

ISSN 2223-2966



СОВРЕМЕННАЯ НАУКА:
АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ

ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

№ 3/2 2019 (МАРТ)

Учредитель журнала
Общество с ограниченной ответственностью
«НАУЧНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Журнал издается с 2011 года.

Редакция:

Главный редактор
А.В. Царегородцев
Выпускающий редактор
Ю.Б. Миндлин
Верстка
А.В. Романов

Подписной индекс издания
в каталоге агентства «Пресса России» — 80016
В течение года можно произвести подписку
на журнал непосредственно в редакции.

Издатель:

Общество с ограниченной ответственностью
«Научные технологии»

Адрес редакции и издателя:
109443, Москва, Волгоградский пр-т, 116-1-10
Тел/факс: 8(495) 755-1913
E-mail: redaktor@nauteh.ru
<http://www.nauteh-journal.ru>

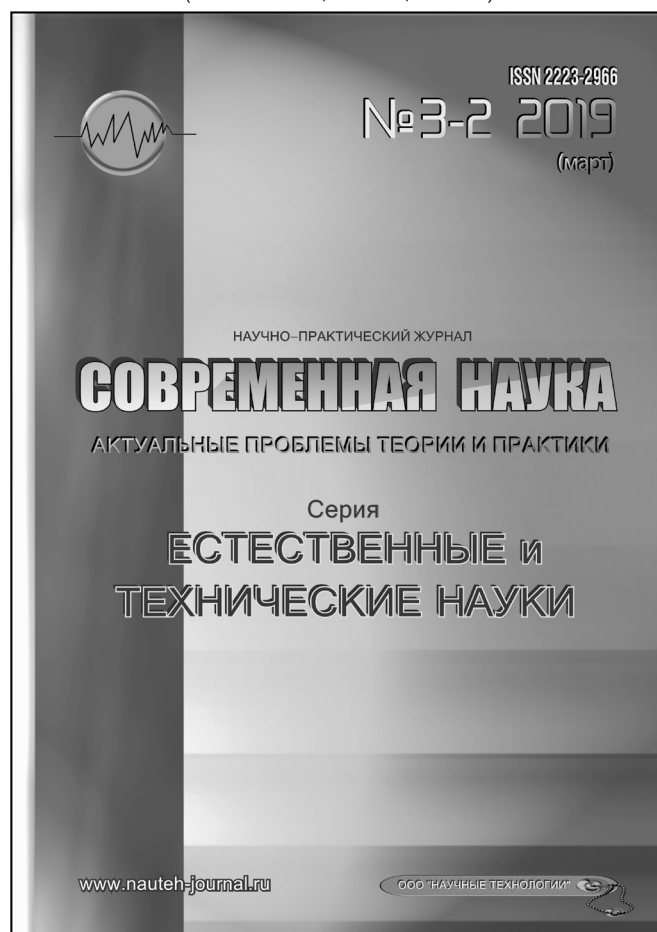
Журнал зарегистрирован Федеральной службой
по надзору в сфере массовых коммуникаций,
связи и охраны культурного наследия.

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77-44912 от 04.05.2011 г.

Научно-практический журнал

Scientific and practical journal

(БАК – 05.13.00, 03.02.00, 14.01.00)



В НОМЕРЕ:

ОБЩАЯ БИОЛОГИЯ, ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ,
КЛИНИЧЕСКАЯ МЕДИЦИНА

Авторы статей несут полную ответственность
за точность приведенных сведений, данных и дат.

При перепечатке ссылка на журнал
«Современная наука:
Актуальные проблемы теории и практики» обязательна.

Журнал отпечатан в типографии
ООО «КОПИ-ПРИНТ» тел./факс: (495) 973-8296
Подписано в печать 25.03.2019 г. Формат 84x108 1/16
Печать цифровая Заказ № 0000 Тираж 2000 экз.



Редакционный совет

Атаев Алевдин Рашитханович — д.м.н., профессор, Дагестанский государственный медицинский университет

Безруких Марьям Моисеевна — д.б.н., профессор, Институт возрастной физиологии РАО

Бекетов Сергей Валериевич — д.б.н., ФГБНУ НИИ Пушного звероводства и кролиководства имени В.А. Афанасьева

Белых Владимир Иванович — Д.м.н., доцент, Алтайский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации

Грачев Николай Николаевич — доктор высшей степени в области технических наук (DoctorHabilitatus), профессор, Московский государственный институт электроники и математики НИУ ВШЭ (технический университет)

Гусева Анна Ивановна — д.т.н., профессор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Зубкова Валентина Михайловна — д.б.н., профессор, Российский государственный социальный университет

Каллаев Нажмудин Омаркадиевич — д.м.н., профессор, Дагестанский государственный медицинский университет

Квасов Андрей Иванович — д.т.н., профессор, Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д.Серикбаева

Корнеев Андрей Матиславович — д.т.н., профессор, Липецкий государственный технический университет

Корягина Наталья Александровна — д.м.н., доцент, Пермский государственный медицинский университет им. ак. Е.А.Вагнера Министерства здравоохранения Российской Федерации

Кравец Бронислава Борисовна — д.м.н., профессор, Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко Министерства здравоохранения Российской Федерации

Кулик Сергей Дмитриевич — д.т.н., Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», с.н.с.

Матвеев Всеволод Борисович — д.м.н., профессор, ФГБУ РОНЦ им. Н.Н. Блохина

Миндлин Юрий Борисович — к.э.н., доцент, Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии им. К.И. Скрябина

Надежкин Сергей Михайлович — д.б.н., профессор, Всероссийский НИИ селекции и семеноводства овощных культур Россельхозакадемии

Овезов Алексей Мурадович — д.м.н., доцент, ГБУЗ МО Московский областной научно-исследовательский клинический институт им. М.Ф. Владимирского

Олейникова Светлана Александровна — д.т.н., доцент, Воронежский государственный технический университет

Рахимов Ильгизар Ильясович — д.б.н., профессор, Казанский (Приволжский) федеральный университет

Ромашкова Оксана Николаевна — д.т.н., профессор, Московский городской педагогический университет

Симаков Юрий Георгиевич — д.б.н., профессор, Московский государственный университет им. К.Г. Разумовского (ПКУ)

Симоненков Алексей Павлович — д.м.н., профессор, независимый эксперт

Трапезов Олег Васильевич — д.б.н., в.н.с., ФИЦ «Институт цитологии и генетики СО РАН»

Федорова Оксана Ивановна — д.б.н., доцент, Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии им. К.И. Скрябина

Харитонов Михаил Анатольевич — д.м.н., профессор, Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова

Царегородцев Анатолий Валерьевич — д.т.н., профессор, Московский государственный лингвистический университет

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

Информатика,
вычислительная техника и управление

- Барашкин Р. Л., Жедяевский Д. Н., Калашиников П. К., Южанин В. В., Попадько В. Е.** — Модернизация компьютерного тренажерного комплекса по процессам подготовки газа к транспорту для применения в учебном процессе вуза
Barashkin R., Zhedyayevskiy D., Kalashnikov P., Yuzhanin V., Popadko V. — Upgrade of gas pre-transport treatment computer simulator complex that is used in educational process in university 5
- Гостев С. С., Гриняев С. Н., Щербаков А. Ю., Правиков Д. И.** — К развитию методологии создания доверенных и защищенных информационных систем, построенных с использованием технологии распределенных реестров
Gostev S., Grinyaev S., Scherbakov A., Pravikov D. — About methodology development for creating trusted and secure information systems based on the distributed registry technology 10
- Гриняев С. Н., Щербаков А. Ю., Правиков Д. И., Рязанова А. А.** — Концепция универсальной профессиональной единицы и архитектура регистрации работников и работодателей в доверенном реестре
Grinyaev S., Scherbakov A., Pravikov D., Ryzanov A. — The concept of a universal professional unit and the architecture of registration of employees and employers in the trusted register 16
- Гриняев С. Н., Панкратенко И. Н., Медведев Д. А., Каширин Д. И.** — «Дело Huawei» как пример реализации гибридной угрозы национальной безопасности в высокотехнологичной сфере при эксплуатации АСУП
Grinyaev S., Pankratenko I., Medvedev D., Kashirin D. — "Huawei case" as an example of hybrid threat realization to the national security in high-tech sphere in the operation process control system 21

- Гриняев С. Н., Правиков Д. И., Медведев Д. А.** — Комплексная безопасность ТЭК как объект научного анализа
Grinyaev S., Pravikov D., Medvedev D. — Integrated security of fuel and energy complex as object of scientific analysis 24
- Гриняев С. Н., Гришенин Р. Н., Правиков Д. И.** — Перспективные модели информационного управления социотехническими системами
Grinyaev S., Grishenin R., Pravikov D. — Perspective models of information management by sociotechnical systems 31
- Дворянкин С. В., Дворянкин Н. С.** — Биометрические признаки в параметрах речеподобных сигналов для аутентификации пользователя в системах голосового ввода и управления
Dvoryankin S., Dvoryankin N. — Biometric features in the settings of the speech-likely signals for user authentication in voice driving systems 39
- Ермолкин О. В., Попова Я. Д., Храбров И. Ю., Гавшин М. А.** — Совершенствование измерительных преобразователей контроля примесей воды и песка в продукции газовых и газоконденсатных скважин
Yermolkin O., Popova Ya., Khrabrov I., Gavshin M. — Improvement of measuring converters for control of water and sand inclusions in the gas and gas condensate well product flow 47
- Зеленорицкая А. В., Иванов М. А.** — Модификации поточного шифра RC4
Zelenoritskaya A., Ivanov M. — Modifications of stream cipher RC4 56
- Карманов А. В., Попадько В. Е.** — Оптимальное управление конечной Марковской цепью с нечётко заданной вероятностной мерой
Karmanov A., Popadko V. — Optimal control with a finite Markov chain and a fuzzy given probability measure 62

| | |
|--|---|
| Кочуева О. Н., Иткин В. Ю. — Прогнозирование стабильности водонефтяных эмульсий на основе методов нечеткой логики <i>Kochueva O., Itkin V.</i> — Predicting the stability of water-in-oil emulsions based on fuzzy logic methods 67 | Самарин И. В., Фомин А. Н. — Математические модели динамики численности населения земли для долгосрочного прогнозирования мировых потребностей в энергоресурсах и стратегического планирования развития нефтегазового комплекса <i>Samarin I., Fomin A.</i> — Mathematical models of dynamics of population of earth for long-term forecasting of world needs for energy resources and strategic planning of development of an oil and gas complex..... 111 |
| Кротов А. В. — Общий случай решения задачи дифференцирования в зашумленных сигналах <i>Krotov A.</i> — The general case of solving the problem of differentiation of noisy signals 70 | Самарин И. В., Строгонов А. Ю. — Методика оценки ущерба предприятию ТЭК с учётом полученной с помощью стратегического планирования группы компенсирующих негативные последствия мероприятий при функционировании автоматизированной системы пожаровзрывобезопасности <i>Samarin I., Strogonov A.</i> — Technique of assessment of damage to the fuel and energy complex enterprise given the received group of measures compensating the negative consequences with use strategic planning in the operation of the automated system of fire and explosion 129 |
| Новиков А. В. — Особенности математического моделирования химических реакций при кислотном воздействии на карбонатные пласты <i>Novikov A.</i> — Aspects of geochemical mathematical modelling of acid impact in carbonate reservoir..... 75 | Хохлов А. С., Мишутин Д. Ю., Бородин П. Е. — Оптимизационные инструменты моделирования нефтехимических кластеров <i>Khokhlov A., Mishutin D., Borodin P.</i> — Optimization tools for modeling petrochemical clusters 136 |
| Осетинский Н. И. — Об инвариантах одного класса билинейных управляемых систем <i>Osetinskiy N.</i> — On the invariants of one class of bilinear control systems..... 80 | Информация |
| Правиков Д. И., Чернов И. В. — Некоторые модели информационного управления социотехническими (социальными) системами <i>Pravikov D., Chernov I.</i> — Some models of information management by sociotechnical (social) systems..... 85 | Наши авторы. Our Authors..... 144 |
| Прус Ю. В., Крючков А. В., Самарин И. В., Строгонов А. Ю. — Методика прогнозирования готовности единиц противопожарного оборудования АСУТП на предприятиях ТЭК <i>Prus Yu., Kryuchkov A., Samarin I., Strogonov A.</i> — Forecasting technique of readiness of units of fire-fighting equipment of APCS at enterprises of fuel and energy complex using strategic planning..... 96 | Требования к оформлению рукописей и статей для публикации в журнале 145 |
| Прядко С. А. — Системный анализ с использованием логнормального распределения для вероятностной оценки запасов <i>Pryadko S.</i> — System analysis using lognormal distributions for the probabilistic assessment of reserves..... 104 | |

МОДЕРНИЗАЦИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСА ПО ПРОЦЕССАМ ПОДГОТОВКИ ГАЗА К ТРАНСПОРТУ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ ВУЗА

UPGRADE OF GAS PRE-TRANSPORT TREATMENT COMPUTER SIMULATOR COMPLEX THAT IS USED IN EDUCATIONAL PROCESS IN UNIVERSITY

**R. Barashkin
D. Zhedyayevskiy
P. Kalashnikov
V. Yuzhanin
V. Popadko**

Summary. In Gubkin University the consistent work for computer simulator complexes creation and their usage in educational process is undertaken. These complexes simulate technological processes that occur in oil and gas industry. Experience of their usage in individual and team (as well as cross-disciplinary) study is gained.

In this article it is shown, why traditional simulators, that are used for benefit of industry, are difficult to use in educational process in higher school. Approach for creation of flexible toolkit for the purposes of computer simulator complexes development and adaptation for different modes of study is suggested.

Keywords: Computer simulator complex, simulation modeling, technological processes control, individual learning path, training task, stable skill.

Барашкин Роман Леонардович

*К.т.н., доцент, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина
barashkin.r@gubkin.ru*

Жедяевский Дмитрий Николаевич

К.т.н., доцент, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина

Калашников Павел Кириллович

К.т.н., доцент, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина

Южанин Виктор Владимирович

К.т.н., доцент, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина

Попадько Владимир Ефимович

К.т.н., профессор, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина

Аннотация. В Губкинском университете проводится системная работа по созданию и использованию в учебном процессе компьютерных тренажерных комплексов (КТК), имитирующих технологические процессы в нефтегазовой отрасли. Накоплен опыт их использования в индивидуальном и коллективном (в том числе междисциплинарном) обучении. В статье изложены сложности по использованию традиционных КТК, применяемых в промышленности, для учебных целей в высшей школе. Предложен подход к формированию гибкого инструмента по разработке и адаптации КТК к различным формам обучения.

Ключевые слова: компьютерный тренажерный комплекс, имитационное моделирование, управление технологическими процессами, индивидуальная траектория обучения, учебно-тренировочные задачи, устойчивые навыки.

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина (далее — Губкинский университет), являясь ведущим университетом Российской Федерации в области подготовки специалистов по всей линейке нефтегазового производства, непрерывно повышает качество образовательной деятельности. В том числе, за счет увеличения доли учебных дисциплин, основанных на практико-ориентированном и междисциплинарном подходе к обучению. Междисциплинарный подход позволяет развивать

у студентов компетенции смежных специальностей, умение работать в команде со специалистами других профилей, решать комплексные задачи.

Практико-ориентированный подход подразумевает ориентацию учебного процесса на прикладные производственные задачи, с которыми сталкиваются сотрудники компаний, что в конечном счете сокращает время адаптации выпускника ВУЗа на производстве.

