и керамических материалов возрастает по мере того, как размер зерна переходит в нанозону область.

Однако величина размера зерна, до которой происходит упрочнение, зависит от ряда факторов и природа этого явления не совсем ясна.

Обычно соотношение Холла-Петча (5) выполняется для значительной части исследованных наноматериалов лишь до определенного размера зерна, а при более низких его значениях наблюдаются обратные эффекты: твердость (прочность) падает по мере снижения размера зерна.

В работе [21] для предела текучести нами получено:

$$\sigma_T = \sigma_M + C\sigma d^{-1/2}. \quad (6)$$

Уравнение (6) по форме совпадает с уравнением Холла-Петча (5). Однако коэффициенты пропорциональности в обеих формулах различаются. В рассматриваемом случае поведение предела текучести малых частиц определяется также величиной их поверхностного натяжения σ .

Для малых d А.И. Русанов получил асимптотическую линейную зависимость [22]:

$$\sigma = Kd. \quad (7)$$

где K – коэффициент пропорциональности.

Формула (7) получена на основе термодинамического рассмотрения и должна быть применима к малым объектам различной природы. В этом случае уравнение (6) принимает вид:

$$\sigma_T = \sigma_M + CKd^{1/2}. \quad (8)$$

Уравнение (8) представляет собой обратный эффект Холла-Петча.

Рассчитанные нами в работе [23] значения критического радиуса, когда прямой эффект Холла-Петча сменяется на обратный, для большинства металлов таблицы Менделеева приведены в таблице 3.

Таблица 3

Критический радиус частиц чистых металлов (М)

М	r_k , нм												
Li	1,4	Sr	8,3	Sn	2,0	Cd	1,9	Fe	3,1	Gd	7,6	Ac	7,1
Na	2,1	Ba	8,9	Pb	2,6	Hg	0,8	Co	2,8	Tb	7,5	Th	9,6
K	3,7	Al	2,2	Se	1,9	Cr	3,8	Ni	2,7	Dy	7,6	U	4,2
Rb	4,2	Ga	0,9	Te	3,5	Mo	6,5	Ce	5,4	Ho	7,8	Np	2,6
Cs	5,2	In	1,6	Cu	2,3	W	8,4	Pr	6,0	Er	7,8	Pu	2,7
Be	1,8	Tl	2,4	Ag	3,1	Mn	2,8	Nd	6,4	Tm	7,4	Am	6,4
Mg	3,1	Si	4,9	Au	3,3	Tc	5,1	Sm	6,3	Yb	6,5	Bk	5,2
Ca	7,0	Ge	4,0	Zn	1,5	Re	7,1	Eu	8,3	Lu	8,2	-	-

Из таблицы 3 видно, что критический радиус чистых металлов не превышает 10 нм. Например, для вольфрама критический радиус равен 8,4 нм, т.е. в пределах ошибок эксперимента он совпадает с экспериментальным значением, приведенным в работе [20].

Таким образом, как и в предыдущем случае для наночастиц определенного критического радиуса нужно учитывать размерную зависимость поверхностного натяжения.

3. Поверхностное натяжение осаждаемых покрытий

Экспериментальное определение поверхностного натяжения твердых тел, включая и покрытия, затруднено тем, что их молекулы (атомы) лишены возможности свободно перемещаться. Исключение составляют чистые металлы при температуре близкой к температуре плавления, когда подвижность поверхностных атомов становится заметной. Обзор экспериментальных методов определения поверхност-

ного натяжения твердых тел приведен в работах [24-27].

Мы использовали два, разработанных нами, метода определения поверхностного натяжения осаждаемых покрытий [28-29]. В первом методе предусматривается измерение поверхностного натяжения путем определения зависимости микротвердости от толщины осаждаемого покрытия. Зависимость микротвердости осаждаемого покрытия от его толщины описывается формулой [29]:

$$\mu = \mu_0 \cdot \left(1 - \frac{d}{h}\right), \quad (9)$$

где μ – микротвердость осаждаемого покрытия; μ_0 – «толстого» образца; h – толщина осаждаемого покрытия. Параметр d связан с поверхностным натяжением σ формулой [29]:

$$d = \frac{2\sigma v}{RT}, \quad (10)$$

где σ – поверхностное натяжение массивного образца; v – объем одного моля; R – газовая постоянная; T – температура.

В координатах $\mu \sim 1/h$ ($1/h$ – обратная толщина осаждаемого покрытия) получается прямая, тангенс угла наклона которой определяет d , и по формуле (10) рассчитывается поверхностное натяжение осаждаемого покрытия (σ). Во втором методе измеряется зависимость электропроводности Ω осаждаемого покрытия от его толщины h , которая описывается формулой, аналогичной (9):

$$\Omega = \Omega_0 \cdot \left(1 - \frac{d}{h}\right), \quad (11)$$

где Ω_0 – электрическая проводимость массивного образца, а d определяется по формуле (10).

Прежде всего, рассмотрим результаты определения поверхностного натяжения нитрид титановых покрытий, наиболее исследованных и наиболее популярных в практическом применении. Результаты показаны на рис. 2 и 3. В координатах $\mu/\mu_0 \sim 1/h$ экспериментальная кривая спрямляется в соответствии с (9), давая значение $d = 1,3$ мкм. Для нитрида титана $\vartheta = 11,44$ см³/моль и из соотношения (10) для поверхностного натяжения получено: $\sigma = 0,474$ Дж/м². Экспериментальная зависимость электропроводности Ω осаждаемого покрытия от его тол-

щины h (рис. 3) описывается формулой, аналогичной (9). В координатах $W \sim 1/h$ экспериментальная кривая спрямляется, давая значение $d = 1,4$ мкм. Из соотношения (10) для поверхностного натяжения получено: $\sigma = 0,479$ Дж/м². Это значение практически совпадает с результатом, полученным из зависимости микротвердости от толщины покрытия, что является подтверждением используемой методики и соотношений (9) и (10).

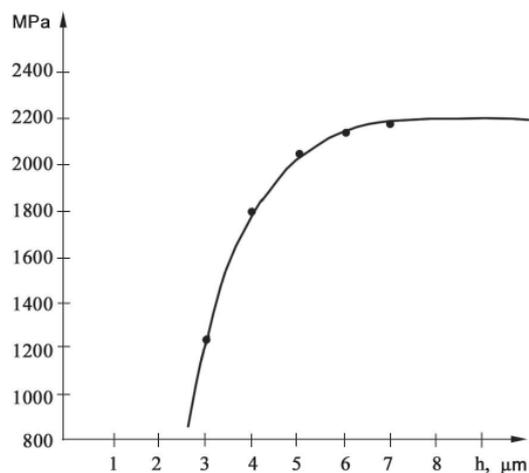


Рис. 2. Зависимость микротвердости от толщины нитрид титанового покрытия

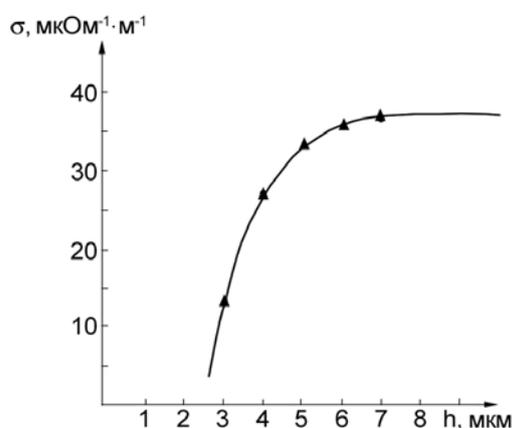


Рис. 3. Зависимость электропроводности от толщины нитрид титанового покрытия

Поверхностное натяжение для других покрытий определялось по методике, описанной выше для нитрида титана. Средние значения величины поверхностного натяжения, полученные обоими методами приведены в таблице 4. Из таблицы 4 видно, что в ряду TiN→TaN поверхностное натяжение увеличивается почти в 2 раза.

Таблица 4

Поверхностное натяжение и свойства нитридных покрытий

Нитрид	Температура плавления покрытия, °С	Микротвердость покрытия, ГПа	Электропроводность покрытия, мкОм ⁻¹ ·м ⁻¹	Поверх. натяжение покрытия, Дж/м ²	Поверх. натяжение металла, Дж/м ²
TiN	2945	20,0	40	0,474	1,933
ZrN	2955	16,0	18	0,518	2,125
HfN	3330	22,0	32	0,610	2,503
NbN	2320	14,0	78	0,670	2,741
TaN	3360	17,5	180	0,735	3,014

По сравнению с чистыми металлами оно уменьшается примерно в 4 раза для всех покрытий, т.е. азот, вступая в реакцию с металлом и образуя химическую связь, действует практически на все металлы одинаковым образом.

Поверхностное натяжение для покрытий Zn-Cu-Al определялось по методике, описанной выше для TiN. Среднее значение величины поверхностного натяжения, полученное обоими методами, оказалось равным: $\sigma_{Zn-Cu-Al} = 0,351$ Дж/м². Результаты расчета стехиометрии дали следующий результат: Zn_{0,59}Cu_{0,01}Al_{0,40}. Поверхностная энергия Гиббса $G = \sigma \cdot S$ (S – площадь поверхности покрытия) в случае идеальных твердых растворов является величиной аддитивной, поэтому должно выполняться соотношение (12):

$$\sigma_{Zn_{0,59}Cu_{0,01}Al_{0,40}} = 0,59\sigma_{Zn} + 0,01\sigma_{Cu} + 0,40\sigma_{Al}.$$

Используя данные для σ_{Zn} , σ_{Cu} и σ_{Al} [13], получаем, что $\sigma_{Zn-Cu-Al} = 0,412$ Дж/м². Экспериментальное и теоретическое значения для покрытий Zn-Cu-Al оказались близки между собой: ($\sigma_{Zn-Cu-Al} \approx 0,4$ Дж/м²).

Полученный результат позволяет сделать следующий важный вывод: используя свойство аддитивности поверхностного натяжения, можно подбирать компоненты покрытия так, чтобы уменьшать или увеличивать поверхностное натяжение покрытия по сравнению с чистыми металлами. Это означает возможность управления свойствами покрытий, поскольку все физические свойства покрытий определяются их поверхностной энергией (поверхностным натяжением).

4. Роль поверхностного натяжения в формировании плазменных покрытий

Прежде всего рассмотрим поверхностное натяжение чистых металлов, полученные в работе [13] и представленные в таблице 5.

Учет поверхностного натяжения на границе раздела фаз приводит к существенному изменению кинетики формирования покрытий. На рисунках 4 и 5 показана структура двух покрытий, компоненты которого имеют различное поверхностное натяжение.

Таблица 5

Поверхностное натяжение чистых металлов (М) при температуре 300 К.