В этой связи актуально внедрение в учебный процесс современных компьютерных тренажерных комплексов (КТК), в настоящее время широко применяемых в промышленности. Тренажерные комплексы позволяют воссоздать в ВУЗе условия, приближенные к реальному технологическому процессу (ТП). Благодаря этому возможно в доступной для студента форме формулировать и решать практические производственные задачи. Тренажер позволяет в рамках учебного процесса организовать взаимодействие студентов различных профилей, реализуя междисциплинарный подход.

Технической базой для реализации рассматриваемых подходов к обучению являются созданные в Губкинском университете компоненты виртуального нефтегазового предприятия: Центр управления разработкой месторождений (ЦУРМ); Виртуальный нефтеперерабатывающий завод (НПЗ); Центр производственно-диспетчерского управления режимами нефтегазодобывающих и нефтегазотранспортных комплексов (ЦПДУ НГК); КТК подготовки газа к транспорту.

За последние годы в Губкинском университете сформировались актуальные компетенции по разработке КТК, выстраиванию индивидуальных и командных траекторий обучения специалистов с использованием КТК.

Анализ сложностей при внедрении КТК в образовательный процесс высшего учебного заведения

Анализ сложностей внедрения КТК в учебный процесс образовательного учреждения высшего образования проведен по результатам эксплуатации КТК, описание и опыт внедрения которого приведены в [1, 2] а также разработанной в Губкинском университете новой версии КТК.

Специалисты различных профилей (технологи, механики, операторы, специалисты служб КИП и АСУТП) смотрят на процесс с учетом своей профессиональной зоны ответственности. В промышленности основным пользователем КТК являются операторы, что соответствует направлению обучения 21.03.01 «Нефтегазовое дело». При этом именно взгляд оператора на управление процессом является наиболее широким. В частности, оператор несёт ответственность за выявление отклонений от норм эксплуатации ТП и, в случае необходимости, задействование других специалистов. Поэтому в Губкинском университете внедрение КТК осуществляется при подготовке специалистов следующих направлений обучения: 21.03.01 «Нефтегазовое дело», 18.04.01 «Химическая технология», 15.03.02 «Технологические машины и оборудование», 27.03.04, 27.04.04 «Управление в технических системах», а также в рамках проведения междисциплинарных курсов и олимпиад.

В ходе эксплуатации КТК в учебном процессе выявлены следующие основные сложности:

1. Необходимы значительные затраты времени для изучения на начальной стадии комплексного ТП

Как правило, КТК разрабатывается на базе реального ТП. Такие ТП могут включать десятки единиц взаимосвязанного технологического оборудования с сотнями/тысячами регулируемых и регулирующих параметров.

Для глубокого осмысления технологической схемы в рамках учебного курса у студентов уходит значительное количество времени на то, чтобы понять принцип работы отдельных аппаратов, взаимное влияние отдельных параметров друг на друга, связь между аппаратами отдельной технологической линии, технологической установки или рассматриваемого ТП в целом.

С этой точки зрения представляется целесообразным идти по пути постепенного усложнения технологической схемы (изучение отдельных аппаратов, изучение фрагментов технологических линий из нескольких аппаратов, изучение технологических установок, изучение производства как совокупности установок). Это предоставляет возможность студенту последовательно изучать особенности изменения и взаимного влияния параметров на разных уровнях сложности.

2. Нехватка учебно-методического обеспечения

При разработке и внедрении КТК в промышленности основное внимание уделяется созданию адекватной имитационной модели и инструментария управления ТП оператором, наиболее приближенных к реальным условиям. При этом методологической и организационной составляющей уделяется недостаточно внимания, что отрицательно сказывается на эффективности эксплуатации КТК.

Для учебного процесса в ВУЗе проработанность методического материала особенно критична при поточковой самостоятельной работе обучающихся на КТК. В результате обучаемый должен изучить и отработать не только конкретную регламентную последовательность действий, но и усвоить причинно-следственные связи, степень осознания которых влияет на качество выявления и устранения имитационных аварийных ситуаций, моделируемых в КТК.

Для решения указанной сложности целесообразно формировать междисциплинарную группу методистов для формирования контента и структурирования про-

цесса обучения при индивидуальной и коллективной модели обучения.

3. Модернизации и обновление УТЗ

В рамках учебного процесса требуется непрерывная модернизация существующих УТЗ и создание новых. Для этого необходима отработанная методология и удобная техническая реализация инструментария по работе с УТЗ. Методология разработки и корректировки УТЗ позволяет уменьшить количество итераций, затрачиваемых на создание УТЗ. Удобный инструментарий по работе с УТЗ позволяет сократить время на выполнение одной итерации.

4. Недостаточная вовлеченность студентов в проблематику производства

На предприятиях операторы проходят полный цикл формирования ментальной модели производственного объекта и закрепляют знания и навыки, получаемые на КТК, взаимодействием с реальным объектом. На производственных объектах специалисты воспринимают решаемые УТЗ как естественный феномен для их среды. У студентов, на начальный момент работы с КТК, рассматриваемые задачи и необходимость их решения менее очевидны и естественны для восприятия. Это требует дополнительных умственных усилий для адаптации и принятия поставленных задач.

Поэтому работу на КТК в ВУЗе целесообразно начинать с базовых задач по управлению ТП с постепенным повышением уровня сложности, а также внедрять технологии контроля самостоятельного обучения, анализа и корректировки индивидуальной траектории обучения.

5. Стандартные операторские интерфейсы АСУ ТП не имеют достаточно функционала для реализации учебных технологий

Стандартные операторские интерфейсы АСУ ТП разрабатываются с целью отображения оператору только ключевой информации с точки зрения управления ТП. Для учебного процесса требуется визуализация причинно-следственных связей, происходящих с ТП, инструменты сбора статистики и анализа качества выполнения УТЗ, инструменты дистанционного контроля качества работы педагогического коллектива, инструменты мотивации индивидуального и коллективного освоения учебного материала, в том числе инструменты геймификации учебного процесса.

Выходом может быть дополнение интерфейсов АСУ ТП программными учебными модулями, реализующими необходимые функции.

6. Обеспечение внеурочного доступа к КТК

Для получения, отработки и закрепления навыков управления ТП, студентам не хватает времени в рамках очных занятий и требуется возможность самостоятельной работы на КТК.

Данная сложность решается организацией дистанционного доступа к КТК с возможностью аутентификации по личному логину и паролю обучающегося.

7. Техническая поддержка КТК

При проведении учебного процесса возникают потребности, которые на этапе проектирования и разработки крайне сложно предусмотреть. Поэтому в процессе эксплуатации КТК появляется необходимость создания новых и редактирование существующих УТЗ, расширения функционала КТК.

Обеспечить работоспособность и возможность систематического обновления версий КТК позволяют системы управления версиями и автоматического обновления на рабочих станциях программного обеспечения с централизованным хранилищем УТЗ и результатов их выполнения.

Анализ возникших сложностей при эксплуатации КТК показал, что необходимо переработать методику создания и актуализации УТЗ, пересмотреть подход к формированию команды разработчиков, адаптировать систему оценки и анализа действий пользователя, сформировать систему обратной связи по использованию КТК в учебном процессе.

Подходы к решению сложностей при внедрении КТК в образовательный процесс высшего учебного заведения

Для решения сложностей с нехваткой учебно-методического обеспечения, частой необходимостью обновления и модернизации УТЗ выделены следующие ключевые этапы, влияющие на качество разрабатываемых УТЗ.

1. Формулирование технологической задачи (состав оборудования, входящего в УТЗ, регулируемые и регулирующие параметры, исходное и конечное состояние системы), списка знаний, умений и навыков, приобретаемых и отрабатываемых в рамках разрабатываемого УТЗ.

2. Формирование блока фундаментальных и технологических знаний, а также знаний по автоматизации ТП, необходимых и достаточных для качественного самостоятельного решения УТЗ, выделение ключевых этапов УТЗ и причинно-следственных связей между характеристиками ТП.
3. Формирование последовательности действий, которые совершает обучаемый в рамках выполнения УТЗ для закрепления приобретаемых знаний и навыков.
4. Формирование списка технологических ограничений, локальных целей, последовательности действий. Оценка выполнения которых позволяет характеризовать понимание причинно-следственных связей обучаемым.
5. Формирование системы подсказок различной степени детализации.
6. Разработка имитационной модели ТП.
7. Разработка операторского интерфейса управления ТП.
8. Разработка программной части УТЗ.
9. Тестирование, анализ и корректировка учебно-методического обеспечения УТЗ.
10. Апробация разработанного УТЗ и учебно-методического обеспечения в образовательном процессе.
11. Обработка и анализ результатов обучения.
12. Корректировка программной части УТЗ и учебно-методического обеспечения.

В результате формализации этапов создания УТЗ сформирован шаблон описания УТЗ, включающий следующие основные разделы: исходное состояние ТП, описание технологической обвязки, особенности эксплуатации, последовательность технологических действий функционального и операционного уровней.

Разработка УТЗ и модернизация КТК для учебного процесса в ВУЗе в соответствии с предложенной выше методикой потребовала пересмотра стандартного подхода по созданию КТК в промышленности [3]. В результате была сформирована команда разработчиков, включающая следующих специалистов:

1. Технолог, имеющий значительный опыт реальной эксплуатации имитируемого объекта — основной постановщик технологических задач, аналитик корректности работы имитационной модели, корректор правильности формулирования описания УТЗ.
2. Специалист по разработке имитационной модели УТЗ — осуществляет параметризацию объектов модели, разработку локальных АСУ ТП, обеспечение требуемой точности работы динамической модели в стационарных и переходных режимах.

3. Методист — специалист по формированию содержательной и текстовой части описания УТЗ. Выстраивает систему оценивания качества освоения содержательной части УТЗ, выстраивает систему мотивации по освоению контента.
4. Инженер АСУ ТП — разрабатывает операторские интерфейсы, алгоритмы и программы системы управления.
5. Специалист по обработке и анализу данных — тестирование разработанных УТЗ, анализ результатов выполнения УТЗ обучающимися, определение слабых мест УТЗ с точки зрения технической реализации, методологической или преподавательской.

Для решения сложностей с недостаточной вовлеченностью студентов в проблематику производства и с обеспечением внеурочного доступа к КТК большого числа обучаемых разработана система автоматической оценки действий обучаемых с функциями самомотивации обучаемого [4], анализа и корректировки траектории обучения с дистанционным доступом.

Результаты

1. Сформирована группа специалистов по разработке, модернизации КТК, имитирующих работу технологических объектов нефтегазового комплекса.
2. Повысилась оперативность отслеживания качества подачи учебно-методического материала и корректировки УТЗ; улучшилась обратная связь по разработанным УТЗ.
3. Повысились скорость и качество формирования устойчивых навыков по управлению ТП, в том числе при работе на КТК в самостоятельном режиме.
4. Отработан механизм контроля качества работы лекторов и преподавателей-практиков со студентами.
5. Повысилось качество контроля работы отдельных студентов, групп студентов.
6. Подготовленный комплекс учебно-методических средств позволяет реализовывать следующие технологии обучения: очно с преподавателем, самостоятельно в учебном классе, самостоятельно в дистанционном режиме.

Выводы

Модернизированный КТК позволяет проводить практические занятия по курсу подготовки газа к транспорту с возможностью оперативного контроля формирования устойчивых навыков у обучаемых, контролировать работу преподавателей, выполнять задания в дистанционном режиме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барашкин Р.Л., Калашников П. К., Попадько В. Е., Пятибратов П. В. Компьютерный тренажерный комплекс процессов подготовки нефти и газа к транспорту // «Территория НЕФТЕГАЗ», 2015, № 5. — с. 27–31.
2. Барашкин Р.Л., Калашников П. К., Попадько В. Е., Южанин В. В. Опыт внедрения «Компьютерного тренажерного комплекса процессов подготовки нефти и газа к транспорту» в образовательный процесс // «Территория НЕФТЕГАЗ», 2017, № 10. — с. 12–19.
3. Дозорцев В.М., Агафонов Д. В., Назин В. А., Новичков А. Ю., Фролов А. И. Компьютерный тренинг операторов: непреходящая актуальность, новые возможности, человеческий фактор. // «Автоматизация в промышленности», 2015, № 7. — с. 8–20.
4. Дозорцев В. М. Имитационное моделирование как инструмент экспериментально–психологических исследований. Пленарный доклад. ИММОД-2015. с. 34–48.

© Барашкин Роман Леонардович (barashkin.r@gubkin.ru), Жедаевский Дмитрий Николаевич,
Калашников Павел Кириллович, Южанин Виктор Владимирович, Попадько Владимир Ефимович.
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

К РАЗВИТИЮ МЕТОДОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ДОВЕРЕННЫХ И ЗАЩИЩЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ, ПОСТРОЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ РЕЕСТРОВ

ABOUT METHODOLOGY DEVELOPMENT FOR CREATING TRUSTED AND SECURE INFORMATION SYSTEMS BASED ON THE DISTRIBUTED REGISTRY TECHNOLOGY

**S. Gostev
S. Grinyaev
A. Scherbakov
D. Pravikov**

Summary. The article analyzes the main properties of the blockchain technologies. It is shown that in general, the properties of “equality”, “independence” and “decentralization” are not provided by existing cryptocurrency systems. On the basis of the analysis, the authors formulated requirements to the systems based on the technology of the distributed register. The authors defined the description of the developed protocol of the protected trusted distributed registry, as well as data structures used in this distributed registry.

Keywords: blockchain technology, security properties, security requirements, protected trusted distributed registry.

Гостев Сергей Сергеевич

К.т.н., заместитель директора по науке, Концерн «Гранит» (Москва)

Гриняев Сергей Николаевич

Д.т.н., с.н.с., РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина

Щербаков Андрей Юрьевич

Д.т.н., профессор, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина

Правиков Дмитрий Игоревич

*К.т.н., РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина
dip@gubkin.pro*

Аннотация. В статье проведен анализ основных свойств, рассматриваемых применительно к блокчейн-технологиям. Показано, что в общем случае свойства «равноправия», «независимости» и «децентрализованности» не обеспечиваются существующими криптовалютами системами. На основании анализа сформулированы требования к перспективным системам, построенным на основании технологии распределенного реестра. Приведено описание разработанного протокола функционирования защищенного доверенного распределенного реестра, а также структур данных, используемых в данном распределенном реестре.

Ключевые слова: блокчейн технологии, свойства безопасности, требования к безопасности, защищенный доверенный распределенный реестр.

Введение

В последние годы в области построения доверенных и защищенных информационных систем большой интерес вызывает использование технологии распределенных реестров (блокчейн) в целях решения широкого круга задач, начиная от организации децентрализованных платежных систем и закрывая задачами интеграции цифровых платформ и объединения разнородных баз данных [1].

Необходимо заметить, что методология создания доверенных и защищенных информационных систем на основе распределенных реестров испытывает определенные теоретические трудности. Это связано с тем, что технология блокчейн развивалась от практических потребностей путем «проб и ошибок».

В настоящее время существует ряд действующих проектов, в первую очередь блокчейн криптовалюты Bitcoin, блокчейн Ethereum, который исправил множество недостатков проекта Bitcoin [2], попытки синтезировать «конструкторы» распределенных реестров — проекты типа Hyperledger Fabric.

У всех этих проектов имеется ряд принципиальных недостатков, вызванных «болезнями роста» — когда информационная технология растет и развивается от практики. Аналогом процесса является развитие теории вероятностей от практических навыков по анализу статистики событий до непротиворечивой аксиоматики А.Н. Колмогорова в области вероятностной меры. Несмотря на то, что в области информатики никогда невозможно будет отказаться от движения «от практики», теоретическое осмысление вопроса тем не менее настоятельно необходимо.

Теоретические проблемы существующих распределенных реестров

Первичным теоретическим заблуждением проектов распределенных реестров является тезис о том, что информационная система на основе распределенного реестра может быть первично построена «равноправно», «независимо» и «децентрализовано».

Под «равноправностью» понимается, как правило, равноправие участников, некоторая их одинаковость с точки зрения собственных возможностей, изначально недоверия друг к другу, также с точки зрения модели угроз той системы, в которую интегрирована технология распределенного реестра.

Независимость системы декларируется с точки зрения невлияния некоторых «регуляторов» на нее и децентрализованность с точки зрения распределенности ресурсов в первую очередь, их доступности.

Однако, очевидно, что полная равноправность невозможна в первую очередь из-за того, что у практической реализации по меньшей мере части компонентов системы имеется «автор», который априорно имеет больше знаний о системе и возможности по ее доработке и изменению [3].

Далее, у системы имеет условный «оператор», а практически — владелец, который разворачивает и поддерживает технические средства информационной системы, в которую интегрирована технология распределенного реестра. Владелец или автор практически единолично вносят изменения-форки (fork), которые могут полностью изменить систему, а с другой стороны — держат ее под контролем владельца. К этой же области относится сопровождение программного обеспечения распределенного реестра и исправление ошибок в нем.

Кроме того, за скобки выносятся телекоммуникационная часть системы — та, которая доносит информацию клиентов (пользователей) до оператора (операторов) распределенных реестров. В современном мире именно телекоммуникации являются инструментом контроля и ограничения децентрализованности и вполне понятно — чтобы построить полностью независимую информационно-телекоммуникационную систему — это полностью продублировать каналы связи, обеспечивающие передачу информации в ней, что является возможным только для проектов глобального уровня.

Таким образом, «равноправие», «независимость» и «децентрализованность» является мифами, которые

неосознанно или сознательно распространяются блокчейн-сообществом [4].

Надо обратить внимание и на то, что в основу «доверия» к системам распределенных реестров положены криптографические задачи, например, задача построения коллизий хеш-функции или ассиметричные криптографические алгоритмы.

Задача доверенного обмена открытыми ключами для обеспечения корректного их использования, например, для обеспечения переводов с одного кошелька на другой решается только при помощи сертификатов — подписания открытого ключа в доверенном центре. А наличие доверенного центра перечеркивает децентрализованность полностью в первую очередь с точки зрения доступности, поскольку удостоверяющий центр может полностью регулировать выдачу сертификатов открытых ключей.

С другой стороны, «багаж» ассиметричной криптографии не позволяет выстроить быстродействующие и легко управляемые системы распределенных реестров в первую очередь из-за низкой скорости ассиметричных криптографических алгоритмов. Кроме того, в умах неспециалистов ассиметричная криптография является панацеей для решения всех задач, что создает исходно ложные парадигмы проектирования защищенных систем.

Другой важной проблемой является тезис о том, что незамкнутая система не может быть защищенной с точки зрения формальной доказательности этого факта [5]. Исходя из этого, пользователи системы должны быть именованы, а с другой — являться анонимными относительно друг друга. Кроме того, в системе в обязательном порядке должны присутствовать механизмы (с точки зрения системно-аналитических моделей компьютерных систем — субъекты) разграничения доступа, а в общем случае — реализации произвольно заданной политики безопасности.

В это связи уместно привести пример неработоспособности семейства ассиметричных криптографических алгоритмов для решения задач анонимизации. Один из известных принципов построения анонимного имени для субъекта или объекта распределенного реестра — вычисление хеш-функции от открытых данных (имени или паспортных данных пользователя). Легко видеть, что перебор исходной информации (например, по базам данных паспортов) позволяет с невысокой трудоемкостью найти реальное имя по хеш-значению.

Основные требования к системе, включающей распределенный реестр

Исходя из изложенного, система распределенных реестров должна в обязательном порядке обеспечивать:

- ◆ формирование приватного элемента для пользователя с гарантированными вероятностными свойствами, т.е. пользователь должен иметь приватный идентификатор или ключ, никому не известный кроме него, выработанный при помощи датчика случайных чисел с гарантированными статистическими свойствами;
- ◆ формирование сетевого имени (идентификатора, которым пользователь представляется в системе) на основе указанного выше приватного элемента, исключающего возможность выявления связей между сетевым именем и множеством открытых данных о физическом лице или организации;
- ◆ безопасное хранение приватного элемента у пользователя для обеспечения защищенности от несанкционированного доступа к нему;
- ◆ наличие «точки входа» для пользователей — оператора распределенного реестра, который на основе заданных регламентов обеспечивает обработку информации пользователей;
- ◆ авторизацию пользователя для оператора при помощи криптографических процедур, использующих приватный элемент пользователя;
- ◆ безопасный транспорт (как минимум с сохранение неизменности информации, получаемой от пользователя) для передачи информации от пользователя к оператору распределенного реестра;
- ◆ контроль целостности и авторства каждой информационной единицы, помещаемой в распределенный реестр;
- ◆ формирование подтверждений у оператора распределенного реестра факте помещения информации в распределенный реестр (например, путем выдачи заверенных оператором квитанций пользователям);
- ◆ наличие механизма формирования и обработки запросов по выдаче информации из распределенного реестра по запросам его участников (клиентов), обеспечивающего защищенность данного запроса (также авторизацию и контроль неизменности запроса);
- ◆ реализацию у оператора распределенного реестра системы разграничения доступа к информации (к звеньям распределенного реестра) в распределенном реестре.

Только реализация данных свойств позволит сделать систему, включающую распределенный реестр, защищенной.

Необходимо также уточнить модель нарушителя, которая неявно используется при формировании ука-

занных свойств. В данном случае речь идет о модели внешнего нарушителя (модель H2) — нарушитель, который может читать и изменять информацию в каналах связи (в телекоммуникационной компоненте информационно-телекоммуникационной системы). Полагаем, что владелец системы (оператор распределенного реестра) является доверенным лицом или организацией, заинтересованным в корректной и безопасной работе всей системы. Как мы показали выше, это предположение является базовым для построения системы.

Краткое описание протокола защищенного доверенного распределенного реестра

Введем следующие обозначения

X_i — пользователь распределенного реестра,

A_i — цифровая информация, описывающая пользователя PP,

K_{pi} — персональный ключ (персональная информация) пользователя PP,

K_{si} — сетевой ключ пользователя (также являющийся частью персональной информации пользователя), предназначенный для связи с оператором PP,

C_i — ключевой контейнер пользователя, представляющий собой персональную информацию пользователя (персональный или сетевой ключ), закрытый на пароле пользователя при помощи обратимой криптографической процедуры,

S_i — сетевое имя пользователя, однозначно связанное с A_i ,

$INFO_{ij}$ — информация i -го пользователя, сформированная на рабочем месте пользователя и направляемая для хранения и обработки в PP, имеющая условный номер j ,

K_{vij} — квитанция, сообщающая о результате обработки j -го информационного блока для i -го пользователя

V_m — запрос на извлечение информации из PP,

K_o — ключ оператора, служащий для заверения цепочки данных в PP,

$I=Im(x, k)$ — функция вычисления имитовставки от информации x на ключе k .

Легко видеть, что функция вычисления имитовставки обладает возможностью как авторизации пользователя, так и контроля целостности передаваемой и хранимой информации.

Для обеспечения информационного взаимодействия пользователей и оператора необходимо обеспечить функционирование сервера оператора (сервер приема-выдачи информации распределенного реестра), имеющего следующие области для передачи данных:

- ◆ область приема данных сервера, в которую пользователи передают данные для помещения в рас-

пределенных реестр и запросы для выгрузки данных из распределенного реестра,

- ◆ область данных, в которую перемещаются объекты ошибочного формата (например, не имеющие кода аутентификации пользователя),
- ◆ область данных, содержащая квитанции о помещении информации в распределенный реестр,
- ◆ область данных выгрузки данных по запросам пользователей.

Полагаем, что пользователь системы имеет персональный вычислитель (ноутбук, смартфон или выделенный криптокомпьютер), подключенный при помощи каналов связи (телекоммуникационной среды) к серверу приема-выдачи информации РР.

Для регистрации в системе пользователь X_i при помощи датчика случайных чисел с гарантированными статистическими свойствами создает ключи K_{pi} — персональный ключ (персональная информация) пользователя РР и K_{si} — сетевой ключ пользователя (также являющийся частью персональной информации пользователя), предназначенный для связи с оператором РР и формирует контейнеры $C_{i1}=E(K_{pi}, P_{i1})$ и $C_{i2}=(K_{si}, P_{i2})$, где

$Y=E(x, k)$ — алгоритм зашифрования данных x на ключе k ,

P_{i1}, P_{i2} — пароли пользователей для защиты соответствующих контейнеров.

Далее пользователь формирует сетевое имя как $S_i=E(C, K_{pi}*A_i)$,

где $*$ — функция смешивания персональной информации и описания пользователя.

C — избранная константа.

Приведем пример формирования данных при помощи алгоритма шифрования «Кузнечик».

Например, при задании $A_i=Alisa Valerevna Melnikova$ получим $S_i=b944928487491bde8f5bba9a64b33f4d$.

В данном случае сетевое имя имеет длину 32 шестнадцатеричных знака (16 байт), что соответствует длине блока открытого текста алгоритма «Кузнечик».

После формирования сетевого имени и контейнера C_{i2} эти данные синхронизируются между пользователем и оператором РР.

Это означает, что контейнер C_{i2} может быть сформирован и оператором РР и передан пользователю при его регистрации, возможно выполненной в рамках национального законодательства, при этом пароль для раскрытия контейнера передается лично пользователю при физическом посещении представителя оператора и авторизации пользователя с предъявлением соот-

ветствующих документов. Пароль может быть передан и по альтернативным каналам связи, например, смс при регистрации пользователя с учетом номера его мобильного устройства.

Для подготовки данных для отправки их в РР пользователь может использовать конструктор атомов РР [6], позволяющий создать зашифрованный, подписанный (снабженный имитовствкой) или открытый блок данных. При этом зашифрованный или подписанный блок формируется на персональном ключе пользователя и доступен только самому пользователю, что позволяет обеспечить дополнительно невозможность ознакомления оператора РР с информацией пользователя.

Далее пользователь формирует запрос $Z_{ij} = Im([INFO_{ij}, S_i, T_k], K_{si})$ и направляет его на сервер приема-выдачи данных. Сервер приема данных проверяет имитовставку пользователя по запросом, тем самым проводя как аутентификацию отправителя, так и проверку целостности данных.

При положительном результате проверки информация передается серверу записи в РР, который передает информацию для обработки в сервер оператора РР, хранящий ключ оператора K_o . Данный сервер записывает в систему хранения данных (СХД) блок Z_{ij} (цифровой контейнер). При положительном результате записи в СХД для пользователя формируется квитанция K_{vij} , содержащая номер блока, куда помещена информация пользователя, номер транзакции, время помещения в РР и подпись оператора под данными пользователя.

Приведем пример такой квитанции

```
DNum:3
TNum: c09f9ae8a8921d91b41691c061cd6b61
Sign: ad3fed45df10834c
File: a01
NetName: b944928487491bde8f5bba9a64b33f4d
AddTime:01:37:11~<13.01.2018
```

В данном случае квитанция удостоверяет для пользователя с сетевым именем NetName помещение файла a01 в звено распределенного реестра с номером 3 при этом имитовставка в СХД, выработанная оператором РР, принимает значение Sign, а номер транзакции составляет значение Tnum, время формирования записи (звена РР) AddTime.

Для извлечения данных или для изменения прав доступа к записи (по умолчанию доступ к записи предоставляется пользователю, который ее выполнил) пользователь использует специальные запросы.

Приведем пример таких запросов.

```
access
dnum:1
+: b944928487491bde8f5bba9a64b33f4d
```

запрос означает, что доступ к записи с номером 1 дополнительно предоставлен (+) пользователю с сетевым именем «Alisa».

```
или
load
dnum:1
```

запрос означает, что из PP будет выгружена запись с номером 1.

При запросе на извлечение данных или изменение прав доступа запрос Vm снабжается имитовставкой пользователя и передается в сервер оператора PP, который обращается к СХД в режиме чтения и по номеру записи, либо другой информации поиска (сетевом имени, дате) извлекает информацию и передает серверу приема-выдачи данных, либо формирует квитанцию о неуспешном поиске и невозможности извлечении данных.

Структура системы хранения данных

В целях обеспечения основных свойств распределенного реестра [7], следующих из названия технологии blockchain — «цепь» или «цепочка» блоков, блокчейн в первую очередь должен обеспечивать свойства цепи — неразрывность и прочность, которые являются парафразом свойства целостности.

Неразрывность определяется как свойство следования блоков (звеньев цепи) одного за другим, в заданной в процессе создания блокчейна последовательности, а прочность — невозможность замены или удаления звена из цепочки.

Если рассматривать блокчейн как системную целостность, то он должен состоять из отдельных элементов — звеньев, каждое из которых в свою очередь делится на элементарные компоненты (назовем их атомами блокчейна). В данном случае для СХД формируется последовательность записей в нотации языка С:

```
I1=fwrite(dnum,1, 16, fl);
I2=fwrite(ntran,1, 16, fl);
I3=fwrite(tdt,1, 8, fl);
I4=fwrite(buf,1, buflen, fl);
I6=fwrite(imi,1, 8, fl);
I5=fwrite(&buflen,4, 1, fl);
I7=fwrite(dnum,1, 16, fl);
```

dnum — уже упомянутый нами выше номер записи (номер звена),

ntran — номер транзакции,
tdt — время и дата формирования звена,
buf — данные пользователя, записываемые в СХД длиной buflen,
dnum1=dnum+1, обеспечивающих неразрывность перехода к следующему звену,
imi=Im(dnum|ntran|tdt|buf, Ko) — имитовставка от конкатенации данных.

Кроме того, старшая область поля dnum заполняется значением imi от предыдущего звена, что позволяет добиться того же свойства, как и в блокчейне Bitcoin — зависимости хеш-значений (в данном случае вычисленных при помощи приватного элемента Ko) от всей последовательности предыдущих данных.

Приведем пример последовательного формирования описанных полей:

```
DNum:13
Полное значение: 6c006896973848d70000000000000000
TNum:44f98f920985679580a8b7bee17de548
Sign: dabfd993c75f3366
File: a01
AddTime:01:10:48~<20.01.2018
```

```
и
DNum:14
Полное значение: dabfd993c75f33660000000000000000e
TNum: ec2120a826f51e32255daa1f6002f5a2
Sign: baa49fb79db3805b
File: a01
AddTime:01:11:09~<20.01.2018
```

Как легко видеть, поле imi предыдущего блока заполняет старшие разряды (8 байт) поля dnum текущего блока (предыдущий блок с номерами 13, текущий с номером 14), что позволяет обеспечить зависимость от всей предыдущей информации, помещенной в распределенный реестр.