М	σ_{300}^0 Дж/м ²												
Li	0,152	Sr	0,730	Sn	0,205	Cd	0,294	Fe	1,508	Gd	1,285	Ac	1,023
Na	0,071	Ba	0,683	Pb	0,300	Hg	0,07	Co	1,463	Tb	1,331	Th	1,723
K	0,037	Al	0,633	Se	0,193	Cr	1,873	Ni	1,426	Dy	1,380	U	1,105
Rb	0,012	Ga	0,003	Te	0,425	Mo	2,573	Ce	0,777	Ho	1,434	Np	0,613
Cs	0,002	In	0,129	Cu	1,056	W	3,373	Pr	0,908	Er	1,470	Pu	0,610
Be	1,258	Tl	0,276	Ag	0,934	Mn	1,217	Nd	0,998	Tm	1,518	Am	0,973
Mg	0,623	Si	1,386	Au	1,036	Tc	2,173	Sm	1,025	Yb	0,797	Bk	0,998
Ca	0,818	Ge	0,931	Zn	0,399	Re	3,123	Eu	0,875	Lu	1,625	-	-

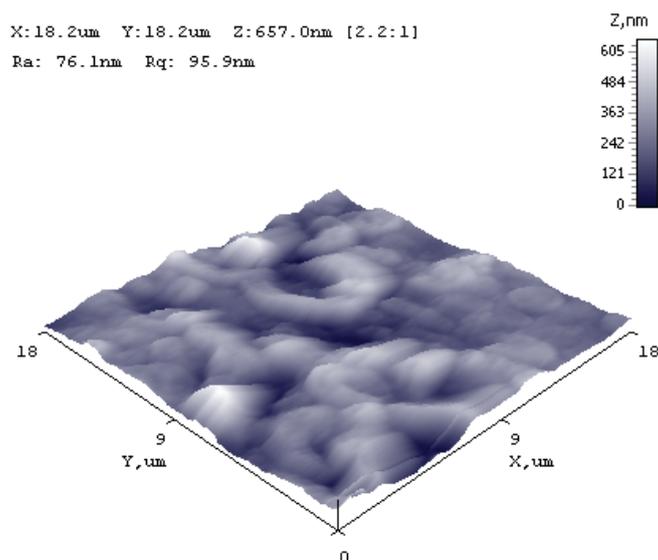


Рис. 4. АСМ изображение поверхности покрытия $AlFe_{43,04}$

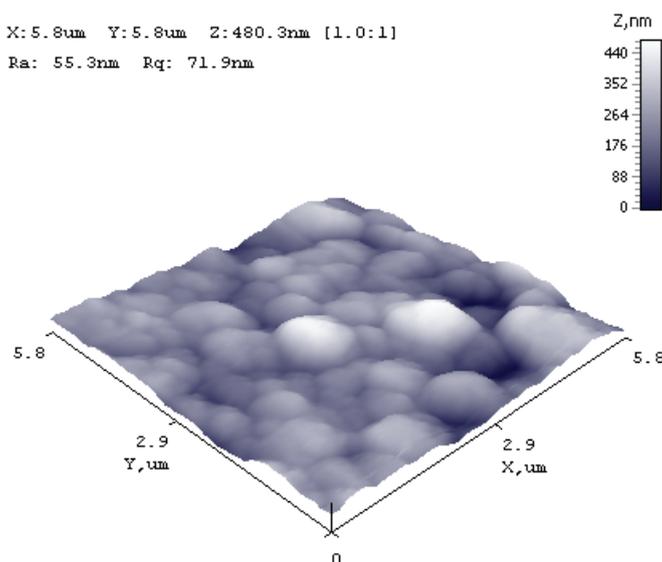


Рис. 5. АСМ изображение поверхности покрытия $ZnAl_{65,45}$

В первом случае (рис. 4) мы наблюдаем незамкнутые диссипативные структуры, а во втором (рис. 5) – глобулярную структуру. Используя данные таблицы 5 можно оценить поверхностное натяжение обоих покрытий. В первом случае для покрытия $AlFe_{43,04}$ $\sigma = 1,01$ Дж/м², а для покрытия $ZnAl_{65,45}$ $\sigma = 0,55$ Дж/м², т.е. различие почти в 2 раза.

5. Образование ячеистой структуры и процессы самоорганизации при формировании плазменных покрытий

Нами наносились покрытия при одновременном распылении многоэлементных

катодов Cr–Mn–Si–Cu–Fe–Al и титановых и циркониевых катодов на установке ННВ-6.6И1. На рисунках 6 и 7 показаны АСМ-изображения этих покрытий. Наблюдается ячеистая структура, которая свидетельствует о процессах самоорганизации при формировании ионно-плазменных покрытий.

Ячеистая субструктура часто образуется при затвердевании в результате возникновения концентрационного переохлаждения (рис. 8) [30]. Если при образовании ячеистой структуры у фронта кристаллизации имеется зона жидкого расплава, обогащенного примесью, то возникновение сегрега-

ции примеси у границ ячеек обязано боковому диффузионному потоку примеси от вершины растущего выступа. Количество примеси, которое действительно достигнет границы ячейки, трудно измерить, однако оно зависит от глубины выемки между ячейками. По мере увеличения переохлаждения выемки между ячейками становятся глубже, что должно приводить к обогащению границ ячеек примесью вследствие диффузии примеси от вершины ячейки. Концентрация примеси на границах может в несколько раз превышать концентрацию в центре ячейки.

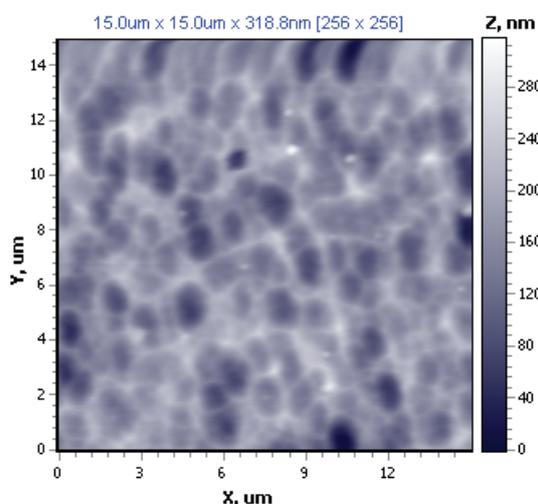


Рис. 6. АСМ – изображение ячеистой структуры покрытия Cr-Mn-Si-Cu-Fe-Al+Ti в среде азота

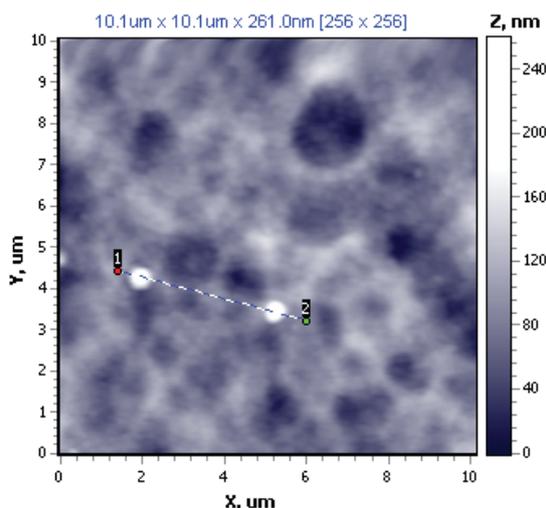


Рис. 7. АСМ – изображение ячеистой структуры покрытия Cr-Mn-Si-Cu-Fe-Al+Zr в среде азота

Ячеистая структура состоит из ряда параллельных элементов, имеющих форму

стержней и расположенных в направлении кристаллизации (рис. 8). Стержни имеют в поперечном сечении форму правильных шестиугольников и структура на фронте кристаллизации представляет собой совокупность шестиугольных ячеек. Верхняя свободная поверхность кристаллов, обладающих такой структурой, волнистая.

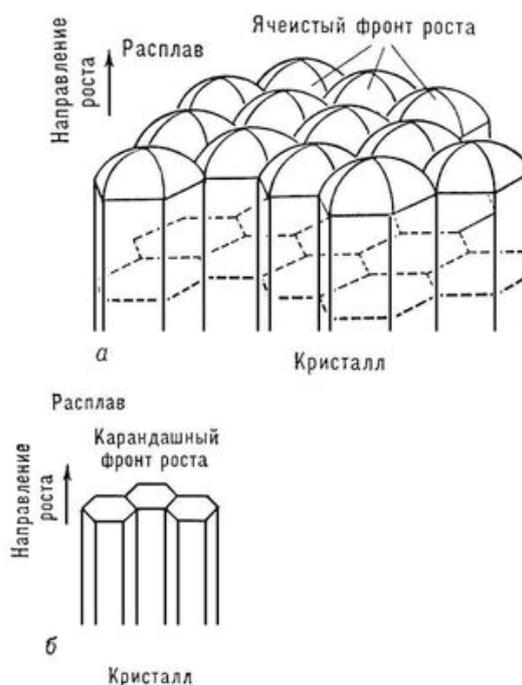


Рис. 8. Ячеистая структура (а) и карандашная (столбчатая) структура (б) [30]

Такая модель вполне подходит для объяснения наблюдаемой нами ячеистой наноструктуры. Это особенно хорошо видно на рис. 9 в 3D-проекции. Однако остается вопрос о причине самоорганизации кристаллизующего расплава на поверхности подложки.

Для решения вопроса о самоорганизации структурных единиц покрытия рассмотрим модель ячеек Бенара. Ячейки Бенара – это возникновение упорядоченности в виде конвективных ячеек в форме цилиндрических валов или правильных шестиугольных фигур в слое вязкой жидкости с вертикальным градиентом температуры (рис. 10) [31].

Ячейки Бенара являются одним из трех стандартных примеров самоорганизации, наряду с лазером и реакцией Белоусова-Жаботинского. Управляющим параметром самоорганизации служит градиент температуры.

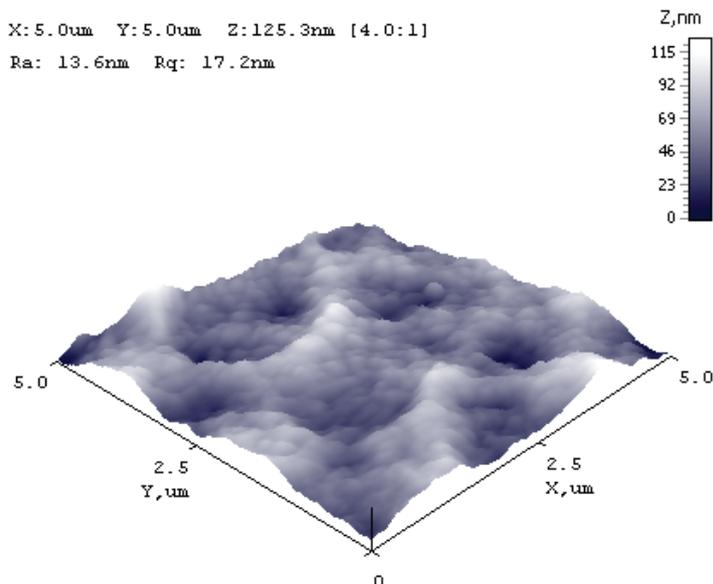


Рис. 9. АСМ – изображение ячеистой структуры покрытия $Cr-Mn-Si-Cu-Fe-Al+Zr$ в среде азота в 3D-проекции

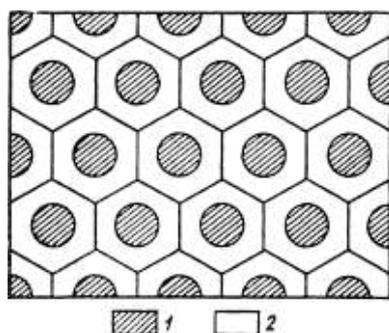


Рис. 10. Схема ячеек Бенара:
1 – восходящее движение,
2 – нисходящее движение [31]

Вследствие подогрева в первоначально однородном слое жидкости начинается диффузия из-за возникшей неоднородности плотности. При преодолении некоторого критического значения градиента, диффузия не успевает привести к однородному распределению температуры по объему. Возникают цилиндрические валы, вращающиеся навстречу друг другу (как сцепленные шестеренки). При увеличении градиента температуры возникает второй критический переход. Для ускорения диффузии каждый вал распадается на два вала меньшего размера. При дальнейшем увеличении управляющего параметра валы дробятся и в пределе возникает турбулентный хаос.