Выводы

Сформулированная концепция создания доверенного защищенного распределенного реестра может являться методологической основой для формулирования ведомственных или национальных регулирующих требований в области цифровой экономики [8], а также послужить технической основой для разработки конкретных проектов в области защищенных систем, использующих распределенные реестры в сфере государственного управления, финансов и учетно-сервисных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. V. Zaitsev, S. S. Gostev, P. A. Cherkashin, Shcherbakov A. Yu. (2017) Regarding the Technology of Distributed Storage of Confidential Information in Centers of General-Purpose Data Processing, Automatic Documentation and Mathematical Linguistics, Vol. 51, No. 3, 117–119. ISSN0005–1055
2. Nakamoto, S. 2008. Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. bitcoin.org.
3. Биктимиров М. Р., Щербаков А. Ю. Проблемы синтеза доверенных систем // Труды ИСА РАН. — 2012. — Том 53. — С. 264–271.
4. Централизованные криптовалюты (2017). geektimes.ru/company/waves/blog/289379/
5. Pravikov D. I., Shcherbakov A. Yu. (2018) Changing the paradigm of information security, Highly available systems, 2, 35–39. ISSN2072–9472
6. Shcherbakov, A. Yu. (2018) About development tools for creation corporative distributed ledger (blockchain) Automatic Documentation and Mathematical Linguistics, 4, 30–34. ISSN0548–0027.
7. Биктимиров М. Р., Домашев А. В., Черкашин П. А., Щербаков А. Ю. Блокчейн: универсальная структура и требования // Научно-техническая информация. Сер. 2. — 2017. — № 11. — С. 1–4.
8. А. Ю. Щербаков. Синтез универсальной архитектуры и протокола криптовалюты в рамках национального проекта/ Системы высокой доступности, № 3, т. 13, 2017 — с. 15–18.

© Гостев Сергей Сергеевич, Гриняев Сергей Николаевич,
Щербаков Андрей Юрьевич, Правиков Дмитрий Игоревич (dir@gubkin.pro).
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

КОНЦЕПЦИЯ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ЕДИНИЦЫ И АРХИТЕКТУРА РЕГИСТРАЦИИ РАБОТНИКОВ И РАБОТОДАТЕЛЕЙ В ДОВЕРЕННОМ РЕЕСТРЕ

THE CONCEPT OF A UNIVERSAL
PROFESSIONAL UNIT
AND THE ARCHITECTURE
OF REGISTRATION OF EMPLOYEES
AND EMPLOYERS IN THE TRUSTED
REGISTER

S. Grinyaev
A. Scherbakov
D. Pravikov
A. Ryazanova

Summary. The article deals with the issues of effective functioning of the interactive system between the labor market and the education system. The authors propose the use of an autonomous universal data base designed to take into account the professional qualities of employees and the requirements of employers. The authors note that the considered architecture of employees and employers registration in the trusted register and the concept of a universal professional unit meet the necessary requirements of the trusted storage of information.

Keywords: universal professional unit, digital environment, trusted registry, national cryptographic standards.

Гриняев Сергей Николаевич

Д.т.н., с.н.с., РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина

Щербаков Андрей Юрьевич

Д.т.н., профессор, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина

Правиков Дмитрий Игоревич

*К.т.н., РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина
dip@gubkin.pro*

Рязанова Алина Александровна

*Заместитель начальника, Центр развития
криптовалют и цифровых финансовых активов ВИНТИ
РАН (Москва)*

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы эффективного функционирования системы взаимодействия рынка труда и системы образования. Авторами предлагается использование автономного универсального информационного массива, предназначенного для учета профессиональных качеств работников и требований работодателей. Авторы отмечают, что рассмотренная архитектура регистрации работников и работодателей в доверенном реестре и концепция универсальной профессиональной единицы отвечают необходимым требованиям доверенного хранения информации.

Ключевые слова: универсальная профессиональная единица, цифровая среда, доверенный реестр, национальные криптографические стандарты.

Введение

В современном обществе весьма остро стоит проблема соответствия существующего человеческого капитала и потенциала целям и задачам развития как государственного, так и частного сектора экономики. В настоящее время многообразие отраслей экономики, предприятий и организаций и выполняемых ими функций обусловил быстрый рост числа динамично развивающихся профессий, требующих новых навыков и носящих междисциплинарный характер. Кроме того, государственные программы инновационного развития и модернизации экономики, направленные на создание конкурентноспособной экономики знаний и высоких технологий в условиях многовекторных хозяйственных связей [1], предполагают быстрое приведение профессий в соответствие с новыми требованиями. При этом, в соответствии с определенной распоряжением Правительства РФ от 28 июля 2017 г. № 1632-р Стратегией

«цифровой трансформации» российской экономики, необходимым условием для обеспечения эффективного взаимодействия бизнеса, научно-образовательного сообщества, государства и граждан является создание экосистемы цифровой экономики.

Однако эти факторы не учитываются в полной мере существующими системами учета профессиональных навыков с целью коррекции образовательных программ. В сущности, по причине отсутствия единой автоматизированной системы учета профессиональных качеств и требований, фактические профессиональные качества и требования к вакансиям дублируются на разрозненных интернет-ресурсах с расхождениями и достоверностью различной степени.

Кроме того, существующие системы трудоустройства не решают задач обработки и анализа быстроменяющихся, часто неструктурированных данных, содержащихся

в резюме и вакансиях. Для обработки неструктурированных текстовых данных применима методика множественного семантического автоматизированного анализа текстов, принцип работы которой описан в статье [2]. Однако для использования этой методики требуется предварительная ручная обработка текстов, что является существенным ограничением при работе с большими массивами неструктурированных данных.

Негативное влияние на анализ неструктурированных и частично структурированных данных оказывает невозможность или сложность собрать их в единый массив, так как объем требующей ручной обработки информации в этом случае достигает слишком большой величины [3].

Для эффективного функционирования системы взаимодействия рынка труда и системы образования целесообразно создание технологической инфраструктуры, отвечающей требованиям доверенного хранения информации о работниках и работодателях, универсальности, анонимности, достоверности и актуальности данных, использования национальных криптографических стандартов и алгоритмов, и обладающей свойствами информационной безопасности [4].

Понятие универсальной профессиональной единицы

В связи с этим предлагается использование автономного универсального информационного массива, предназначенного для учета профессиональных качеств работников и требований работодателей.

В целях демонстрации целесообразности разработки такого массива необходимо рассмотреть понятие универсальной профессиональной единицы и сформулированные авторами предложения по созданию системы автоматизированного учета универсальных профессиональных единиц (САУУПЕ).

Универсальная профессиональная единица (УПЕ, ProfUnit) — совокупность выстроенных в определенной последовательности и с использованием криптографических средств данных, касающихся профессиональной трудовой деятельности участников. УПЕ создается программной или технологической платформой в виде специализированного файла либо звена блокчейна и снабжается уникальным номером и меткой времени создания. УПЕ содержит сетевое имя (псевдоним владельца) и допускает проверку неизменности содержащихся в ней данных.

Участник (пользователь) САУУПЕ — физическое лицо, индивидуальный предприниматель или юридиче-

ское лицо, прошедшее на платформе автоматизированного учета универсальных профессиональных единиц (АУУПЕ) идентификацию принадлежности и получившее уникальное сетевое имя (псевдоним). Участник осуществляет внесение УПЕ в систему.

Сетевое имя (уникальный номер участника, УНУ) — уникальная последовательность шестнадцатеричных цифр фиксированной длины. Сетевое имя может быть связано с персональным ключом участника.

Регистратор (биржа труда) — юридическое лицо, которое выполняет действия по авторизации участника, получению от него распоряжений по регистрации и распоряжению профессиональной информацией и передаче информации в уполномоченный доверенный реестр.

Оператор доверенного реестра работников и работодателей (ОДРРР) — уполномоченная организация, держатель технологической платформы, который получает от регистраторов и участников информацию об участниках, их профессиональных навыках и требованиях, регистрирует данные действия в принадлежащем ему реестре и предоставляет данные из него по запросам пользователей и уполномоченных организаций.

Авторизация участника — процесс установления соответствия описания участника в системе его фактическому описанию. Может проводиться при помощи предоставления удостоверяющих личность и профессиональную квалификацию документов, либо регистрационных документов юридического лица регистратору.

Ключ участника (регистратора) — информация, хранящаяся в личном (персональном) контейнере участника (регистратора), предназначенная для фиксации целостности данных участника (регистратора).

Запись предварительного закрепления (ЗПЗ) — информационная единица, содержащая метку времени, информацию о профессиональном статусе, навыках и требованиях участника, сетевое имя участника, коды идентификации, необходимые для проверки неизменности данной единицы, и другую необходимую информацию.

Запись подтверждения регистрации (ЗПР) — информационная единица, содержащая метку времени, ЗПЗ, уникальный номер регистратора, который формируется аналогично с сетевым именем участника, коды идентификации для проверки неизменности данной ЗПР и другую необходимую информацию.

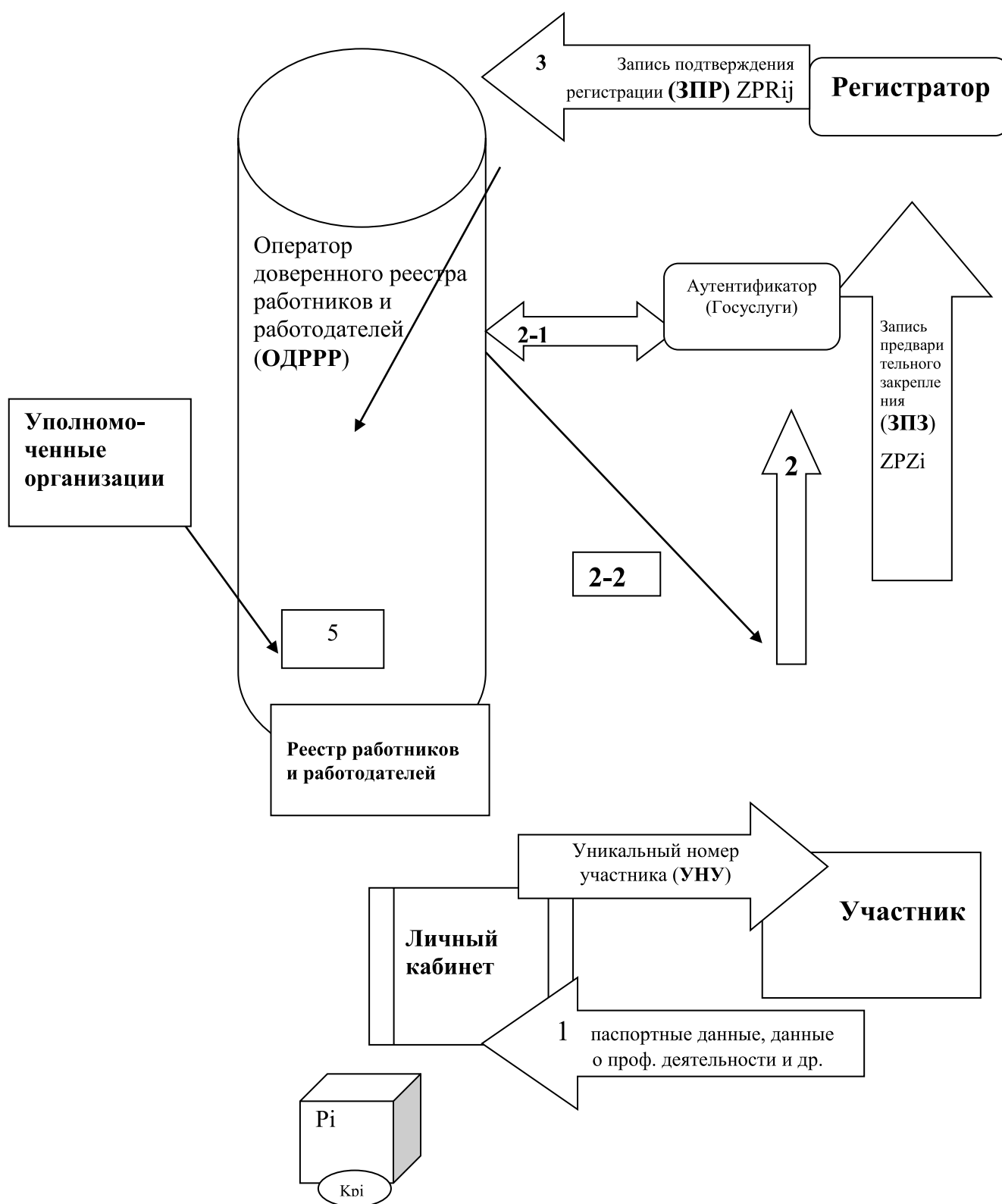


Рис. 1. Архитектура доверенного реестра

Общая архитектура регистрации работников и работодателей в уполномоченном доверенном реестре

Работа системы описана рис. 1 и схематично состоит из следующих шагов:

1. Участник обращается в личный кабинет у **оператора доверенного реестра работников и работодателей** (ОДРРР, далее также — оператор). В личном кабинете он вводит свои паспортные данные, анкету, данные о профессиональной подготовке и квалификации и другую информацию (в том числе и мобильный номер) и получает в ответ сетевое имя или уникальный номер участника (УНУ), который является его сетевым именем и в дальнейшем однозначно идентифицирует его в системе — UNPi. Одновременно у ОДРРР формируется случайный ключ участника Kri, который помещается в личный контейнер участника, закрытый на пароле участника Pi. Пароль и контейнер хранятся у оператора до завершения идентификации участника.

2. Участник с УНУ обращается к аутентификатору (регистратору) и проходит аутентификацию в соответствии с постановлением № 820 от 14.07.2018. Для проведения идентификации регистратор обращается к ОДРРР и сверяет данные, имеющиеся в личном кабинете и фактически предъявленные (стрелка 2–1). При положительном завершении идентификации запись участника в ОДРРР становится актуальной (валидной), а пользователю в смс-сообщении направляется пароль от ключевого контейнера Pi, при помощи которого участник может выполнять значимые действия в системе (стрелка 2–2), например, обновление анкеты, указание нового места работы, размещение резюме и т.д.

Участник для запроса на различные действия формирует запись предварительного закрепления (ЗПЗ), содержащую метку времени, информацию о своем профессиональном статусе, навыках и требованиях REQt и UNPi (которые фактически и составляют УПЕ) и направляет ЗПЗ регистратору.

3. Регистратор (или уполномоченный регистратором партнер в рамках договорных отношений) выполняет значимые действия по изменению информации участников системы, в том числе взимает плату с участника, и формирует запись подтверждения регистрации (ЗПР). ЗПР содержит метку времени, ЗПЗ, UNRj (уникальный номер регистратора, который формируется аналогично с UNP) на ключе регистратора Krij (который также зарегистрирован у ОДРРР). Таким образом, ЗПЗ находится внутри ЗПР и его неизменность подтверждена пользователем.

4. ОДРРР при помощи имеющихся у него ключей Kri и Krij проверяет ЗПЗ и ЗПР и, при успешных проверках помещает данные об участнике и его профессиональных навыках в доверенный реестр, к которому имеют доступ уполномоченные организации (прямоугольник 5), а также хранит в архиве ЗПР.

5. Уполномоченные органы обращаются к реестру работников и работодателей по правилам и регламентам, установленным ОДРРР.

Таким образом, работник представлен работодателям или государственным органам в виде последовательности УПЕ, которые гарантированно неизменно доставлены в ОДРРР, заверены регистратором (биржей труда) и содержат как этапы профессионального роста и накоплении навыков, так и сведения о местах работы, своего рода «электронную трудовую книжку». Часть реестра может содержать наборы требований работодателя также в виде УПЕ, привязанные либо к типам специальностей, конкретных должностей и вакансий, или даже к персоналиям работников [5].

Все участники системы видят только сетевое имя участника, по которому невозможно восстановить реальные параметры участника (за исключением уполномоченных органов), что позволяет полностью защитить персональные данные и учесть интересы работника в организации трудовых отношений. Предлагаем такую концепцию сетевых имен назвать «системой разумной анонимности».

Выводы и результаты

Предложенная платформа предусматривает применение национальных информационных технологий, в том числе национальных криптографических алгоритмов, и формирование доверенной и корректной цифровой среды для эффективного взаимодействия образования, государственных учреждений и рынка труда, и может рассматриваться как часть национальной цифровой платформы, являющейся основой для создания и развития цифровой экономики [6].

Рассмотренная архитектура регистрации работников и работодателей в доверенном реестре и концепция универсальной профессиональной единицы отвечают требованиям доверенного хранения информации о работниках и работодателях, универсальности, разумной анонимности, достоверности и актуальности данных, и обладает свойствами информационной безопасности, защиты персональных данных, хранимых в доверенном реестре и передаваемых по каналам общего доступа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Портал госпрограмм РФ. URL: <https://programs.gov.ru/Portal/>
2. Анисимова А. Э., Рязанова А. А., Щербakov А. Ю. Семантическое ядро как универсальный инструмент классификации и систематизации неструктурированной информации в области человеческого капитала // Научно-технический сборник «Научно-техническая информация», серия 1, № 11, 2017. С. 31–37.
3. Biktimirov M. R., Elizarov A. M., Shcherbakov A. Yu. (2016) Trends in the development of technologies for processing Big data and tools for storing multi-format data and analytics // Russian Digital Libraries Journal. V. 19. No 52, 390–411.
4. A. V. Zaitsev, S. S. Gostev, P. A. Cherkashin, Shcherbakov A. Yu. (2017) Regarding the Technology of Distributed Storage of Confidential Information in Centers of General-Purpose Data Processing, Automatic Documentation and Mathematical Linguistics, Vol. 51, No. 3, 117–119. ISSN0005–1055
5. Biktimirov M. R., Efremov P. V., Polikarpov S. A., Solodkin D. L., Shcherbakov A. Yu. (2014) The development of a system for the collection and use of scientific and technological results, Scientific and information proseedng, vol.41, pp. 178–182, ISSN0147–6882
6. Pravikov D. I., Shcherbakov A. Yu. (2017) The use of blockchain and cryptocurrency technology to support work on the state defense order Highly available systems, 4, 25–30. ISSN2072–9472

© Гриняев Сергей Николаевич, Щербakov Андрей Юрьевич, Правиков Дмитрий Игоревич (dip@gubkin.pro), Рязанова Алина Александровна.
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

«ДЕЛО HUAWEI» КАК ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ ГИБРИДНОЙ УГРОЗЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОЙ СФЕРЕ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ АСУП

“HUAWEI CASE” AS AN EXAMPLE OF HYBRID THREAT REALIZATION TO THE NATIONAL SECURITY IN HIGH-TECH SPHERE IN THE OPERATION PROCESS CONTROL SYSTEM

**S. Grinyaev
I. Pankratenko
D. Medvedev
D. Kashirin**

Summary. The article deals with the transformation of national security threats in the context of the global digital environment. It is noted that the processes of complex security should be integrated into the processes at all levels of operation and development of the object. On the example of “Huawei case” the authors illustrated the modernization of methods of confrontation at the intergovernmental level.

Keywords: digitalization, hybrid threats, complex security, Huawei.

Гриняев Сергей Николаевич

Д.т.н., с.н.с., РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина

Панкратенко Игорь Николаевич

Д.и.н., заместитель генерального директора, АНО «Центр стратегических оценок и прогнозов» (Москва)

Медведев Дмитрий Андреевич

К.полит.н., доцент, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина

Medvedev.d@gubkin.ru

Каширин Дмитрий Игоревич

Аспирант, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы трансформации угроз национальной безопасности в условиях развития глобальной цифровой среды. Отмечено, что процессы обеспечения комплексной безопасности должны быть интегрированы в процессы на всех уровнях функционирования и развития объекта. На примере «дела Huawei» авторы иллюстрируют модернизацию методов противоборства на межгосударственном уровне.

Ключевые слова: цифровизация, гибридные угрозы, комплексная безопасность, Huawei.

В условиях активной цифровизации глобального информационного пространства объекты обеспечения национальной безопасности все чаще подвергаются угрозам, которые носят гибридный, комплексный, многовекторный характер (экономические санкции, отказ в доступе к технологиям, инициирование компьютерных атак и др.).

Характерной чертой таких угроз является то, что они зарождаются в одной сфере, а реализуются в другой или нескольких сферах безопасности. Это приводит к масштабной трансформации подходов к обеспечению безопасности, так как, например, защита информации до недавних пор рассматривалась как отдельное направление обеспечения безопасности, не связанное с обеспечением устойчивости и качества управления в системе в целом [1].

В этих условиях изменяется и организационная структура обеспечения безопасности [2]. Процессы обеспечения комплексной безопасности должны быть инте-

грированы в процессы на всех уровнях функционирования и развития объекта.

Появление новых угроз для различных видов безопасности, безусловно, связано с усложнением механизмов управления. Так, например, использование в системах управления «цифровые двойники» приводит к появлению нового, ранее неидентифицированного вида угроз безопасности [3]. Новые угрозы выходят за рамки классической триады «конфиденциальность, целостность, доступность» [4]. В частности, возникает комплексная угроза несоответствия модели объекту.

Формирующаяся информационная цифровая среда создает предпосылки для изменения доминирующих социально-экономических моделей. И, если на индустриальном этапе развития характерны централизация и концентрация производства, то для информационного этапа конкурентным преимуществом становится гибкая децентрализованная организация управленческих процессов в социально-экономической сфере [5].

Как отмечают теоретики глобального информационного общества, управлять социально-экономическими процессами эффективно могут только институционализированные субъекты, которые обладают большей информацией и имеют возможность регулировать поток и каналы ее распространения [6].

В качестве примера реализации гибридной угрозы национальной безопасности в высокотехнологической среде предлагается рассмотреть атаку Соединенных Штатов и их союзников на китайскую компанию Huawei, которая иллюстрирует методы борьбы в политико-экономическом конфликте. Как показывает анализ ситуации, главная задача конкурентов КНР заключается в создании непреодолимых препятствий для развития Китая своего высокотехнологического сектора.

Так, задержание в декабре 2018-го года в Ванкувере по запросу США канадскими властями директора китайской компании Huawei Technologies Мэн Ваньчжоу финансового первоначально мотивировалось нарушениями этой кампанией американских санкций против Ирана. Однако, практически сразу стало ясно, что это формальный предлог, и действительные мотивы этого задержания кроются совершенно в другой плоскости. Поскольку задолго до задержания Мэн Ваньчжоу американские власти, в первую очередь — так называемое «deep state» США, представляющее собой неформальное объединение бизнеса, политиков и разведывательных служб, оказывали давление на своих иностранных партнеров с целью принуждения их к отказу от сотрудничества с Китаем в высокотехнологических секторах. В частности — к отказу от использования телекоммуникационного оборудования, произведенного китайским концерном Huawei.

Для более полного понимания ситуации необходимо отметить, что Huawei играет громадную роль в стратегии «Сделано в Китае 2025» в качестве проводника технологии 5G. Более того, в 2017 году, по данным Всемирной организацией интеллектуальной собственности, Huawei с большим отрывом возглавила список компаний, подавших заявки на международные патенты. А в 2018 году Huawei была названа крупнейшим в мире поставщиком телекоммуникационного оборудования и заняла второе место по количеству производимых смартфонов. Она также обогнала шведскую «Эриксон» и финскую «Нokia» по количеству коммуникационных станций, выйдя на первое место в мире.

Таким образом, выбор именно этой компании в качестве мишени был наиболее оптимален для администрации Трампа и ее союзников при решении задачи замедления или же, в оптимальном варианте, прекращения продвижения Китая в высокотехнологических секторах.

Особенно — с учетом того, насколько эта компания продвинулась в продвижении технологий 5G.

Кроме того, для реализации этой задачи был избран метод вытеснения китайской компании из мировой (как минимум, западной) экономики нерыночными средствами. То есть — с использованием административно-политического ресурса и возможностей разведывательного сообщества США и его союзников — так называемой полуофициальной структуры «Пять глаз», в которую входят спецслужбы Австралии, США, Канады, Новой Зеландии и Великобритании, а также тесно сотрудничающие с ней спецслужбы Японии и Германии.

Именно эти страны после развития «дела Huawei» практически одновременно приняли меры для запрета или же серьезного ограничения использования оборудования китайской компании при создании сетей 5G, мотивировав свои действия «соображениями национальной безопасности».

Необходимо отметить, что Пекин практически сразу после задержания в Канаде Мэн Ваньчжоу дал предельно адекватную оценку происходящему и не испытывает никаких иллюзий в отношении истинных мотивов действий США и их партнеров.

Кроме того, руководство КНР полностью осознает возникающую для него угрозу этого нового типа конфликта, а потому его ответ носил достаточно жесткий характер. Буквально за неделю с момента задержания Мэн Ваньчжоу в Китае, в качестве ответной меры были задержаны 13 канадских граждан (после освобождения Мэн под залог 8 из них были отпущены и беспрепятственно покинули КНР).

Помимо этого, дипломатические представители Китая по официальным и неофициальным каналам довели до руководства участвовавших в «деле Huawei» государств (в частности — Канады, Японии, Германии и Австралии) информацию о том, что дальнейшие действия против китайской компании повлекут за собой ответные шаги Пекина в торгово-экономических и финансовых отношениях с этими странами.

Вместе с тем, руководство КНР вновь обратило внимание на уязвимость своей высокотехнологической отрасли в следующем вопросе — зависимость от поставок чипов и других комплектующих, которые китайские компании вынуждены закупать в США и ряде других стран на сумму не менее 200 миллиардов долларов ежегодно.

В настоящее время по данному вопросу готовится соответствующее постановление директивных органов КНР, предусматривающее развитие соответствующих

секторов китайской промышленности и выделение для этой задачи необходимого финансирования.

Важно подчеркнуть, что одной особенностью гибридных противостояний является их нелинейный, неравномерный характер. Несмотря на снижение интенсивности процесса на текущий момент, ни в КНР, ни в США «дело Huawei» не считаю законченным. Специалисты этих государств в настоящее время проводят тщательный анализ ситуации, разрабатывая методики для более эффективного использования подобных ситуаций в собственных целях.

В этой связи нельзя не отметить справедливость опасений экспертов, указывающих на то, что обеспечением цифровизации государственного управления в России

активно занимаются транснациональные гиганты, представляющие исключительно передовые страны Запада.

Анализ конфликта позволяет констатировать синтез новых средств противоборства с классическими в условиях нарастающей конкуренции на всех уровнях. Странами применяется комплекс мер, включающих в себя нерыночные средства, для создания условий недопущения некоторых объективных политико-экономических трансформаций на глобальном и региональном уровне.

Развитие аналитики безопасности должно быть тесно связано с изучением угроз как разноректорных, комплексных явлений. Методология и теория национальной безопасности находится на стыке наук, интегрируя многообразие подходов и методов междисциплинарного знания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правиков Д.И., Щербаков А. Ю. Изменение парадигмы информационной безопасности // Системы высокой доступности, 2018. № 2. С. 34–39.
2. Гриняев С. Н. Мир 2013: события, факты, комментарии. М.: ЦСОиП, 2014. 328 с.
3. Гриняев С.Н., Правиков Д. И. Основы общей теории киберпространства. Теория боя в киберпространстве. М.: АНО ЦСОиП, 2018. 124 с.
4. Гриняев С.Н., Правиков Д. И. Об одном подходе к описанию сложных социотехнических систем // Информационные войны, 2018. № 2 (46). С. 34–37.
5. Гриняев С.Н., Калашников П. К., Орлов А. И., Самарин И. В., Фомин А. Н., Юнкин А. Г. Научно-методический аппарат антикризисного стратегического планирования М.: РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, 2015. 420 с.
6. Медведев Д.А, Тарчкова А. А. Инструменты международной легитимации внешнеполитических действий России в условиях информационного противоборства // Информационные войны, 2018. № 3. С. 34–37.
7. Самарин И. В., Фомин А. Н. Стратегическое государственное планирование: автоматизация процесса оценки рациональных уровней финансирования национальной обороны // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки», -2018, — № 6, -С. 136–144

© Гриняев Сергей Николаевич, Панкратенко Игорь Николаевич,
Медведев Дмитрий Андреевич (Medvedev.d@gubkin.ru), Каширин Дмитрий Игоревич.
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ТЭК КАК ОБЪЕКТ НАУЧНОГО АНАЛИЗА

INTEGRATED SECURITY OF FUEL AND ENERGY COMPLEX AS OBJECT OF SCIENTIFIC ANALYSIS

**S. Grinyaev
D. Pravikov
D. Medvedev**

Summary. The article deals with the complex safety of fuel and energy complex objects as an independent direction of research, its categorical apparatus is described. The authors carried out analysis of the key documents regulating the sphere of fuel and energy security. It is noted that at the moment there is no theory of countering hybrid threats to social engineering systems. The authors identify the key aspects of the consideration of fuel and energy facilities and sources of threats.

Keywords: fuel and energy complex, complex security, hybrid threats, complex security, regulatory framework.

Гриняев Сергей Николаевич

Д.т.н., с.н.с., РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина

Правиков Дмитрий Игоревич

К.т.н., РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина

Медведев Дмитрий Андреевич

К.полит.н., доцент, РГУ нефти и газа (НИУ) имени

И. М. Губкина

Medvedev.d@gubkin.ru

Аннотация. В статье комплексная безопасность объектов топливно-энергетического комплекса рассматривается как самостоятельное направление исследования, описан ее категориальный аппарат. Проведен анализ ключевых документов, регулирующих сферу обеспечения безопасности ТЭК. Отмечено, что на данный момент отсутствует теория противодействия гибридным угрозам социотехническим системам. Авторами определены ключевые аспекты рассмотрения объектов ТЭК и источников угроз.

Ключевые слова: ТЭК, комплексная безопасность, гибридные угрозы, комплексная безопасность, нормативная база.

Согласно Стратегии национальной безопасности Российской Федерации, утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 12 мая 2009 г. № 537, национальная безопасность представляет собой сложную многоуровневую систему, функционирования которой обусловлено множеством социально-экономических, политических и иных факторов. К основным видам безопасности относят экономическую, социально-политическую, военную, энергетическую и др. Необходимо отметить, что энергетическая безопасность интегрирует несколько направлений обеспечения безопасности, имея влияние на экологическую, экономическую и иные виды. Соответственно угрозы энергетической безопасности реализуются и в других сферах жизнедеятельности, что подчеркивает их комплексную природу.

При этом, усиление энергетического фактора в российской экономике делает энергетическую безопасность ключевым условием повышения экономической безопасности в целом. Так, в пункте 60 Стратегии отмечено, что энергетическая безопасность является одним из главных направлений обеспечения национальной безопасности в экономической сфере на долгосрочную перспективу [1].

Необходимо отметить, что при перечислении условий ее обеспечения используется термин «нацио-

нальная энергетическая безопасность» [1]. Помимо национального выделяется региональный (субъект РФ) и локальный (местный) уровни обеспечения энергетической безопасности России.

В «Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2030 года» подчеркнуто, что достижение энергетической безопасности осуществляется на базе реализации всех основных составляющих государственной энергетической политики. Энергетическую политику можно определить как систему мер государственного регулирования, направленных на эффективное обеспечение потребностей экономики в энергоносителях при общественно приемлемых ценах и тарифах [2].

В соответствии с указанным документом мы сейчас находимся на третьем этапе развития энергетической отрасли, связанном с развитием инновационной экономики.