В нашем случае наличие градиента температур в системе подложка – кристаллизу-

ющая пленка не вызывает сомнений, однако измерить его в процессе нанесения покрытия довольно проблематично. Высокая теплопроводность подложки и покрытия должны приводить к малому градиенту температур, так что управляющим параметром при образовании ячеистой структуры покрытия – прототипа ячеек Бенара – он вряд ли может быть.

Более строго (см., например, [31]) при анализе процессов в системе Бенара в качестве управляющего параметра выбирается число Рэлея:

$$Re = gL^3bdT/\nu a$$

где g – ускорение свободного падения, L – характерный размер, b – коэффициент объемного расширения, dT – градиент температуры, ν – кинематическая вязкость, a – коэффициент температуропроводности среды.

Поскольку кинематическая вязкость $\nu \sim 1/\sigma$, σ – поверхностное натяжение, то из приведенного выше выражения для числа Рэлея следует, что управляющим параметром в нашем случае (a возможно и в случае процесса Бенара) является поверхностное натяжение.

Из предыдущего рассмотрения вопроса о формировании структуры ионно-плазменных покрытий следует, что ситуация оказывается сложнее, чем это кажется с первого взгляда. В настоящем разделе мы рассмо-

трим этот вопрос еще с одной стороны, а именно с привлечением модели ЯДС – ячеистой дислокационной структуры. Пластическая деформация кристаллов (и покрытий) сопровождается образованием на их поверхности деформационного рельефа, отражающего процесс локализации деформаций в кристалле на мезо-, микро- и наномасштабном уровнях. ЯДС начинает формироваться в деформируемом кристалле в конце второй начале третьей стадии кривой деформационного упрочнения металлов и заканчивается в конце третьей стадии (см. работу [32] и библиографию в ней). При дальнейшем деформировании в материале формируется фрагментированная дислокационная структура – ФДС (на четвертой и пятой стадии кривой деформационного упрочнения). Считается, что ЯДС является процессом самоорганизации дислокаций в условиях множественного скольжения. Для ее возникновения необходимо выполнение определенного критерия, связывающего коэффициенты размножения, иммобилизации и аннигиляции дислокаций. Смоделированная в работе [32] ЯДС показана на рисунке 11.

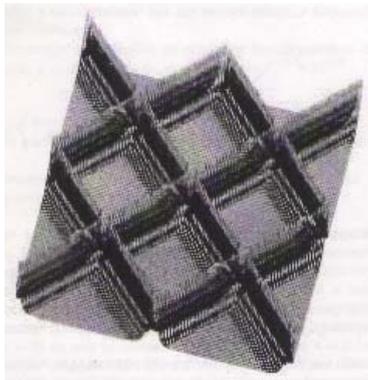


Рис. 11. Ячеистая дислокационная структура в аксонометрической проекции [32]

В процессе ионно-плазменного нанесения покрытий и при остывании в последнем формируются напряженные состояния [33], которые могут являться источниками размножения дислокаций по всему объему осаждаемого покрытия. Наблюдаемое при этом резкое увеличение микротвердости образованной пленки является следствием дислокационного упрочнения материала покрытия.

Полученные нами экспериментальные данные в принципе укладываются во все рассмотренные нами модели: концентрационного переохлаждения, связанного с наличием радиального градиента концентрации

примеси нитрида титана или циркония; ячеек Бенара, возникновение которых обусловлено наличием вертикального градиента температуры; ячеистой дислокационной структуры, связанной с наличием пластических деформаций в покрытии. Окончательный выбор модели и, соответственно, управляющего параметра пока еще не сделан. Возможно, что на процесс формирования покрытий оказывают влияние все механизмы в той или степени.

6. Автоволновые процессы при формировании плазменных покрытий

В случае ионно-плазменных покрытий процесс их формирования в режиме реального времени пока не наблюдается в силу специфики технологического процесса. Поэтому основная информация получается при варьировании, как состава осаждаемого материала, так и технологических параметров осаждения. В связи с этим в данном случае совершенствуются методики исследования уже синтезированных покрытий и модели их формирования (оптическая, электронная, атомно-силовая микроскопия и многие другие экспериментальные методы).

Здесь мы обсудим эффект самоорганизации ионно-плазменных покрытий при их формировании на основе модели автоволновых процессов (АВП). Основой для привлечения этой модели послужили полученные нами экспериментальные результаты по исследованию микротвердости ионно-плазменных покрытий.

На рисунке 12, в качестве примера, показано изменение микротвердости нитрид титанового покрытия поперек образца. Аналогичные данные получены практически для всех исследованных нами образцов (более 100 образцов).

Как видно из рисунка, изменение микротвердости носит «квазипериодический» характер. Из приведенных выше экспериментальных исследований следует, что формирование ионно-плазменного покрытия в пространственных координатах следует «квазипериодическому» закону, т.е. отвечает некоторому автоволновому процессу (АВП).

В работе [34] рассмотрены автоколебательные процессы при воздействии концентрированных потоков энергии (струи плазмы, лазерные, электронные, ионные лучи и т. д.) на материалы, но не при формировании покрытий.

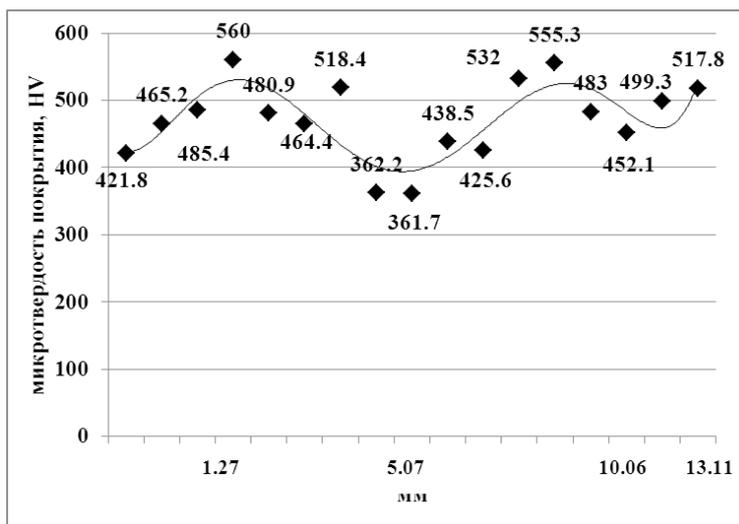


Рис. 12. Микротвердость покрытия 12X18H10T + Ti в азоте 120 мин подложка Ст 45 поперек образца

Под АВП принято понимать самоподдерживающейся в активной нелинейной среде волновой процесс (включая стационарные структуры), сохраняющий свои характеристики постоянными за счет распределенного в среде источника энергии [35]. Эти характеристики – период, длина волны (или импульса), скорость распространения, амплитуда и форма – в установившемся режиме зависят только от локальных свойств среды и не зависят от начальных, а достаточно далеко от границ среды и от краевых условий. При этом в пространстве предполагается связь посредством переноса диффузионного типа.

Сами термины «автоволновой процесс» (АВП), «автоволна» (АВ) были предложены Р.В. Хохловым, хотя теория автоволн была развита математиками – работы Р. Фишера (1937 г.), А.Н. Колмогорова, Г.И. Петровского и И.С. Пискунова (1937 г.), Н. Винера и А. Розенблюта (1946 г.), А. Тьюринга (1952 г.) – задолго до их экспериментального открытия [35]. В последующем теория АВП стала неотъемлемой частью теории самоорганизации или синергетики [36-38].

Большой класс АВ-сред условно можно описать с помощью следующей схемы. В открытую распределенную систему извне поступает энергия или вещество, богатое энергией. Эти потоки управляются локальными свойствами регулирующей поверхности или, точнее, пограничного слоя малой толщины. В свою очередь локальные свойства поверхности зависят как от волн температуры, потенциала концентрации, рас-

пространяющихся вдоль тонкого пограничного слоя, так и от процессов, происходящих в подложке. К таким системам относятся волны окисления аммиака и углерода на платине и ряд других [35].

Во втором классе АВ-сред поверхностные эффекты не столь выражены. Локальная положительная обратная связь обеспечивает наличие N-образной характеристики среды с падающим участком «отрицательного» сопротивления в любом элементарном объеме. К таким средам и пространственно-временным структурам в них относятся автоколебательные реакции Белоусова-Жаботинского, домены в электронно-дырочной плазме полупроводников и ряд других [36].

К третьему классу можно отнести сложные многофазные среды, в которых неравновесность и АВП поддерживаются за счет энергии лазерного излучения, энергии ионной плазмы, как в наших экспериментах, термохимических реакций и других источников. Подобные явления определяются не только диффузией и теплопередачей, но и гидродинамическими потоками, в частности конвекцией, испарением, кипением, поверхностным натяжением. Образование структур с участием поверхностных явлений рассматривалось в монографии [39].

Из приведенных выше рассуждений следует, что класс рассматриваемых явлений, наблюдаемых в наших экспериментах, относится к третьему классу, хотя при определенных упрощениях его можно отнести и к первому.

Основой моделей, описывающих процессы в активной распределенной кинетической системе, служат уравнения материального баланса:

$$\frac{\partial x_i}{\partial t} = F_i(x_1, x_2, \dots, x_n) - \text{div} I_i. \quad (13)$$

где x_i – взаимодействующие между собой компоненты, I_i – поток i -го компонента:

$$I_i = V x_i - \sum_{k=1}^n D_{ik} \text{grad} x_k, \quad (14)$$

где V – направленная скорость движения компонента, а D_{ik} – матрица коэффициентов диффузии.

В простейшем случае одномерного пространства уравнения (13)-(14) запишутся следующим образом:

$$\frac{\partial x_i}{\partial t} = F_i(x_1, x_2, \dots, x_n) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\sum_{k=1}^n D_k(x_1, x_2, \dots, x_n) \frac{\partial x_i}{\partial r} \right). \quad (15)$$

Краевые условия систем (13)-(15) определяются конкретными задачами, но наиболее часто используются условия «непроницаемости» границ конечного отрезка $[0, L]$:

$$\left. \frac{\partial x_i}{\partial t} \right|_{r=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial x_i}{\partial t} \right|_{r=L} = 0. \quad (16)$$

При этих условиях система максимально автономна и характер АВП менее всего подвержен влиянию границ.