Согласно документу, проведение политики такого рода основывается на следующих важнейших принципах [2]:

- ◆ обеспечение надежности энергообеспечения экономики и населения России;
- ◆ разделение полномочий и ответственности органов власти на всех уровнях, энергоснабжающих

- компаний и хозяйствующих субъектов-потребителей;
- ◆ обеспечение надежного функционирования и предсказуемого развития энергетической инфраструктуры;
 - ◆ своевременность геологоразведки, подготовки и освоения новых месторождений традиционных видов топлива, в том числе за счет частно-государственного партнерства и рациональной налоговой политики (имея в виду опережающий добычу прирост разведанных извлекаемых запасов), своевременность подготовки к использованию замещающих инновационных энергоресурсов и источников энергии по мере исчерпания традиционных ископаемых энергоресурсов;
 - ◆ снижение уровня износа основных производственных фондов;
 - ◆ максимально возможное использование конкурентоспособного отечественного оборудования во всех технологических процессах и проектах, стимулирование развития отечественного производства энергоносителей с высокой добавленной стоимостью и повышения качества нефтепродуктов за счет ужесточения стандартов качества моторного топлива, модернизации нефте- и газоперерабатывающих комплексов на территории России, дифференциации ставок акцизов на моторные топлива различного качества;
 - ◆ повышение уровня национальной энергетической безопасности в результате международного сотрудничества в сфере

Стоит указать, что понятие энергетической безопасности отличается от используемого в дальнейшем понятия безопасности объектов ТЭК. Так, данный аспект отмечается, например, в работе Т.А. Спицыной [3]. Как показывает анализ документов, безопасность объектов ТЭК является составной частью более масштабной национальной энергетической безопасности. Если первое воспринимается как состояние защищенности страны, ее граждан, общества, государства и экономики от угроз надежному топливно- и энергообеспечению, то второе акцентировано на защищенности конкретных объектов от внутренних и внешних угроз различного типа.

Детализация мер, предусмотренных Стратегией национальной безопасности, осуществлена в Поручении Президента РФ от 15.11.2011 № Пр-3400 «Основы государственной политики в области обеспечения безопасности населения Российской Федерации и защиты критически важных и потенциально опасных объектов от угроз природного, техногенного характера и террористических актов на период до 2020 года». В соответствии с Поручением выделяются угрозы природно-

го и техногенного характера, а также террористические угрозы.

При этом одним из основных принципов формирования и реализации государственной политики в области обеспечения безопасности населения и защищенности критически важных и потенциально опасных объектов от угроз различного характера является принцип обеспечения комплексной защиты критически важных и потенциально опасных объектов.

Применительно к ТЭК комплексное обеспечение безопасности объектов регулируется рядом нормативных актов, основным из которых является Федеральный закон от 21.07.2011 г. № 256-ФЗ «О безопасности объектов топливно-энергетического комплекса» [4].

Приказом Министерства энергетики РФ от 13 декабря 2011 г. № 587 утвержден перечень работ, непосредственно связанных с обеспечением безопасности объектов топливно-энергетического комплекса [5]:

1. Оценка достаточности инженерно-технических мероприятий, мероприятий по физической защите и охране объекта топливно-энергетического комплекса.
2. Монтаж и эксплуатация и техническое обслуживание инженерно-технических средств охраны и средств пожаротушения объектов топливно-энергетического комплекса.
3. Осуществление внутреннего контроля в области обеспечения безопасности объектов топливно-энергетического комплекса.
4. Охрана объектов топливно-энергетического комплекса.
5. Разработка, монтаж и эксплуатация информационных систем, информационно-телекоммуникационных сетей и систем защиты информации и информационно-телекоммуникационных сетей объектов топливно-энергетического комплекса.

Необходимо отметить, что данный перечень фактически дает определение комплексной безопасности объектов ТЭК. На основании вышеупомянутого перечня работ можно утверждать, что комплексная безопасность объектов ТЭК включает в себя:

- ◆ физическую безопасность объектов в совокупности с мерами обеспечения контрольно-пропускного режима;
- ◆ пожаро- и взрывобезопасность, защиту от техногенных аварий;
- ◆ промышленную безопасность объектов;
- ◆ информационную безопасность.

Основные положения по физической безопасности объектов ТЭК раскрыты в постановлении Прави-

тельства Российской Федерации от 5 мая 2012 г. № 458 «Об утверждении Правил по обеспечению безопасности и антитеррористической защищенности объектов топливно-энергетического комплекса» [6]. Вопросы пожаро- и взрывобезопасности регламентируются различными документами, в частности:

- ◆ ППБ 01–03 Правила пожарной безопасности в Российской Федерации
- ◆ ВППБ 01–04–98 Правила пожарной безопасности для предприятий и организаций газовой промышленности
- ◆ СНиП 21–01–97 Пожарная безопасность зданий и сооружений.
- ◆ ССБТ. Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения (ИСО 4589–84).
- ◆ Приказом Ростехнадзора от 26.12.2012 № 781 «Об утверждении Рекомендаций по разработке планов локализации и ликвидации аварий на взрывопожароопасных и химически опасных производственных объектах»
- ◆ и другими документами.

Вопросы промышленной безопасности регламентируются Федеральным законом № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов». Дополнительно можно отметить, что на сайте Межгосударственного совета по промышленной безопасности приводится статистика по аварийности и травматизму по странам-участницам совета. Существенная доля аварий приходится на предприятия ТЭК, что говорит об актуальности обеспечения промышленной безопасности в отрасли.

Существенным признаком формирования цифровой экономики является активное использование различных автоматических и автоматизированных систем управления технологическими процессами. Как следствие, промышленная безопасность объектов начинает зависеть от вопросов информационной безопасности. Данное положение нашло отражение в «Основных направлениях государственной политики в области обеспечения безопасности автоматизированных систем управления производственными и технологическими процессами критически важных объектов инфраструктуры Российской Федерации», где отмечено, что целью государственной политики в области обеспечения безопасности этих систем является «снижение до минимально возможного уровня рисков неконтролируемого вмешательства в процессы функционирования данных систем» [7].

Основным актом стратегического планирования, определяющим политику в области обеспечения информационной безопасности Российской Федерации явля-

ется Доктрина информационной безопасности, в которой отмечено, что к национальным интересам страны относится обеспечение устойчивого и бесперебойного функционирования информационной инфраструктуры, в первую очередь критической информационной инфраструктуры и единой сети электросвязи.

Вопросы комплексной безопасности, в том числе комплексной безопасности объектов ТЭК, рассматривались в различных научных работах, но, как представляется, отсутствие методического подхода приводило к тому, что, в зависимости от области профессиональных интересов авторов, под комплексной безопасностью понимался тот или иной набор аспектов безопасности. Вместе с тем, развитие нормативной базы, теории и практики обеспечения безопасности привело к тому, что на текущий момент научно обоснованное и зафиксированное в научных работах непротиворечивое определение комплексной безопасности объектов ТЭК отсутствует.

Прежде чем перейти к описанию понятия комплексной безопасности объектов ТЭК, определим ряд базовых понятий, вытекающих из общих подходов к обеспечению безопасности. Необходимо отметить, что для каждого из рассматриваемых понятий уже существует ряд определений, закрепленных в нормативных актах и научно-технической документации, вместе с тем, необходимость выработки методически единого подхода к описанию комплексной безопасности объектов ТЭК требует их переопределения.

Как представляется, основными понятиями являются «угроза», «ущерб» и «уязвимость», которые будут рассмотрены ниже.

Угроза — потенциальная возможность нанесения ущерба объекту.

Ущерб — результат негативного изменения состояния объекта вследствие реализации каких-то событий, явлений, действий, в том числе в результате реализации угроз, выражающийся в ухудшении свойств объекта.

Необходимо отметить, что угроза связана с характеристиками самого объекта, в отношении которого она проявляется, в первую очередь, с его уязвимостями. Данное замечание является существенным с той точки зрения, что в дальнейшем изложении будет рассматриваться специфика объектов ТЭК, а, значит, перечень угроз будет сформирован с учетом отраслевой специфики.

Уязвимость. Недостаток (слабость) отдельных элементов объекта или объекта в целом, который (которая)

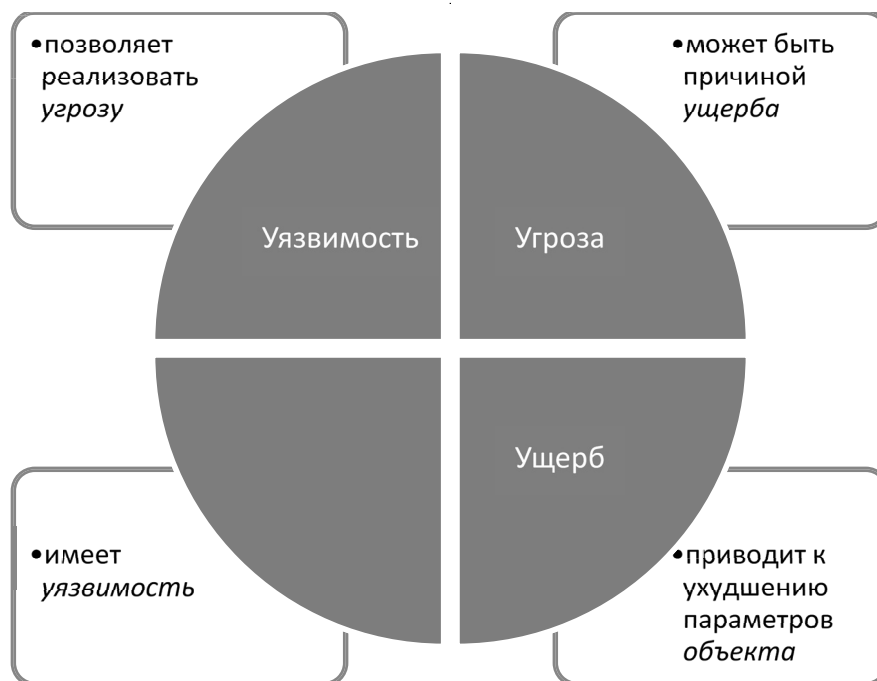


Рис. 1. Взаимосвязь базовых понятий безопасности.

может быть использована в случае реализации угроз безопасности.

На рис. 1 представлена схема взаимосвязи базовых понятий безопасности. Как уже было отмечено, объект ТЭК имеет отраслевую специфику, т.е. имеет не только общие, но и специфические уязвимости, влияющие на его безопасность в целом.

С научной точки зрения объект ТЭК можно описать как социотехническую систему S , состоящую из элементов и связей между ними, что согласуется с подходами, изложенными в [8]. Под элементом o_i объекта ТЭК будем понимать аспект его рассмотрения в виде феномена, обладающего уязвимостями определенного рода. Так, например, объект ТЭК с точки зрения Федерального закона «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» от 26.07.2017 № 187-ФЗ, объект ТЭК может рассматриваться как объект критической информационной инфраструктуры. Обозначим через O множество аспектов рассмотрения объекта ТЭК.

$$O = \{o_{ij}\}$$

Определим, что связь c_{ij} между элементами существует, если деградация элемента o_i приводит к деградации элемента o_j . В противном случае связь между элементами отсутствует. Так, например, поражение АСУ ТП вследствие компьютерного инцидента (объект ТЭК как объект критической информационной инфраструктуры)

может привести к производственной аварии (объект ТЭК как опасный производственный объект с точки зрения Федерального закона «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.1997 № 116-ФЗ). Обозначим через C множество связей между элементами.

$$C = \{c_{ij}\}$$

Тогда объект ТЭК может быть описан как совокупность элементов и связей между ними.

$$S = \langle O, C \rangle$$

Для описания множества аспектов рассмотрения объекта ТЭК примем подход, что включаемый в рассмотрение аспект должен иметь:

- ♦ отражение в законодательной и нормативной базе;
- ♦ государственное регулирование деятельности по выделенному аспекту;
- ♦ подтверждение фактами (статистикой) реализации угроз, связанными с выделенным аспектом.

На основании предложенного критерия определим, что объект ТЭК может рассматриваться как:

- ♦ юридическое лицо, имеющее участников, уставной капитал, счет в банке, цели функционирования в рамках разрешенных видов деятельности и т.д.;

Таблица 1. Исходя из изложенного, определим аспекты рассмотрения объекта ТЭК как перечень, изложенный на рис. 2.

| Аспект объекта ТЭК | Ключевое понятие | Нормативный документ | Подтверждение угрозы | Ответственное ведомство | Макроуровень | Микроуровень |
|--|--|--|---|---|---|---------------------------------------|
| Юридическое лицо | Субъект ТЭК / Лицензиат | -ФЗ | Статистика отзыва лицензий | Ведомства, ответственные за выдачу лицензий | Изменение порядка лицензирования | Нарушение условия лицензии |
| Физический объект | Охраняемый объект ТЭК | -ФЗ | Статистика последствий катастроф и нападений на объекты | Росгвардия | Стихийное бедствие | Незаконное вмешательство |
| Производственный объект | Опасный производственный объект | Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ | Статистика производственных аварий. | Ростехнадзор | Несовершенные технологии | Износ оборудования |
| Источник продукции | Критически-важный объект ТЭК | -ФЗ | Статистика уголовных дел | Минэкономразвитие | Истощение запасов сырья | Хищение продукции |
| Субъект финансово-хозяйственной деят. | Налогоплательщик | НК РФ | Статистика арбитражных дел | ФНС, МВД | Санкции | Штрафы |
| Объект информатизации | Объект критической информационной инфраструктуры | -ФЗ | Статистика компьютерных инцидентов | ФСБ России, ФСТЭК России | Вирусные эпидемии | Целевая компьютерная атака |
| Коллектив специалистов | Трудовой коллектив | ТК РФ | Статистика трудовых споров. | Минтруд | Общий уровень образования и оплаты труда | Трудовой конфликт на предприятии |
| Источник повышенной опасности | Потенциально опасный объект ТЭК | -ФЗ | | МЧС | Использование сырья, или производство продукции пожаро-, взрыво-, химически опасной(ого). | Нарушение правил эксплуатации |
| Источник воздействия на окружающую среду | Объект, оказывающий негативное воздействие на окружающую среду | Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ | Статистика экологических правонарушений | Ростехнадзор | Изменение экологического законодательства | Авария с экологическими последствиями |

- ◆ физический объект, характеризуемый местом расположения, перечнем и параметрами зданий, сооружений, включая охранные, линейных объектов и т.д.;
- ◆ производственный объект, характеризуемый производственным процессом, имеющим технологические особенности, в том числе повышенной опасности;
- ◆ источник производимой продукции, характеризующейся товарной стоимостью, сроком годности, порядком складирования, хранения и реализации и т.д., имеющей существенное значения для жизнедеятельности населения и функционирования промышленности;
- ◆ субъект финансово-хозяйственной деятельности — источник прибыли, возникающей в результате реализации товарной продукции;
- ◆ объект информатизации, обладающий информационными активами (как результат реализации определенного производственного процесса, в случае наличия таковых), информационными ресурсами, с помощью которых обеспечивается производственный процесс, и информационными ресурсами, с помощью которых управляется сам производственный объект;
- ◆ коллектив специалистов (трудовой коллектив), обеспечивающих решение производственных задач;



Рис. 2. Нормативно определенные аспекты рассмотрения объекта ТЭК.

- ♦ источник повышенной опасности а) для сотрудников предприятия, б) граждан, находящихся в зоне производственного объекта, в) искусственных сооружений, находящихся в зоне производственного объекта, г) окружающей среды.

Каждому аспекту объекта ТЭК в соответствии может быть поставлено ключевое понятие его рассмотрения, нормативный документ, определяющий данное рассмотрение, пример данных, подтверждающий наличие угроз, связанных с данным аспектом. Необходимо отметить, что угрозы могут рассматриваться на макроуровне, когда они актуальны для всех объектов, имеющих выделенные особенности, и на микроуровне, по отношению к конкретному объекту. Для обобщения все примеры угроз сведены в таблицу (Таблица 1). Можно полагать, что данная таблица отражает актуальное на текущий момент понимание комплексной безопасности объектов ТЭК.

Обращаем внимание читателей на то, что однозначно определенными в данной таблице являются аспекты рассмотрения объекта ТЭК. Остальные данные носят характер примеров и могут быть дополнены.

Специалистами не раз было отмечено, что вопросы промышленной безопасности, противопожарной безопасности и безопасности по чрезвычайным ситуациям достаточно сильно коррелируют между собой. Вместе с тем, разделение данных вопросов обусловлено распределением ответственности и надзорных функций между различными ведомствами, что и подчеркнуто в приведенной таблице.

Необходимо отметить, что источник угроз может носить либо техногенный, либо антропогенный характер. Выделение антропогенного источника угроз позволяет разделить инициирование угроз на умышленное и неумышленное.

Парирование угроз, в соответствии с общей теорией безопасности, реализуется через:

- ◆ выявление угроз;
- ◆ предупреждение угрозы до момента ее реализации;
- ◆ пресечение угрозы в стадии реализации;
- ◆ ликвидация последствий реализации угроз.

Описание объекта ТЭК как социотехнической системы, обладающей элементами и связями, было введено из-за наличия гибридных угроз, когда угроза, возникающая в одной области, реализуется в другой. Пример отрицательного воздействия на производственный

процесс через компьютерную атаку на АСУ ТП был приведен выше. В общей теории безопасности существует принцип равномогности рубежей защиты, в соответствии с которым организация комплексной системы безопасности не допускает наличия «слабых мест» или отсутствия защитных мер, противостоящих выявленным угрозам.

На текущий момент теория противодействия гибридным угрозам отсутствует. Представляется, что определение комплексной безопасности, в данном случае объектов ТЭК, является первым шагом в данном направлении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стратегия национальной безопасности Российской Федерации. Утв. Указом Президента Российской Федерации от 31 декабря 2015 г. № 683 [Электронный ресурс].— Официальный сайт Президента России. Режим доступа: <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/18iXkR8XLAtxeilX7JK3XHy6Y0AsHD5v.pdf> (дата обращения: 06.01.2018)
2. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2030 года Утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 г. № 1715-р [Электронный ресурс].— Официальный сайт Министерства энергетики РФ. Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (дата обращения: 10.01.2018)
3. Спицына Т. А. Безопасность объектов топливно-энергетического комплекса в системе национальной безопасности российской федерации // Вестник Саратовской государственной юридической академии. № 6. 2017. С. 150–156
4. Федеральный закон от 21.07.2011 г. № 256-ФЗ «О безопасности объектов топливно-энергетического комплекса» [Электронный ресурс].— Гарант. Режим доступа: <https://base.garant.ru/12188188/> (дата обращения: 11.01.2018)
5. Приказ Министерства энергетики РФ от 13 декабря 2011 г. N587 «Об утверждении перечня работ, непосредственно связанных с обеспечением безопасности объектов топливно-энергетического комплекса» [Электронный ресурс].— Гарант. Режим доступа: <https://base.garant.ru/70132916/> (дата обращения: 11.01.2018)
6. Постановление Правительства Российской Федерации от 5 мая 2012 г. № 458 «Об утверждении Правил по обеспечению безопасности и антитеррористической защищенности объектов топливно-энергетического комплекса» [Электронный ресурс].— Техническая библиотека GIS Profi. Режим доступа: <https://gisprofi.com/gd/documents/postanovlenie-pravitelstva-rf-ot-05-05-2012-n-458-ob-utverzhenii-pravil.html> (дата обращения: 15.01.2018)
7. Постановление Правительства Российской Федерации от 5 мая 2012 г. № 458 «Об утверждении Правил по обеспечению безопасности и антитеррористической защищенности объектов топливно-энергетического комплекса» [Электронный ресурс].— Консультант плюс. Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_150730/ (дата обращения: 15.01.2018)
8. Расторгуев С. П. Математические модели в информационном противоборстве (экзистенциальная математика).— М.: АНО ЦСОиП, 2014.
9. Дымова К. А. Особенности отраслевого регулирования условий труда работников топливно-энергетического комплекса: правовой аспект. Диссертация на соискание ученой степени кандидата юридических наук. МГЮА,— 2016.
10. Ничиков А. В. Перечень угроз: от общего к частному // Системы безопасности.— № 2, 2008.— стр. 230–235.
11. Самарин И. В. Государственно-частное партнерство в оборонно-промышленном комплексе: перспективы и проблемы // Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки.— № 5, 2014.— стр. 178–182.
12. Топольский Н. Г., Самарин И. В., Строгонов А. Ю. Методика оценки эффективности управления мероприятиями пожарной безопасности на объектах топливно-энергетического комплекса в составе автоматизированной системы поддержки управления // Пожаровзрывобезопасность (ISSN0869–7493) Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety, 2018;27(12):19–26. <https://doi.org/10.18322/PVB.2018.27.12.19-26/>
13. Самарин И. В., Фомин А. Н. Стратегическое государственное планирование: автоматизация процесса оценки рациональных уровней финансирования национальной обороны // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки», -2018,— № 6, -С. 136–144

© Гриняев Сергей Николаевич, Правиков Дмитрий Игоревич,

Медведев Дмитрий Андреевич (Medvedev.d@gubkin.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МОДЕЛИ ИНФОРМАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ СОЦИОТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

PERSPECTIVE MODELS OF INFORMATION MANAGEMENT BY SOCIOTECHNICAL SYSTEMS

**S. Grinyaev
R. Grishenin
D. Pravikov**

Summary. The paper demonstrates one of the possibilities of modeling the management of social engineering systems. It is noted that the current state of the study of this problem is characterized, on the one hand, by the presence of a sufficient number of heterogeneous models that describe the dissemination of information in social networks. On the other hand, the practice of organizing protests with the use of various dynamically developing Internet services is continuously implemented, which affects the adequacy of the previously developed models. As a result, today it is impossible to state unequivocally that within the framework of one theory the mechanism of information impact has been worked out in detail and described, which would allow to scientifically describe and consistently link the activity of information dissemination using various Internet services with the global stability of the existence of the state, society and other social structures.

Keywords: Social engineering system, management, information impact, information war, conflict management, social networks, information impact assessment.

События, происходящие в разных странах мира в течение последних двух десятков лет, показали возможность информационного воздействия на общество с последующей реализацией различных сценариев, получивших обобщенное название «цветных революций». Данная проблема была отмечена и описана, в основном, с гуманитарной точки зрения, например в [1], как феномен ведущегося информационного противоборства и геополитической конкуренции.

В качестве естественнонаучной основы такого информационного воздействия рассматривается теория информационного управления, основы которой изложены, в частности в [2]. Интересно отметить тот факт, что обсуждение механизмов информационного воздействия в последнее время отмечается и в научно-популярных источниках: так, на сайте «Хабр» размещена статья «Программирование общества»¹, что

¹ <https://habr.com/ru/post/439538/>

Гриняев Сергей Николаевич

Д.т.н., с.н.с., РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина

Гришенин Роман Николаевич

Заместитель исполнительного директора, Фонд поддержки публичной дипломатии имени А. М. Горчакова (Москва)

Правиков Дмитрий Игоревич

*К.т.н., РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина
dip@gubkin.pro*

Аннотация. В работе продемонстрирована одна из возможностей моделирования управления социотехническими системами. Отмечено, что современное состояние изучения данной проблемы характеризуется, с одной стороны, наличием достаточно количества разнородных моделей, которые описывают распространение информации в социальных сетях. С другой стороны, непрерывно реализуется практика организации протестных выступлений с использованием различных динамично развивающихся сервисов сети Интернет, влияющая на адекватность разработанных ранее моделей. В результате на сегодняшний день нельзя однозначно утверждать, что в рамках одной теории детально проработан и описан механизм информационного воздействия, который позволил бы научно описать и последовательно связать активность распространения информации, использующего различные сервисы сети Интернет, с глобальной устойчивостью существования государства, общества и иных социальных структур.

Ключевые слова: Социотехническая система, управление, информационное воздействие, информационная война, управление конфликтом, социальные сети, оценка информационного воздействия.

позволяет предполагать наличие дискуссии о возможности информационного управления обществом. В этой связи нельзя не процитировать Стивена Хокинга². «Поскольку люди живут во Вселенной и взаимодействуют с другими ее объектами, научный детерминизм должен быть также применим и к людям. Многие, однако, соглашаясь с тем, что научный детерминизм определяет течение физических процессов, хотели бы сделать исключения для поведения людей, основываясь на вере наличия у нас свободной воли». Разрешение данного противоречия на текущий момент видится в том, что отдельный индивидуум обладает свободой воли, но присоединяясь к социуму он ограничивает ее, добровольно принимая на себя ряд ограничений. Как следствие, данным механизмом можно управлять.

² Стивен Хокинг, Леонард Млодинов «Великий замысел» — М: Амфора, 2012, 208 с.

Современное состояние изучения данной проблемы характеризуется, с одной стороны, наличием достаточного количества разнородных моделей, которые, например [3], описывают распространение информации в социальных сетях. С другой стороны, непрерывно реализуется практика организации протестных выступлений с использованием различных динамично развивающихся сервисов сети Интернет, описанная, например, в [4], влияющая на адекватность разработанных ранее моделей. В результате на сегодняшний день нельзя однозначно утверждать, что в рамках одной теории детально проработан и описан механизм информационного воздействия, который позволил бы научно описать и последовательно связать активность распространения информации, использующего различные сервисы сети Интернет, с глобальной устойчивостью существования государства, общества и иных социальных структур. Так, попытки построения подобной теории предпринимались, в частности, в [5], но в рамках данной работы не были, в частности, описаны закономерности связи информационного воздействия с результирующим состоянием целевой системы.

Для решения этой актуальной научно-практической задачи было предложено выделить ряд перспективных моделей (теорий), применение которых позволит обеспечить формирование целостной картины механизмов информационного управления. Критерием выбора модели (теории) являлось использование единого (коррелирующего) понятийного аппарата, описание проблемы на своем определенном уровне абстракции, возможность взаимного дополнения моделей (теорий) на смежных уровнях, возможность использования выводов и результатов, полученных на одном уровне, в качестве исходных данных на другом.

В результате проведенного анализа в качестве перспективных моделей (теорий) рассмотрены:

- ◆ Теория самоподавления социотехнической системы (С.П. Расторгуев);
- ◆ Сценарный анализ устойчивости социотехнической системы (ИПУ РАН);
- ◆ Модель информационного воздействия посредством доведения текста (ИПУ РАН, МГТУ им. Н.Э. Баумана);
- ◆ Модель распространения информации (РГУНГ им. И.М. Губкина);
- ◆ Модель семантического ядра понятий (МГТУ им. Н.Э. Баумана);
- ◆ Перколяционная модель социотехнической системы (ИКБиСП РТУ);
- ◆ Модель информационного управления аргументацией (ИПУ РАН);
- ◆ Меметическая теория (АВН).

С определенной долей общности можно утверждать, что общей для всех моделей (теорий) стержневой идеей является принцип информационного управления, при этом в качестве объекта управления рассматривается социотехническая система.

В соответствии с существующими подходами *социотехнические системы* — гетерогенные комплексы, включающие в себя как социальные, так и технические элементы, с погруженностью последних в политические, экономические, нормативно-правовые, ценностные, идеологические и иные контексты.

Социотехническая система образована следующими подсистемами:

1. Техническая подсистема включает устройства, инструменты и технологии, преобразующие вход в выход способом, который улучшает экономическую эффективность организации.
2. Социальная подсистема включает занятых в организации служащих (знания, умения, настрой, ценностные установки, отношение к выполняемым функциям), управленческую структуру, систему поощрений.

Социотехническая система является абстракцией, с помощью которой наиболее часто (см. [5]) описывают современное государство в условиях информационного воздействия. Также существуют различные подходы и инструментарию отслеживания распространения информации в сети Интернет, с помощью которых решаются частные задачи выявления попыток воздействия на информационную сферу, но, как было отмечено ранее, не существует научно обоснованной модели механизма информационного воздействия.

Рассмотрим вышеперечисленные модели (теории) более подробно.

В качестве базовой теории комплекса перспективных моделей за основу был выбран подход С.П. Расторгуева, который рассматривал любую, в том числе социотехническую систему как совокупность элементов и связей между ними: $E = s + n$.

Основной тезис его теоретических построений заключается в том, что в результате информационного воздействия систему можно обучить перевести в режим самоподавления (самоограничения) [6]. Вместе с тем, сам механизм самоподавления в его работах не рассматривался.

Детализацию описания социотехнической системы предлагается провести с использованием инструментарию сценарного анализа, разработанного в ИПУ

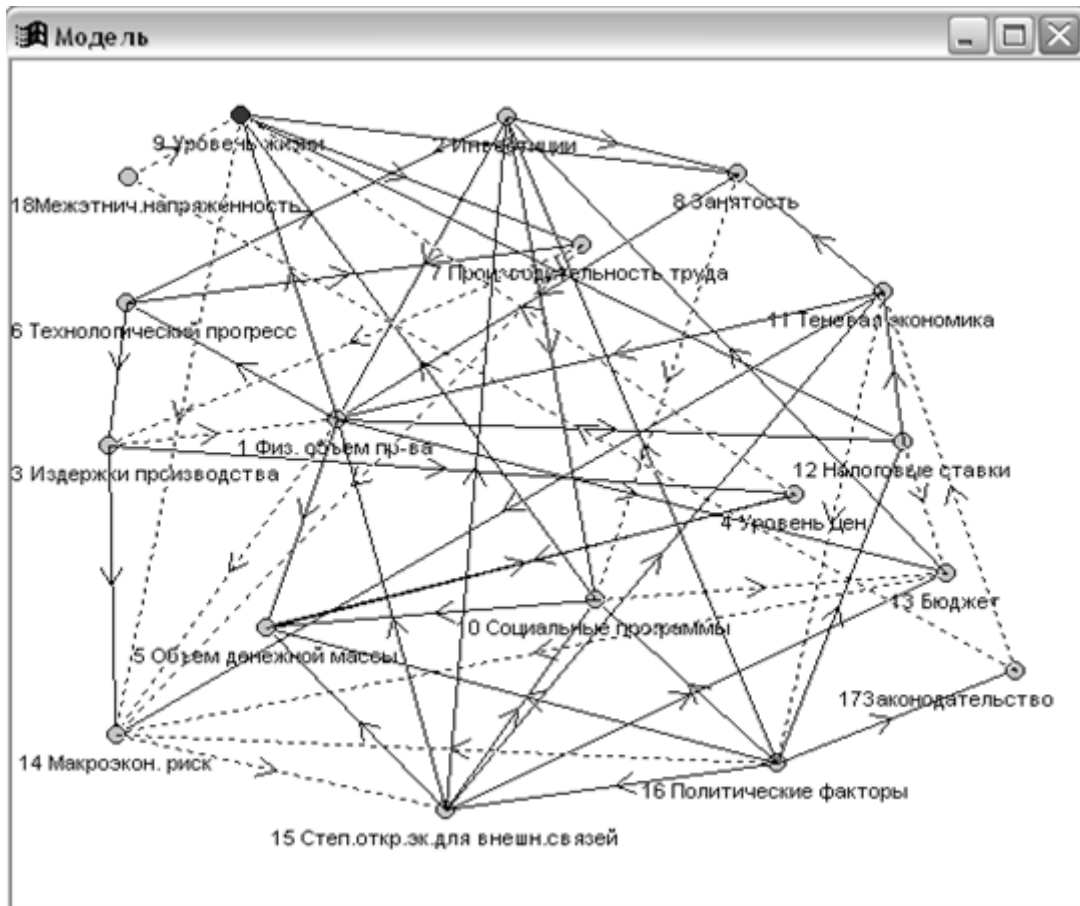


Рис. 1 Пример модели социотехнической системы.