Если перемешивание внутри «объема» $[0, L]$ происходит достаточно быстро, то в любой его части процессы синхронны и система описывается так называемыми «точечными» уравнениями [35]:

$$\frac{\partial x_i}{\partial t} = F_i(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (17)$$

Формально от системы (15) к (17) можно перейти при $D_{ik} \rightarrow \infty$. Физически это означает, что переход к (17) отвечает нулевому приближению по отношению характерных времен диффузии.

В наших экспериментах приближение (17) не может быть применено. Это отчетливо видно из рисунка 14, где длина волны составляет порядка 10^{-4} м, т.е. скорость массопереноса составляет $\sim 10^{-4}$ м/с. Поскольку скорость массопереноса $V \approx \sqrt{D/t}$, то для

коэффициента диффузии получаем оценку $D \sim 10^{-8}$ м²/с. Это отвечает режиму малой диффузии.

Нелинейные свойства среды, когда возникают условия для возникновения диссипативных структур, можно получить не только при предположении о нелинейности функции F в задачах (15)-(17), но и при наложении других условий на отрезке $[0, L]$. Например, задавая произвольный закон движения границы L . В этом случае мы приходим к нелинейным задачам Стефана, которые также допускают решения в виде АВП (см. уравнение 4 и рис. 1).

В монографии [40] предпринята попытка создания единой теории диссипативных структур Тьюринга-Пригожина для систем параболических и гиперболических уравнений с малой диффузией. Для этого развиваются специальные асимптотические методы исследования проблем существования и устойчивости высокомодовых стационарных режимов в сингулярно возмущенных системах, позволяющие получить весьма тонкие утверждения о неограниченном росте количества устойчивых диссипативных структур (как стационарных, так и периодических по времени) при уменьшении коэффициентов диффузии и при фиксированных прочих параметрах.

7. Поверхностное натяжение и жаростойкость покрытий

В настоящее время нанесение жаростойких покрытий осуществляется, в основном, вакуумными дугowymi или магнетронными методами [41-48]. При этом используются различные составы мишеней, включающие в себя такие металлы как хром, титан, цирконий в сочетании с цветными металлами. Исследованные нами покрытия наносились ионно-плазменным методом при одновременном распылении катода из стали 12Х18Н10Т и композиционных катодов. Метод определения жаростойкости основан на ГОСТ 6130-71 «Металлы. Методы определения жаростойкости» и распространяется на определение жаростойкости газотермических покрытий. Жаростойкость определяют путем выдержки образцов с покрытием (и контрольных без покрытия) в воздушной печи в течение заданного времени при постоянной температуре с последующим взвешиванием, осмотром, металлографическим исследованием. Ускоренные циклические испытания прово-

дят с выключением печи через (10–50) часов. Результаты эксперимента представлены в табл. 6 и 7.

Таблица 6

Потеря массы покрытия, полученного в среде аргона, после термической обработки при 600°C в течении 100 часов

Покрывтие	Масса окислевшегося покрытия, мг
Образец без покрытия, сталь 45	56,8
12X18H10T+Zr	24,4
12X18H10T+Zn-Cu-Al	14,4
12X18H10T+Fe-Al	5,6
12X18H10T+Zn-Al	14,2
12X18H10T+Al	4,8
12X18H10T+Cu	2,7

Таблица 7

Потеря массы покрытия, полученного в среде азота, после термической обработки при 600°C в течении 100 часов

Покрывтие	Масса окислевшегося покрытия, мг
Образец без покрытия, сталь 45	56,8
12X18H10T+Zr	35,1
12X18H10T+Zn-Cu-Al	20,7
12X18H10T+Fe-Al	8,1
12X18H10T+Zn-Al	20,4
12X18H10T+Al	6,9
12X18H10T+Cu	3,9

Из сравнения результатов таблиц 6 и 7 с таблицей 5 следует вывод: чем больше поверхностное натяжение покрытия, тем больше его жаропрочность. Если жаропрочность обозначить – ζ , то сказанное математически можно записать в виде функциональной зависимости:

$$\zeta = f(\sigma) = C \cdot \sigma, \quad (18)$$

где C – некоторая постоянная.

Поскольку поверхностное натяжение металла пропорционально его температуре плавления, то отсюда следует, что жаропрочность, в первую очередь, зависит от температуры плавления металла.

8. Поверхностное натяжение и коррозионная стойкость покрытий

Антикоррозионные покрытия, полученные магнетронным методом рассматривались в работах [49-55].

В случаях, когда коррозионный процесс протекает как общая коррозия, для оценки скорости коррозии можно использовать изменение количества металла в результате процесса, изменения количества реакционного агента (окислителя) или одного из продуктов коррозии во времени.

Поскольку коррозионный процесс является гетерогенным, то соответствующие количественные характеристики должны быть отнесены к единице поверхности. В таблицах 8 и 9 приведена скорость коррозии при 600 °С исследованных покрытий, которая определялась по формуле:

$$v_k = \Delta m / S \cdot t, \quad (19)$$

где Δm – убыль (увеличение) массы; S – площадь образца; t – время.

Таблица 8

Скорость коррозии при 600 °С покрытия, полученного в среде аргона

Покрывтие	Скорость коррозии, г/м ² ·ч
Образец без покрытия, сталь 45	2,84
12X18H10T+Zr	1,22
12X18H10T+Zn-Cu-Al	0,72
12X18H10T+Fe-Al	0,28
12X18H10T+Zn-Al	0,71
12X18H10T+Al	0,24
12X18H10T+Cu	0,13

Таблица 9

Скорость коррозии при 600 °С покрытия, полученного в среде азота

Покрывтие	Скорость коррозии, г/м ² ·ч
Образец без покрытия, сталь 45	2,84
12X18H10T+Zr	1,76
12X18H10T+Zn-Cu-Al	1,03
12X18H10T+Fe-Al	0,40
12X18H10T+Zn-Al	1,02
12X18H10T+Al	0,34
12X18H10T+Cu	0,19

Из сравнения результатов таблиц 8 и 9 с таблицей 5 следует вывод: чем больше поверхностное натяжение покрытия, тем больше его коррозионная стойкость. Если коррозионную стойкость обозначить – χ , то сказанное математически можно записать в виде функциональной зависимости:

$$\chi = f(\sigma) = C_1 \cdot \sigma, \quad (20)$$

где C_1 – некоторая постоянная.

Формулы 19 и 20 математически эквивалентны. Разница только в постоянных C и C_1 .

Сравним полученные результаты со скоростью коррозии некоторых коррозионно-стойких нержавеющей сталей (табл. 10).

Т а б л и ц а 1 0
Скорость коррозии наиболее коррозионно-стойких сталей

Марка стали	Скорость коррозии, г/м ² ·ч
X23H28M3Д3Т	0,21
X23H27M3Т	0,26
X18H12M3Т	0,80

Из сравнения результатов таблиц 8 и 9 с таблицей 10 следует вывод: коррозионная стойкость большей части исследованных покрытий не уступает наиболее коррозионно-стойким сталям.

Тем более, любое из покрытий таблиц 8 и 9 значительно превосходит коррозионную стойкость стали 45, которая широко используется как конструкционная сталь при изготовлении: вал-шестерни, коленчатые и распределительные валы, шестерни, шпиндели, бандажи, цилиндры, кулачки и другие

нормализованные, улучшаемые и подвергаемые поверхностной термообработке детали, от которых требуется повышенная прочность.

9. Оценка температуры плавления и рекристаллизации легированных стальных покрытий

Температуры плавления и затвердевания стали зависят от ее состава. Как правило при расчете T_L и T_S делают допущение об аддитивности влияния легирующих примесей на значения этих величин. Используя результаты экспериментального определения поверхностного натяжения многоэлементных покрытий и результаты расчета этой величины по данным элементного анализа, можно показать, что усредненная величина поверхностного натяжения есть величина аддитивная. В этом случае температуру плавления покрытия можно оценить по формуле (соответствующие оценки приведены в таблицах 11 и 12):

$$T_{пл} = 1,4 \cdot 10^3 \cdot \sigma(K) \quad (21)$$

Как следует из таблиц 11 и 12, температура плавления покрытий, полученных в среде аргона ниже, чем для покрытий, полученных в среде азота. Особенно большая разница наблюдается для покрытий, легированных цирконием.

Температура плавления сталей зависит от их химического состава, но лежит в пределах (1450 – 1520) К. Как видно из таблиц 11 и 12 покрытия 12Х18Н10Т+Al, 12Х18Н10Т+Fe-Al и 12Х18Н10Т+Cu, полученные в среде аргона, по температуре плавления значительно превосходят все стали.

Т а б л и ц а 1 1
Температура плавления многоэлементных покрытий, полученных в среде аргона

Покрытие	Т, К	Покрытие	Т, К
12Х18Н10Т+Zr	1358	12Х18Н10Т+Zn-Al	1537
12Х18Н10Т+Zn-Cu-Al	1530	12Х18Н10Т+Al	1602
12Х18Н10Т+Fe-Al	1809	12Х18Н10Т+Cu	2023

Т а б л и ц а 1 2
Температура плавления многоэлементных покрытий, полученных в среде азота

Покрытие	Т, К	Покрытие	Т, К
12Х18Н10Т+Zr	1259	12Х18Н10Т+Zn-Al	1098
12Х18Н10Т+Zn-Cu-Al	1042	12Х18Н10Т+Al	1121
12Х18Н10Т+Fe-Al	1448	12Х18Н10Т+Cu	1445

Заключение

Среди методов нанесения защитных покрытий, основанных на воздействии на поверхность детали потоков частиц и квантов с высокой энергией, большое внимание привлекают вакуумные ионно-плазменные, электродуговые и магнетронные методы. Характерной их чертой является прямое преобразование электрической энергии в энергию технологического воздействия, основанной на структурно-фазовых превращениях в осажденном на поверхности конденсате или в самом поверхностном слое детали, помещенной в вакуумную камеру.

В настоящее время нет количественной теории, позволяющей прогнозировать желаемые свойства покрытий в зависимости от технологических условий их получения, от используемых материалов катодов и мишеней и т.д. Поэтому даже качественные модели могут помочь избежать большого объема рутинных, но дорогих работ.

В настоящем обзоре мы сделали акцент только на одном управляющем параметре при формировании плазменных покрытий – поверхностном натяжении, которое и само зависит от многих факторов. Однако в рамках данной концепции удается охватить широкий круг вопросов, связанных с технологией получения функциональных покрытий.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Кузнецову В.М. и Овчиникову С.В. (ТГУ, г. Томск) за помощь в проведении ряда экспериментов.

Список литературы

1. Veprek S., Jilek M. Super- and ultrahard nanocomposite coatings: generic concept for their preparation, properties and industrial applications // *Vacuum*. – 2002. – V. 67. – P. 443-449.
2. Коротаяев А.Д., Мошков В.Ю., Овчинников С.В. и др. Наноструктурные и нанокompозитные сверхтвердые покрытия // *Физическая мезомеханика*. – 2005. – Том. 8. – №5. – С. 103-116.
3. Решетняк Е.Н., Стрельницкий В.Е. Синтез упрочняющих наноструктурных покрытий // *Вопросы атомной науки и техники*. – 2008. – №2. – С. 119-130.
4. Шулаев В.М., Андреев А.А., Неклюдов И.М. и др. Исследование особенностей нанокристаллического строения сверхтвердых покрытий монокристалла титана // *Вопросы атомной науки и техники*. – 2009. – №6. – С. 254-261.
5. Погребняк А.Д., Шпак А.П., Азаренков Н.А., Береснев В.М. Структура и свойства твердых и сверхтвердых нанокompозитных покрытий // *УФН*. – 2009. – Том. 179. – №1. – С. 35-64.
6. Соболев О.В., Андреев А.А., Горбань В.Ф. и др. О воспроизводимости однофазного структурного состояния многоэлементной высокоэнтропийной системы Ti-V-Zr-Nb-Hf и высокотвердых нитридов на ее основе при их формировании вакуумно-дуговым методом // *Письма в ЖТФ*. – 2012. – Том. 38. – Вып. 13. – С. 40-47.
7. Tsai M.H., Yeh J.W. High-entropy alloys: a critical review // *Mater. Res. Lett.* – 2014. – Vol. 2. – P. 107-123.
8. Погребняк А.Д., Багдасарян А.А., Якущенко И.В., Береснев В.М. Структура и свойства высокоэнтропийных сплавов и нитридных покрытий на их основе // *Успехи химии*. – 2014. – Т. 83. – №11. – С. 1027-1061.
9. Schuh B., Mendez-Martin F., Vulker B. et al. Mechanical properties, microstructure and thermal stability of a nanocrystalline CoCrFeMnNi high-entropy alloy after severe plastic deformation // *Acta Materialia*. – 2015. – Vol. 96. – P. 258-268.
10. Комаров Ф.Ф., Погребняк А.Д., Константинов С.В. Радиационная стойкость высокоэнтропийных наноструктурированных покрытий (Ti, Hf, Zr, V, Nb) N // *Журнал технической физики*. – 2015. – Том 85. – Вып. 10. – С. 106-111.
11. Псахье С.Г., Зольников К.П., Коноваленко И.С. Синтез и свойства нанокристаллических и субструктурных материалов. – Томск: Изд-во ТГУ, 2007. – 264 с.
12. Чернов А.А., Гиваргизов Е.И., Багдасаров Х.С. и др. Современная кристаллография. Т. 3. Образование кристаллов. – М.: Наука, 1980. – 408 с.
13. Yurov V.M. Superficial tension of pure metals // *Eurasian Physical Technical journal*. – 2011. – Vol. 8. – № 1(15). – P. 10-14.
14. Юров В.М. Размерная зависимость поверхностного натяжения и гомогенное зарождение кристаллов: межвуз. сб. научных трудов. Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2015. – Вып. 7. – С. 548-554.
15. Юров В.М., Ибраев Н.Х., Гученко С.А. Экспериментальное определение поверхностного натяжения наночастиц и нанопленок // *Известия ВУЗов. Физика*. – 2011. – Т. 54. – №1/3. – С. 335-340.
16. Скрипов В.П., Каверда В.П. Гомогенное зарождение кристаллов в жидкостях и аморфных слоях / В кн.: Проблемы современной кристаллографии. – М.: Наука, 1987. – С. 232-246.
17. Gupta S.C. The Classical Stefan Problem: Basic Concepts, Modelling and Analysis. – Amsterdam: Elsevier, 2003 – 385 p.
18. Юров В.М. Некоторые вопросы физики поверхности твердых тел // *Вестник КарГУ. Физика*. – 2009. – № 1 (53). – С. 45-54.
19. Андриевский Р.Л., Глезер А.М. Прочность наноструктур // *УФН*. – 2009. – Т. 179. – № 4. – С. 337-358.
20. Малыгин Г.А. Прочность и пластичность нанокристаллических материалов и наноразмерных кристаллов // *УФН*. – 2011. – Т. 181. – № 11. – С. 1129-1156.
21. Юров В.М., Лауринас В.Ч., Гученко С.А. Некоторые вопросы физики прочности металлических наноструктур: межвуз. сб. научных трудов. Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – Тверь: ТГУ, 2013. – Вып. 5. – С. 408-413.
22. Русанов А.И. Фазовые равновесия и поверхностные явления. – Л.: Химия, 1967. – 346 с.
23. Юров В.М. Механическая прочность металлических наноструктур // *Вестник КарГУ. Физика*. – 2013. – № 3 (71). – С. 56-61.
24. Gilman J. Direct Measurements of the surface energies of crystals // *J. Appl. Phys.* – 1960. – Vol. 31. – № 2. – P. 2208-2216.
25. Гегузин Я.Е., Овчаренко Н.Н. Методы определения поверхностной энергии твердых тел // *УФН*. – 1962. – Т. 76. – Вып. 2. – С. 283-305.
26. Гохштейн А.Я. Поверхностное натяжение твердых тел и адсорбция. – М.: Наука, 1976. – 256 с.
27. Ролдугин В.И. Физикохимия поверхности. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2008. – 508 с.

28. Юров В.М., Лауринас В.Ч., Гученко С.А., Завацкая О.Н. Размерные эффекты и поверхностное натяжение чистых металлов // *Успехи современного естествознания*. – 2012. – №7. – С. 88-93.
29. Юров В.М., Лауринас В.Ч., Гученко С.А. Поверхностное натяжение упрочняющих покрытий // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2014. – № 1. – С. 33-36.
30. Вайнгард У. Введение в физику кристаллизации металлов. – М.: Мир, 1967. – 170 с.
31. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. – М.: Наука, 1972. – 232 с.
32. Малыгин Г.А. Моделирование деформационного рельефа поверхности пластически деформируемого кристалла // *ФТТ*. – 2007. – Том. 49. – Вып. 8. – С. 1392-1397.
33. Барвинок В.А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий. – М.: Машиностроение, 1990. – 384 с.
34. Углов А.А., Селищев С.В. Автоколебательные процессы при воздействии концентрированных потоков энергии. – М.: Наука, 1987. – 150 с.
35. Васильев В.А., Романовский Ю.М., Яхно В.Г. Автоволновые процессы. – М.: Наука, 1987. – 240 с.
36. Хакен Г. Информация и самоорганизация: Макроскопический подход к сложным системам. – М.: Мир, 1991. – 240 с.
37. Заславский Г.М. Физика хаоса в гамильтоновых системах. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. – 288 с.
38. Анищенко В.С., Вадивасова Т.Е., Шиманский-Гайер Л. Динамическое и статистическое описание колебательных систем. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005. – 156 с.
39. Kahrig E., Beberdich H. *Dissipative Strukturen*. – Leipzig: VEB Georg Thieme, 1977. – 342 p.
40. Мищенко Е.Ф., Садовничий В.А., Колесов А.Ю., Розов Н.Х. Автоволновые процессы в нелинейных средах с диффузией. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 395 с.
41. Musil J., Danie R. Structure and mechanical properties of magnetron sputtered Zr–Ti–Cu–N films // *Surface and Coatings Technology*. – 2003. – V. 166. – P. 243-253.
42. Musil J., Polakova H. Hard nanocomposite Zr-Y-N coatings, correlation between hardness and structure // *Surface and Coatings Technology*. – 2000. – V. 127. – P. 99-106.
43. Daniel R., Musil J., Zeman P., Mitterer C. Thermal stability of magnetron sputtered Zr–Si–N films // *Surface and Coatings Technology*. – 2006. – V. 201. – P. 3368-3376.
44. Xueliang Q., Yanhong H., Yiping W., Jianguo Ch. Study on functionally gradient coatings of Ti–Al–N // *Surface and Coatings Technology*. – 2000. – V. 131. – P. 462-464.
45. Scheerer H., Hoche H., Broszeit E. and other. Effects of the chromium to aluminum content on the tribology in dry machining using (Cr, Al)N coated tools // *Surface and Coatings Technology*. – 2005. – V. 200. – P. 203-207.
46. Brizuela M., Garcia-Luisa A., Braceras I. and other. Magnetron sputtering of Cr(Al)N coatings: Mechanical and tribological study // *Surface and Coatings Technology*. – 2005. – V. 200. – P. 192-197.
47. Monclus M.A., Baker M.A., Tsotsos C. and other. Investigation of the nanostructure and post-coat thermal treatment of wear-resistant PVD (Cr-Ti-Cu-B)N coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2005. – V. 200. – P. 310-314.
48. Wang L., Niea X., Housden J. and other. Material transfer phenomena and failure mechanisms of a nanostructured Cr–Al–N coating in laboratory wear tests and an industrial punch tool application // *Surface and Coatings Technology*. – 2008. – V. 203. – P. 816-821.
49. Lorpez D., Alonso Falleiros N., Tschiptschin A.P. Effect of nitrogen on the corrosion–erosion synergism in an austenitic stainless steel // *Tribology International*. – 2011. – Vol. 44. – P. 610-616.
50. Liu R., Li X., Hu X., Dong H. Surface modification of a medical grade Co–Cr–Mo alloy by low-temperature plasma surface alloying with nitrogen and carbon // *Surface and Coatings Technology*. – 2013. – Vol. 232. – P. 906-911.
51. Lv Jinlong, Luo Hongyun. Effect of surface burnishing on texture and corrosion behavior of 2024 aluminum alloy // *Surface and Coatings Technology*. – 2013. – Vol. 235. – P. 513-520.
52. Lee Y.J., Lee T.H., Kim D.Y. et. al. Microstructural and corrosion characteristics of tantalum coatings prepared by molten salt electrodeposition // *Surface and Coatings Technology*. – 2013. – Vol. 235. – P. 819-826.
53. Castillejo F.E., Marulanda D.M., Olaya J.J., Alfonso J.E. Wear and corrosion resistance of niobium–chromium carbide coatings on AISI D2 produced through TRD // *Surface and Coatings Technology*. – 2014. – Vol. 254. – P. 104-111.
54. Alvarez-Asencio R., Sababi M., Pan J. et. al. Role of microstructure on corrosion initiation of an experimental tool alloy: A Quantitative Nanomechanical Property Mapping study // *Corrosion Science*. – 2014. – Vol. 89. – P. 236-241.
55. Skliarova H., Renzelli M., Azzolini O. et. al. Niobium–niobium oxide multilayered coatings for corrosion protection of proton-irradiated liquid water targets for [¹⁸F] production // *Thin Solid Films*. – 2015. – Vol. 591. – P. 316-322.

УДК 658

РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА И ЕЕ СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ: НАУЧНЫЙ ОБЗОР

Язвенко П.В., Воронов М.П.

*Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург,
e-mail: mstrk@yandex.ru*

Проведен научный обзор публикаций с начала периода становления менеджмента качества до наших дней. Рассматриваются различные концепции и подходы к управлению качеством, а также эволюция их развития в ходе технического прогресса. Исследуются как зарубежные классики (Тейлор, Деминг, Ишикава и другие), так и русскоязычные авторы (Лapidус, Карлик, и другие). Анализируются такие концепции и подходы к управлению качеством, как система Шухарта PDCA, методы Тагучи, концепция ежегодного улучшения качества AQI Джурана, концепция ZD Кросби, концепция Шинго, квалиметрия как методология и проблематика комплексной оценки качества, концепция всеобщего менеджмента качества TQM, советская школа управления качеством.

Ключевые слова: управление качеством, научный обзор, менеджмент.

QUALITY MANAGEMENT SYSTEM DEVELOPMENT AND ITS CONDITION NOWADAYS: SCIENTIFIC REVIEW

Yazvenko P.V., Voronov M.P.

Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, e-mail: mstrk@yandex.ru

An overview of scientific publications since the beginning of the period of formation of quality management to the present day is considered. Various concepts and approaches to quality management, as well as the evolution of their development in the course of technical progress are presented. We study both foreign classics (Taylor, Deming, Ishikawa and others), and the Russian-speaking authors (Lapidus, Karlik, and others). We analyze such concepts and approaches to quality management as the Shewhart's system PDCA, Taguchi's method, the concept of an annual quality improvement AQI by Juran, concept ZD by Crosby, the concept by Shingo, qualimetry as a methodology for a comprehensive assessment of the quality, the concept of total quality management TQM, the Soviet school of quality management.

Keywords: quality management, scientific review, management.

Становление менеджмента качества началось с научных трудов Ф.У. Тейлора [35], результатом которых стало разделение продукции на качественную и некачественную.

Развитие статистических методов управления качеством связано с такими именами, как, В.Э. Шухарт [30] и У.Э. Деминг [8, 21, 22]. Результатом их работ является возможность осуществления управления качеством процессов путем использования фактических данных.

В развитие менеджмента качества внесли большую роль следующие ученые: К. Ишикава (Ишикава) [10, 26], Ф.Б. Кросби [13], Г. Тагути [34], А.В. Фейгенбаум [17, 25], Ш. Шинго [31-33], Дж. Джуран [9,27] и др.

Проблема изучения предмета управления качеством в России исследуется многими отечественными авторами: В.А. Лapidус [14], Е.М. Карлик [11], Л.М. Бадалов [1], Л.П. Гайжаукас [3], И.А. Будищева [2], Н.В. Козицина и К.М. Рахлин [12], А.В. Горбунов [7], А.В. Гличев [4-6] и др.; а также зарубежными авторами: Хсиен Х. Кху [28], Д.А. Еклоф [23], С. Кассел с соавторами [19], С.О. Лонгенекер [29], Н. Чилши [20], и др.

Классиком в области научного управления предприятием является американский инженер Ф.У. Тейлор [35].

История развития менеджмента качества взяла свое начало с системы Тейлора, датируемая 1905 г. Эта система устанавливала требования к качеству продукции в виде шаблонов (интервалов допусков), названных калибрами. Контроль осуществлялся специалистами (инспекторами). Система Тейлора подразумевает деление продукции на качественную и дефектную (брак), включает в себя законы и правила, заменяющие личные суждения работника и с пользой применяемые после того, как будет произведен систематический учет и измерение их действия».

В монографии «Принципы научного менеджмента «The Principles of Scientific Management»» автор выделяет основную задачу организации предприятия, которая заключается в обеспечении максимальной прибыли как для предприятия в целом, так и для каждого работника в частности. Автор считает, что существуют 3 причины низкой производительности труда:

1. заблуждение, что реальное повышение выработки (на каждого человека и машину) приведет в конечном результате к лишению работы значительного числа занятых в ней рабочих;

2. была ошибочная система организации управления предприятиями, которая принуждает каждого рабочего «прохлаждаться» или работать медленно, защищая этим свои собственные насущные интересы;

3. непроизводительные, грубо-практические методы производства, которые до настоящего времени почти повсеместно господствуют во всех отраслях промышленности и, применяя которые, наши рабочие затрачивают даром значительную долю своих усилий.

Ф. Тейлор считал, что «только путем принудительной стандартизации методов, принудительного использования наилучших условий и орудий труда и принудительного сотрудничества можно обеспечить общее ускорение темпа работы».

В монографии Г. Эмерсона «Двенадцать принципов производительности» [24] изложены принципы управления предприятием. Автор ввел термин эффективность (производительность) и рассматривал его как наиболее выгодное соотношение между затратами и экономическими результатами. Г. Эмерсон сформулировал 12 принципов производительности и организации труда, которые являются универсальными, т.е. их можно применить в любой сфере деятельности для достижения максимальных результатов. Автор предложил:

- ставить конкретные цели;
- анализировать процесс с точки зрения здравого смысла;
- обращаться к компетентной консультации;
- соблюдать дисциплину;
- справедливо относиться к персоналу;
- производить полный, быстрый, точный, надежный и постоянный учет;
- планировать работы;
- нормировать работы;
- нормализовать условия;
- нормирование операций;
- использование письменных стандартных инструкций;
- поощрение за производительность.

Применяя данные методы на предприятии можно повысить его продуктивность.

Основой развития философии бережливого производства является научная работа

У. Шухарта [30], где рассматривается взаимосвязь между статистическими методами контроля состояния технологических процессов и производимой на основе данных методов продукции. Автор предложил использовать специальное графическое средство применения статистических методов, обосновывая тем самым существование рассматриваемой взаимосвязи. Данное средство было названо «Контрольные карты Шухарта» и применялось для управления процессами и выявления отклонений статистических данных от установленных нормативов. Ученый предложил организационную структуру управления производством (система Шухарта), которая заключалась в применении процессного подхода не только при контроле качества, но и при организации производственных связей, следуя процессу производства. В своей книге автор описал концепцию PDCA:

- Plan – планируйте;
- Do – делайте;
- Check – проверяйте;
- Act – действуйте.

Впоследствии, данная концепция была доработана доктором Э. Демингом и реализована в Японии. Э. Деминг [22] пропагандировал использование цикла PDCA в качестве основного способа достижения непрерывного улучшения процессов. В 1950 г. он модифицировал цикл PDCA, добавив цикл PDSA («study» – изучать).

Во второй половине XX века промышленное развитие стран привело к уравниванию цен. Именно поэтому в конкурентной борьбе проблема качества вышла на первый план.

Э. Деминг [8, 21] в своей книге «Выход из кризиса» сформулировал «14 принципов управления качеством», благодаря которым можно структурировать все процессы, обозначить ответственность и взаимосвязи каждого сотрудника, использовать положительный и отрицательный опыт для постоянного улучшения компании. В этой книге автор приходит к выводу, что причины низкой эффективности и плохого качества чаще всего заложены в системе, а не в работниках.

Ключевой работой начала 50-х годов можно считать монографию Дж. Джурана [27], включающая в себя исследования в области качества с точки зрения экономики. Дж. Джуран стал первым, кто доказал необходимость перехода от контроля к управлению качеством. Автор ввел в оборот

«принцип Парето» (другое название – «принцип 20/80»), который заключается в том, что только 20% дают 80% результата, а 80% усилий дают только лишь 20% результата. Исходя из этого принципа были сформулированы правила:

1. Большинство ежедневных действий являются неэффективными;
2. К успеху могут привести только несколько факторов;
3. Важно учитывать нюансы;
4. Важно уметь предвидеть будет ли работать идея или ее нужно изменять;
5. Не зависимо от приложенных стараний – большая их часть является неэффективной.

Данный закон применим во многих областях, но более широко используется в сфере управления, политике, психологии. Применение «принципа 20/80» помогает сосредоточиться на тех действиях, которые получают больше всего, а также, распланировать день наиболее эффективным образом для большей продуктивности и т.д.

В книге Г. Тагучи [34] описываются методы, предложенные автором. Методы Тагучи являются одним из инструментов управления качеством, цель которого заключается в оптимизации процессов и продукции до начала производства. Методы включают в себя:

1. Статистическое управление процессами (SPC), используемое для сохранения величин показателей качества рядом с целевыми значениями. Вводится отклик «сигналу».
2. Планирование экспериментов.
3. Развитие и реализация робастного управления процессами.
4. Контроль до запуска процесса.

Автор считает, что применяя данные методы, производитель может добиться выпуска конкурентоспособной продукции.

В более расширенном втором издании монографии Дж. Джурана [9] было предложено использовать триаду качества, смысл которой заключается в том, что управление качеством включает в себя три процесса, ориентированных на качество: планирование для достижения качества; контроль в процессе производства; улучшение качества с целью сокращения потерь. Он разработал «спираль качества» – пространственная модель, располагающаяся вне времени, определившая основные стадии непрерывно развивающихся работ по управлению ка-

чеством и послужившая прообразом многих появившихся позже моделей. В своей работе Дж. Джуран выделил основные категории затрат на обеспечение качества: затраты на предупреждение дефектности, затраты на оценку качества, издержки вследствие внутренних отказов и издержки из-за внешних отказов. Дж. Джурану принадлежит концепция ежегодного улучшения качества (AQI). В менеджменте под непрерывным улучшением понимается смена политики стабильности на политику изменений. Главным аспектом в концепции AQI является то, что необходимо сосредоточиться на стратегических решениях, более высокой конкурентоспособности и долгосрочных результатах.

Данную проблему продолжил изучать А. Фейгенбаум. В своей книге «Total quality control» [17] автор трактует качество как основу стратегии ведения бизнеса, в котором система управления качеством содействует развитию фирмы для успешной конкуренции на рынке, с целью получения максимальной прибыли. По мнению автора, главная задача управления качеством заключается в том, что можно добиться снижения затрат на качество путем удовлетворения запросов потребителя, предъявляемых к качеству продукции. Автор отмечает, что к данному промежутку времени многие фирмы изменили политику в области качества, заключающаяся в установлении лидирующего положения в производстве качественной продукции в определенном рыночном секторе. Данная политика способствует улучшению качества продукции и совершенствованию существующих технологий. Автор акцентирует свое внимание на создании службы управления качеством, описывая ее функции, организацию, ответственность, обязанности и полномочия. Более подробно рассматривается тема ответственности производителя за предоставление потребителю некачественного товара, т.к. это может привести к судебным искам, большим затратам на качество и выплатам издержек. Важным аспектом является взаимосвязь автоматизации и качества. Использование современного и высококачественного оборудования приводит к росту производительности труда, улучшению качества, т.к. ведет к снижению негативного воздействия субъективных факторов на качество продукции. Автоматизация выступает в качестве движущей силы для применения ста-

тистических методов из-за того, что имеется прямая зависимость между автоматизацией и обеспечением надежности оборудования. Автор рассматривает практические действия, обеспечивающие достижение необходимых уровней надежности. В книге особое внимание уделяется контролю как фактору, который подготавливает мероприятия по обеспечению качества.

В своей монографии Ф. Кросби [13] описывает концепцию «ZD» («Ноль дефектов»), основанную на положении о том, что за качество не платят. Платить приходится тогда, когда имеется недостаток качества. Данная концепция основывается на предупреждении появления дефектов, сокращении уровня дефектов, анализе деятельности по управлению качеством. Автор разработал 14 принципов, которые определяют последовательность шагов по достижению качества на предприятии. 14 принципов Кросби:

- Конкретное распределение ответственности руководства в области качества;
- Формирование команды;
- Определение методов оценки качества на всех этапах его формирования;
- Организация учета и оценки затрат;
- Вовлеченность персонала в политику руководства в области качества;
- Разработка корректирующих мероприятий;
- Внедрение системы «ZD»;
- Организация постоянного обучения работников;
- Организация дней «нулевых дефектов»;
- Постановка целей в области качества перед каждым работником;
- Разработка мероприятий, направленных на устранение причин дефектов;
- Разработка программы поощрения персонала;
- Создание групп, состоящих из экспертов;
- Повторение данного цикла на более высоком уровне.

Ф. Кросби дал определение термину «цена несоответствия», который означает определение расходов, относящиеся к устранению брака. Автор предложил систему качества, состоящую из принципов:

1. Качество – это соответствие требованиям;
2. В основе системы качества лежит предупреждение дефектов;
3. Стандартом качества является концепция «ZD»;

4. Качество измеряется ценой несоответствия.

В 1964 году японский инженер С. Шинго [31-33] выдвинул концепцию «Пока – Ёке», целью которого было увеличение себестоимости продукции путем предотвращения ошибок на производстве. Автор предложил метод, рассматриваемый с точки зрения производства, а не с точки зрения менеджмента. Реализация метода предусматривала выполнение четырех пунктов:

1. Привлечение группы специалистов, в состав которой входят представители руководства, технической службы и производства, отдела качества;
2. Обнаружение существующих проблем, выявление причин их возникновения;
3. Разработка мероприятий по устранению и предотвращению проблем;
4. Устранение существующих причин путем использования усовершенствованного оборудования.

Применение данного метода позволяет значительно уменьшить число ошибок на производстве, что ведет к уменьшению издержек и повышению уровня качества продукции и степени удовлетворенности потребителей. В отличие от концепции Ф. Кросби концепция С. Шинго акцентирует внимание на устранение дефектов, привлекая профессионалов, а не используя призывы и лозунги.

В конце 60-х гг. группа отечественных ученых А.В. Гличев, Г.Г. Азгальдов, З.Н. Крапивенский, Ю.П. Кураченко, В.П. Панов, М.В. Федоров, Д.М. Шпекторов [6] стали основоположниками новой науки – квалиметрии, в рамках которой изучались методология и проблематика комплексной оценки качества. Результаты научной работы ученые изложили в книге «Квалиметрия – наука об измерении качества продукции» [6]. Основные задачи квалиметрии заключались в выборе показателей качества, рассмотрении особенностей конкретного процесса, разработке методик нахождения оптимальных значений и др. Новая наука была напрямую связана с управлением качеством, т.к. невозможно эффективно управлять качеством без наличия объективных и точных методов его исследования.

В 1968 году [4] А.В. Гличев (в соавторстве с В.П. Пановым, Г.Г. Азгольдовым) публикует монографию «Что такое качество?», где были изложены положения, имеющие отношение к природе качества, а так-

же, систематизации его свойств и показателей. Автор отмечает, что существует ряд проблем, связанных с пониманием термина «качество», по этому, он уделит особое внимание теории и расшифровке значений терминов, связанных с данным понятием. Для того, чтобы дать определение термину «качество», автор применил метод классификации (с точки зрения экономики; отраслей; временного фактора; степени удовлетворенности потребителей; объектов, к которым применяется данное понятие). Результатом проведенного анализа является формулировка термина «качества» в разных сферах применения. А.В. Гличев предложил следующие формулировки терминов: Символизирующее качество, расширенное качество, интегральное качество, относительный уровень качества, абсолютный уровень качества, качество работы (бездефектность труда).

В работе «Быстрая переналадка для рабочих» [32] С. Шинго описал систему «Быстрая переналадка» (smед), которая позволила уменьшить производственные простои и увеличить гибкость производственного процесса.

В 1972 г. Д.С. Львов в своей книге «Экономика качества продукции» [15] рассматривал вопрос оптимизации уровня качества продукции, базирующийся оптимизации народнохозяйственного эффекта. Автор предложил первые методики расчета экономической эффективности повышения качества. В своей работе Д.С. Львов изложил результаты исследований, связанные с экономическим аспектом качества продукции, и ее взаимосвязь с экономической политикой страны.

В монографии К. Исикава «Guide to Quality Control. Asian Productivity Organization» [26] изложены основные сведения об опыте Японии по улучшению качества продукции. Автор занимался практической разработкой реализацией методов управления качеством продукции. К. Исикава отмечает, что наиболее важным аспектом для практической реализации методов улучшения качества являются структура и цель системы, сущность отдельных задач, а также, способы их распределения между всеми участниками производства. Автор сравнивает японское понимание системы TQM с результатами работ А. Фейгенбаума, который считал, что TQM должна осуществлять особая группа специалистов, занимающаяся ис-

ключительно вопросами, связанными с управлением качеством. К. Исикава ввел термин «управление качеством в рамках фирмы». Для реализации всеобщего участия в управлении качеством, было организовано движение кружков качества и постоянное обучение всех категорий рабочих. Цели и задачи фирмы в области улучшения качества разрабатываются высшим руководством на основе изучения потребностей потребителей и их отзывов о качестве продукции, выпускаемой на производстве. Для достижения этих целей осуществляется разработка и тщательная подготовка к производству новой продукции. В процессе производства все подразделения по своей специализации поддерживают выпуск продукции определенного качества и постоянно совершенствуют качество изготовления с помощью кружков качества. В итоге, формируются цели по улучшению качества и тщательно распределение задач по достижению целей между подразделениями и профессиональными группами персонала, т.е. качество становится заботой всех, а не отдельного специализированного подразделения по управлению качеством продукции. Автор подчеркивает, что, управляя качеством, нужно помнить о количестве изготавливаемых изделий, величине издержек производства и другие направления производственно-хозяйственной деятельности. Ему принадлежит термин «всестороннее управление качеством» смысл которого заключается в том, что хозяйственное управление – это всеобъемлющий процесс, главной задачей которого является качество продукции.

В 1977 г. Вышла работа «Затраты на обеспечение и повышение качества продукции. Их классификация», авторами которой стали Карлик Е.М и Демиденко Д.С. [11]. В своем труде ученые обозревают проблему стоимостного аспекта качества, затрагивая вопросы оценивания затрат на улучшение качества. Им принадлежит разработка методов выделения затрат на качества для существующей системы планирования на производстве.

Для комплексного решения задач, относящихся к повышению качества продукции и экономии ресурсов, Д.С. Бадалов [1] разработал экономико-статистический метод, описанный в книге «Экономические проблемы повышения качества продукции». Метод заключался в том, чтобы оценить ра-

циональность решения, сравнивая его экономические показатели с показателями аналогичных решений.

В русскоязычном издании книги А. Фейгенбаума [17] автором предисловья является А.В. Гличев, который анализирует результаты исследований А. Фейгенбаума и дает оценку совместимости применения данных принципов в системе качества в СССР. А.В. Гличев [5] отмечает, что проблема улучшения качества и технического уровня является долговременной задачей экономического развития Советского Союза. Проблему качества решали путем внедрения методов комплексного использования производственных мощностей. Автор приводит примеры данных методов: Горьковская система КАНАРСИИ, Ярославская НОРМ, Львовская комплексная система управления качеством продукции КСУКП и др. «Планомерное обеспечение всемирного использования научно-технических, производственных и социально – экономических возможностей для достижения постоянных высоких темпов улучшения качества всех видов продукции в интересах повышения эффективности общественного производства, наиболее полного удовлетворения потребностей населения, народного хозяйства, обороны страны и экспорта», – главная цель Единой системы государственного управления качеством продукции в СССР. Автор делает вывод, что принципы советской школы не совпадают с принципами школы, представителем которой является А. Фейгенбаум. Это объясняется тем, что советская школа управления качеством использует народно-хозяйственный подход к решению проблемы качества в интересах общества в целом. При капитализме не может быть единой общегосударственной системы управления качеством продукции, отсюда делается вывод, что повышение качества (при данном способе производства) является средством конкурентной борьбы для достижения максимальной прибыли, а не основной целью производства. Автор отмечает, что отечественная организация работ по изучению спроса нуждается в улучшении. В условиях плановой политики важно точное определение требований, предъявляемых потребителем к продукции, т.к. оно является реальным источником экономного и рационального использования ресурсов. В СССР улучшение качества было связано с коллективной и социальной сущно-

стью труда, заключающиеся в: создании движений под различными девизами (например, «Качеству – рабочую гарантию»), проведении соревнований смежников, вовлекались все рабочие в создании КСУКП и стандартов предприятия. Коллективная работа по улучшению качества определялась объективным характером социалистических отношений, целью которых было стимулирование всех участников производственного процесса для достижения единых задач. Подводя итог своего анализа, автор отмечает, что в условиях плановой политики СССР имелась методологическая основа организации работ по улучшению качества продукции, а методы, изложенные А. Фейгенбаумом, могут быть полезными только при решении практических вопросов, включающих организацию работы на предприятии в рамках комплексных систем управления качеством.

Л.П. Гайжаукас [3] был первым отечественным исследователем, кто взял за основу своих исследований результаты исследований Э. Деминга. Он применил метод классификации затрат на улучшение качества в условиях социалистического производства. Результаты данных исследований он отобразил в своей диссертации «Совершенствование учета затрат на обеспечение качества продукции».

В русскоязычном издании книги К. Исикава «Японские методы управления качеством» [10] автором предисловья является А.В. Гличев, который рассматривает взгляды советских специалистов на аспекты, рассмотренные в монографии К. Исикава. А.В. Гличев [5] отмечает, что в советской системе управления качеством принцип демократизма также был дополнен участием рабочих, инженеров, служащих, всех работающих в разработке стандартов предприятия по улучшению качества. К середине 70-х гг. была применена программа комплексной стандартизации разных уровней производства, результатом которой послужило создание отделов по управлению качеством. Автор делает акцент на том, что советский подход сочетает в себе как участие всех членов трудового коллектива и подразделений службы управления по реализации специальных задач улучшения качества, так и создание специального аппарата с функцией координации всех работ по улучшению качества на предприятии, когда этого требуют обстоятельства. Такой подход приводит

к максимальному удовлетворению запросов потребителя при минимальной себестоимости изготовления и приемлемой рентабельности производства и эксплуатации продукции. Автор приходит к выводу, что основная задача советской системы заключается в том, чтобы продукция отвечала высшим мировым достижениям и обеспечивала устойчивые высокие результаты производственно-хозяйственной деятельности предприятий и объединений, а также, продукция должна быть связанной с ценообразованием и формированием минимально возможной себестоимости продукции. Исходя из этого, А.В. Гличев [5] отмечает, что советская система управления качеством сочетает в себе подход, который является симбиозом подходов, изложенных К. Исикавой и А. Фейгенбаумом.

Исследования начала XX в. отличались своей противоречивостью, т.к. существовали различия в подходе отечественной и зарубежной школ.

Монография «Всеобщее качество (TQM) в российских компаниях» [14] Лapidус В.А. дает представление о том, на каком уровне находилась система качества в России. Автор дает определение всеобщему управлению качеством, ссылаясь на международный стандарт ИСО 8402 «Менеджмент качества и обеспечение качества». Лapidус В.А. [14] отмечает, что отечественные компании постепенно внедряют международные стандарты качества (к 2000 г. Насчитывалось около 300000 компаний, внедривших СМК), меняя тем самым методы управления и корпоративную культуру. Необходимость принятия культуры всеобщего качества объясняется возросшим уровнем конкуренции. В ходе своих исследований, автор приходит к выводу, что всеобщее качество должно стать национальной идеей, обуславливая это следующими причинами:

1. Обеспечение качества носит системный характер. Невозможно оценить качество продукции или услуги в рамках одного предприятия.

2. Национальная принадлежность определяет авторитет продукции. Автор отмечает, что репутация страны в вопросе качества является очень важным фактором для выбора потребителей. По этому, концепция всеобщего качества должна лежать в основе экономики страны.

3. Социально-экономический аспект Всеобщего качества. Россия в начале XXI в. не

имела никаких национальных идей, которые могли бы объединить страну. Поэтому TQM стоит рассматривать, т.к. с ее помощью можно стабилизировать социальную жизнь страны и общества.

4. Россия имеет научно-технический потенциал, который необходимо использовать. Внедрение TQM в российские компании может привести к интеграции науки и производства.

Автор [14] выделяет основную проблему бескачественности в России, заключающаяся в том, что люди, находящиеся во власти страны, не понимают важность проблемы качества. Не решив данную проблему, невозможно решить и любую другую социально-экономическую, геополитическую задачу. Проблема качества универсальна, любая политическая система, установленная в России, долго не продержится, если не справится с этой проблемой. TQM в нашей стране находится на начальной стадии, но из-за не понимания важности этих изменений, Россия не имеет ни миссии, ни целей, ни ценностей, ни руководящих принципов. Автор заявляет о необходимости подготовительных действий. В монографии говорится, что внедрение ИСО 9000 могут стать мощным толчком к развитию российской промышленности и сферы услуг на основе концепции Всеобщего качества. Для этого автор предлагает решить следующие задачи:

1. Производить тот товар, который пользуется спросом. Для этого необходимо заняться изучением спроса на рынке до начала производства новой продукции.

2. Создать торговую сеть продаж и распространять товар и информацию о нем.

3. Минимизировать издержки производства. Необходимо отказаться от всего лишнего.

4. Научиться управлять финансами. Бесконтрольность ведет к денежным потерям, а также, к расхищению и банкротству предприятия.

Лapidус В.А [14] выступил автором предположений, каким образом можно продвинуть концепцию Всеобщего качества в экономическую сферу России. Отечественные компании могут стать лидерами в продвижении TQM, если произвести в них культурную революцию.

Статья «Основные факторы успеха для управления качеством, примененные в России» [28], авторами которой являются Хи-

зен Х. Ху и Кай Си. Тан выделяют факторы, которые используют в России для успешного управления, к ним относятся: лидерство руководства, планирование качества, обучение персонала, использование технологий и процессов, удовлетворение потребностей потребителей. Авторы выделяют факторы, следуя которым можно содействовать развитию TQM в России. К этим факторам относятся:

- возможность сотрудникам проявить себя;
 - улучшение стратегии;
 - адаптация западной системы под свою;
- придание гибкости предприятию;
- ориентация на потребителя;
 - внедрение TQM на всех уровнях организации;
 - участие высшего руководства в создании передовых систем и методов управления, которые ведут к повышению качества продукции.

В статье «Всеобщее управление качеством в России – труден путь к совершенству» [20] Н. Чилеш, Д. Маслов, П. Ватсон, Э. Белокоровин рассматривают результаты внедрения TQM в российских компаниях, отмечая с какими препятствиями они сталкиваются и анализируя пути устранения этих препятствий. Исследователи отмечают, что существует множество подводных камней, которые мешают внедрению TQM. Они выделяют несколько причин.

1. Первая причина заключается в том, что существует временной разрыв в 50 лет. В Советской школе движущей силой движения качества в России были интересы государства, что является одновременно как преимуществом России, так и подводным камнем при реализации задачи внедрения TQM в России.

2. Расстановка акцентов в понимании качества. В советской системе качество означало соответствие стандарту. Данной системе придерживаются и современные руководители, что является серьезной ошибкой, т.к. при такой политике производитель будет производить качественный продукт, не имеющий спроса.

3. Специалисты в области качества. В современных условиях TQM давно вышел за рамки математики и статистики, а требования к специалисту в области качества подразумевает знание экономики и менеджмента.

4. Использование современных методов совершенствования. Руководители понима-

ют необходимость смены философии, но не понимают, что и зачем нужно менять.

5. Удовлетворение потребителей. Необходимо понять, что потребитель играет главную роль в положении компании на рынке.

Исследователи предлагают действия, которые могут помочь России выпускать продукцию, соответствующую мировым стандартам качества.

1. Формирование методологической базы адаптации TQM в России. Изучая опыт зарубежных ученых, составить свою концепцию внедрения TQM в российские компании.

2. Лидерство руководства. Изменения в организации должны начинаться с изменения самих руководителей.

3. Обучение менеджеров.

4. Государственная политика. Государству необходимо активизировать деятельность по распространению идей улучшения качества и непрерывного совершенствования.

5. Психология потребителей. Необходимо учитывать потребительские свойства продукции.

А.В. Горбунов [7] считает, что основная проблема отечественного менеджмента заключается в различии систем российской и западной экономики, иными словами, принципы зарубежного менеджмента не адаптированы под наши условия, применение данных принципов ведет к результатам, которые отличаются от ожидаемых. Автор отмечает, что цель российской экономики заключается в получении прибыли. Для достижения данной цели, необходимо решить задачу, связанную с разработкой новых подходов. Серьезной проблемой для развития менеджмента качества в России является отсутствие методологической базы. Это говорит о том, что менеджмент качества в России находится в начальной стадии развития. По этому, А.В. Горбунов [7] подчеркивает важность создания высококонкурентной экономики, которая ориентирована на потребителя.

Н.В. Козицына и К.М. Рахлин [12] провели исследование, цель которого заключалась в определении, возможно ли использовать уже существующую отечественную систему качества в современных условиях. Под уже существующей системой понимаются советские системы управления качеством (БИП, КАНАРСПИ, КС УКП и т.д.), которые успешно применялись на предприятиях, но были отвергнуты к началу 90-х го-

дов XX века. В ходе исследования выяснилось, что в современных СМК применим принцип БИП (бездефектное изготовление продукции и сдача ее с первого предъявления), главной целью которого являлось создание условий на производстве, которые обеспечивают изготовление рабочими продукции, полностью соответствующей требованиям технической документации. В современных условиях можно применить модифицированный вариант БИП: не только находить и исправлять дефекты, но и предупреждать их появление.

Результатом исследования является вывод, в котором говорится о том, что правительству необходимо принять национальную политику в области качества. Нельзя забывать про советский опыт, его нужно изучать, использовать и модифицировать на основе зарубежного опыта под современные условия.

Список литературы

1. Бадалов Л.М. Экономические проблемы повышения качества продукции. – М.: Экономика, 1982. – 192с.
2. Будищева И.А., Плоткин Я.Д. Регулирование затрат на обеспечение качества продукции. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 184 с.
3. Гайжаускас Л.П. Совершенствование учета затрат на обеспечение качества продукции: дис. ... канд. экон. наук. – Вильнюс: ВГУ, 1987.
4. Гличев А.В., Азгальдов Г.Г., Панов В.П. Что такое качество? – М.: Экономика, 1968. – 135 с.
5. Гличев А.В. Предмет и направления науки о качестве продукции // Стандарты и качество. – 1969. – № 5. – С. 36.
6. Гличев А.В., Азгальдов Г.Г., Крапивенский З.Н., Кураченко Ю.П., Панов В.П., Федоров М.В., Шпекторов Д.М. Квалиметрия – наука об измерении качества продукции // Стандарты и качество. – 1968. – № 1. – С. 34.
7. Горбунов А.В. Проблемы менеджмента качества в России // Менеджмент сегодня. – 2009. – № 7. – С. 5-15.
8. Деминг Э. Выход из кризиса: Новая парадигма управления людьми, системами и процессами / Э. Деминг; пер. с англ. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2007.
9. Джуран Дж. Справочник по управлению качеством, 1962.
10. Исигава К. Японские методы управления качеством. – М.: «Экономика», 1988. – 199 с.
11. Карлик Е.М., Демиденко Д.С. Затраты на обеспечение и повышение качества продукции. Их классификация // Стандарты и качество. – 1977. – №8. – С. 27-30.
12. Козицына Н.В., Рахлин К.М. Использование отечественного опыта управления качеством в современных условиях менеджмента качества. – URL: <http://quality.eup.ru/MATERIALY10/fatherland.htm>
13. Кросби Ф.Б., Качество и Я: Жизнь бизнесмена в Америке / Ф.Б. Кросби; пер. с англ. – М.: Стандарты и качество, 2003. – 264 с.
14. Лапидус В.А. Всеобщее качество (TQM) в российских компаниях. – М.: Новости, 2000. – 432 с.
15. Львов Д.С. Экономика качества продукции. – М.: Экономика, 1972.
16. Парето В. Курс политической экономии (Cours d'économie politique, 1896-1897).
17. Фейгенбаум А. Контроль качества продукции. – М.: Экономика, 1986.
18. Шига Ш., Грэхэм А., Вальден Д., Новое американское тотальное управление качеством. URL: <http://www.cfin.ru/management/iso9000/newtqm/index.shtml>
19. Cassel C., Dermanov V., Murguletz L. Customer satisfaction and retention in transitional economies – the case of Northwest Russia // SSE SPb research paper. – Stockholm: School of Economics in St Petersburg, 1999. – P. 10.
20. Chileshe N., Watson P., Maslow D., Belokorovin E. The deployment of total quality management (TQM): The Russian Experience, 2005.
21. Deming W.E. Out of the Crisis, 1986.
22. Deming W. Edwards. Some Theory of Sampling. – Dover Publications, 1950.
23. Eklof J., Selivanova I. Corporate quality management practice in Russia: with international comparisons, Total quality management, 2000.
24. Emerson G. Emerson 12-inch and 16-inch Furnace Fans // Emerson Electric Manufacturing Company. – 1911. – P. 12.
25. Feigenbaum A.V. Quality control: principles, practice and administration; an industrial management tool for improving product quality and design and for reducing operating costs and losses, McGraw-Hill industrial organization and management series. – New York: McGraw-Hill, 1945. – P. 471.
26. Ishikawa K. Guide to Quality Control. Asian Productivity Organization, 1976.
27. Juran J.M. Quality Control Handbook, New York. – New York: McGraw-Hill, 1951. – P. 1730.
28. Khoo H.H., Tan K.C. Critical success factors for quality management implementation in Russia // Industrial and Commercial Training. – 2002. – Vol. 34, № 7. – P. 263-268.
29. Longenecker C.O. Why managers fail in post-Soviet Russia: causes and lessons // European Business Review. – 2001. – Vol. 13, № 2. – P. 102.
30. Shewhart W.A. Statistical method from the viewpoint of quality control. – Washington, The Graduate School, the Department of Agriculture, 1939. – P. 155.
31. Shingo S. A Study of the Toyota Production System, 1981.
32. Shingo S. Quick Changeover for Operators: The SMED System, 1969.
33. Shingo S. The Shingo Model, Utah State University Shingo Institute, 2014.
34. Taguchi D. Taguchi methods: design of experiments, 1957.
35. Taylor F.W. The Principles of Scientific Management, Harper & Brothers. – New York, 1911. – P. 70.