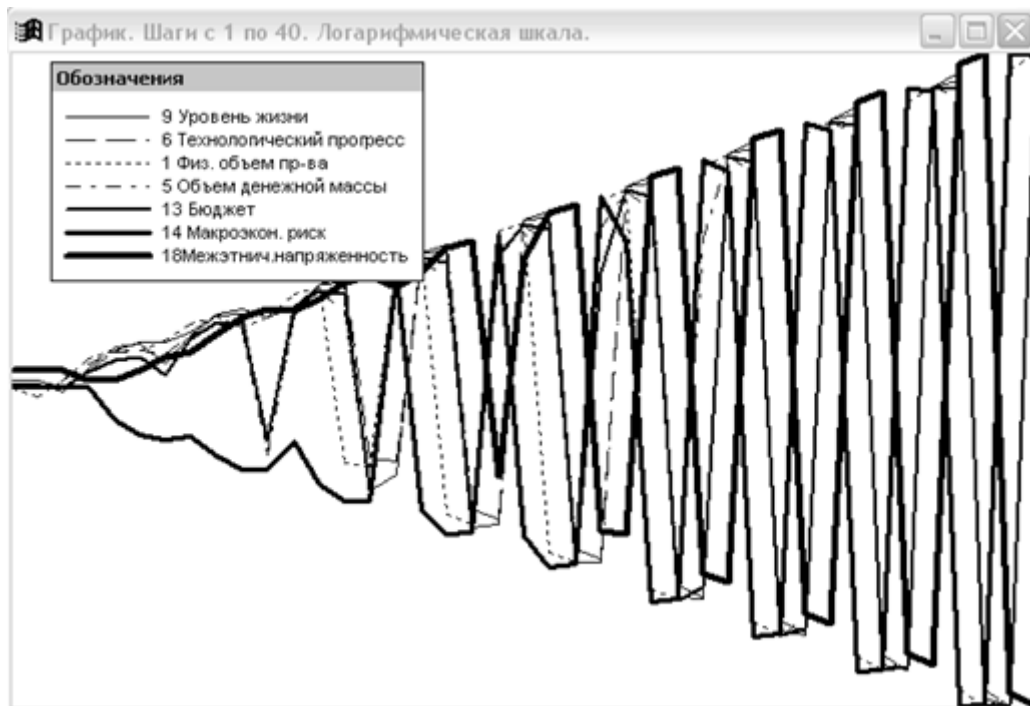


Рис. 2. Результат моделирования устойчивости системы.

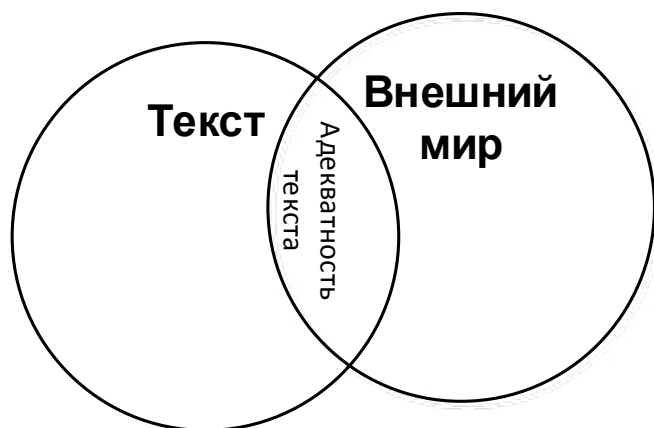


Рис. 3. Адекватность текста внешнему миру.

РАН. Моделирование с использованием данного инструментария позволяет судить о наиболее вероятных и целесообразных направлениях развития динамических процессов, их устойчивости, других желательных и нежелательных свойствах для оперирующей стороны по информации о структурных особенностях исследуемой системы.

Специалистами ИПУ РАН с использованием разработанного инструмента был проведен анализ различных сложных социотехнических систем, в частности Союзного государства Сербия и Черногория [7]. Показано, что общее состояние системы описывается с помощью ряда факторов, таких как «налоговые ставки», «издержки производства» и т.п. На модели показано, что воздействие на отдельные факторы (увеличение/уменьшение) может приводить к дестабилизации всей системы и сценарное моделирование позволяет выделить перечень указанных факторов.

Данный подход меняет понимание свойств информационной безопасности сложных систем. Представляется, что основным свойством сложной социотехнической системы будет способность противостоять негативным воздействиям, независимо от их природы, сохраняя параметры и качество управления. Как следствие, свойство защищенности или безопасности социотехнической системы определяется через способность противодействия угрозам дестабилизации или её перепрограммирования.

С другой стороны, анализ предложенной модели показывает, что для моделей, описывающих современное государство, часть факторов не параметризуется и может быть отнесена к феноменам коллективного сознания. В частности, к таким факторам относится «уровень жизни», понимаемый в обыденной жизни больше на ка-

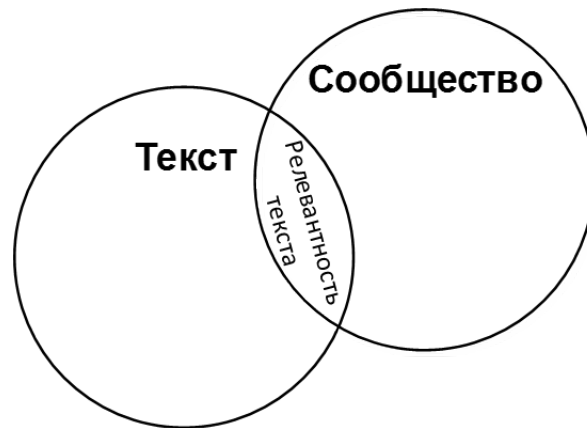


Рис. 4. Релевантность текста интересам реципиентов

чественном уровне. Как следствие, модель позволяет найти факторы, связанные с коллективным сознанием, воздействие на которые может дестабилизировать ситуацию.

В настоящей работе рассматривается подход, в котором в качестве объекта управления предлагается использовать не структуру социальной группы, а те цели, идеи, представления, аргументацию, которые являются критическими для восприятия членами общества. Таким образом, в качестве модели объекта управления выбирается информационная формализация группы или, говоря в терминах настоящей статьи, факторы, связанные с коллективным сознанием. Самоуправление переходит в информационную сферу.

Необходимо отметить, что в последнее время организация массовых выступлений под лозунгом ухудшения качества жизни является четко выраженным геополитическим трендом. В качестве примера можно привести серию антиправительственных выступлений, прошедших в Иране в декабре 2017 года — январе 2018. Начавшись как социальные протесты против повышения цен на продукты питания, демонстрации быстро приобрели политический характер, протестующие выступили в них против руководства исламской республики.

Модель информационного воздействия посредством доведения текста подразумевает формирование текста, обеспечивающего его восприятие и усвоение целевой аудиторией. Вводятся понятия модели текста, модели внешнего мира и модели реципиентов, содержащие, если говорить в общем виде, некие существенные элементы.

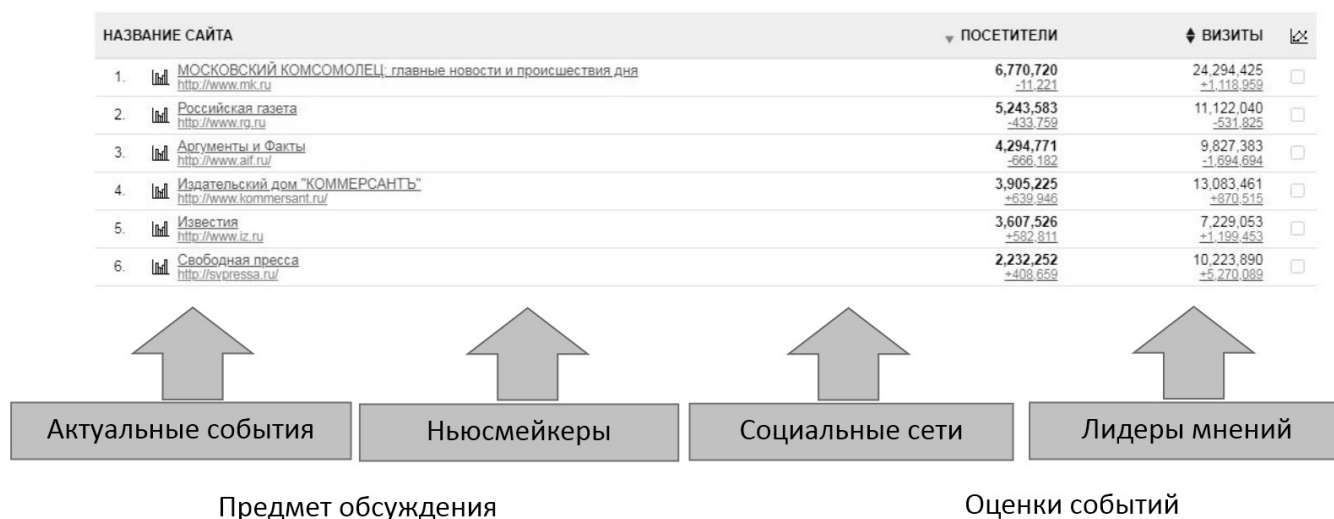


Рис. 5. Основа для формирования материалов в СМИ

Рассмотрим общие параметры контента текста. Существенными параметрами контента являются его объем, адекватность и релевантность.

Адекватность текста — это степень пересечения информационных моделей текста и внешнего мира (рис. 3). Только текст адекватный или актуальный текущей ситуации может вызвать интерес членов сообществ и, как следствие изменение их коллективного сознания.

Релевантность текста — это степень пересечение информационных моделей текста и сообщества (рис. 2). Если текст не соответствует интересам сообществ, он или не воспримется вообще или, если он противоречит интересам сообществ, может вызвать отрицательную реакцию вплоть до проведения экстремистских акций.

Таким образом, данная модель обосновывает возможность влияния на целевые сообщества путем доведения текстовой информации.

Для выбора методов оценки информационного воздействия на общество сформирована обобщенная модель распространения информации в сети Интернет, которая предполагает отбор информации, генерируемый рядовыми пользователями на своих личных ресурсах, и наиболее удачно отражающей, по мнению читателей, злободневные темы, для ее дальнейшего тиражирования. Информация, которая как считается, отражает информационные запросы большинства потребителей, размещается в СМИ. Отобранные материалы доводятся до более широкого круга читателей.

Исходя из предложенного на рис. 5 подхода, имеем двухступенчатую схему формирования и фиксации мнения: сначала мнение вырабатывается в различных социальных группах, находит свое отражение в социальных сетях и у лидеров мнений, а затем оно переходит в СМИ, которые обозначают его как выражение большинства заинтересованных лиц. Фиксация мнения в СМИ, в свою очередь, позволяет добавить для него дополнительных сторонников за счет колеблющейся или неопределенной части социума.

Проблема заключается в том, что большинство факторов моделей сложных социотехнических (социоэкономических) систем с понятийной точки зрения являются сложными объектами, практически не используемыми в обыденном сознании. Так, например, словосочетание «уровень жизни», как можно видеть из рис. 6, практически не находит отражение в материалах, опубликованных за месяц и проиндексированных Яндексом, а значит оно выражается через другие семантические единицы. Проведенные исследования подтвердили выдвинутую версию.

Получение указанного семантического ядра рассматривалось в других работах [8], здесь же исследовалось предположение, что степень внимания пользователей к тем или иным темам в сети Интернет пропорциональна мнению, существующему в обществе.

В качестве инструмента измерения был выбран сайт Mediametrics, позволяющий проранжировать популярность статей в сетевых СМИ на основании количества переходов из социальных сетей. Другими словами данный инструмент показывает степень внимания к той или

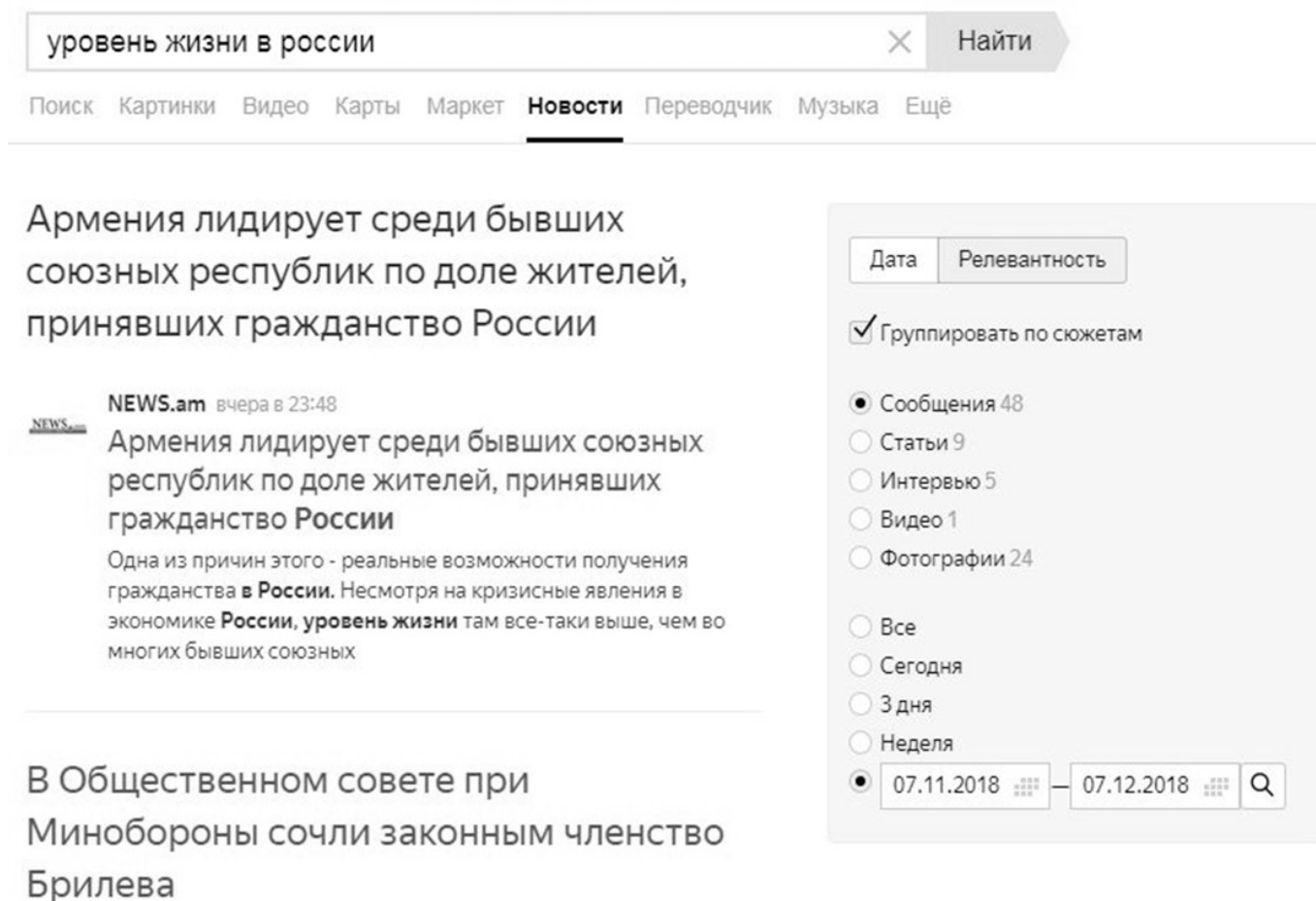


Рис. 6. Статистика отражения термина «уровень жизни в России».

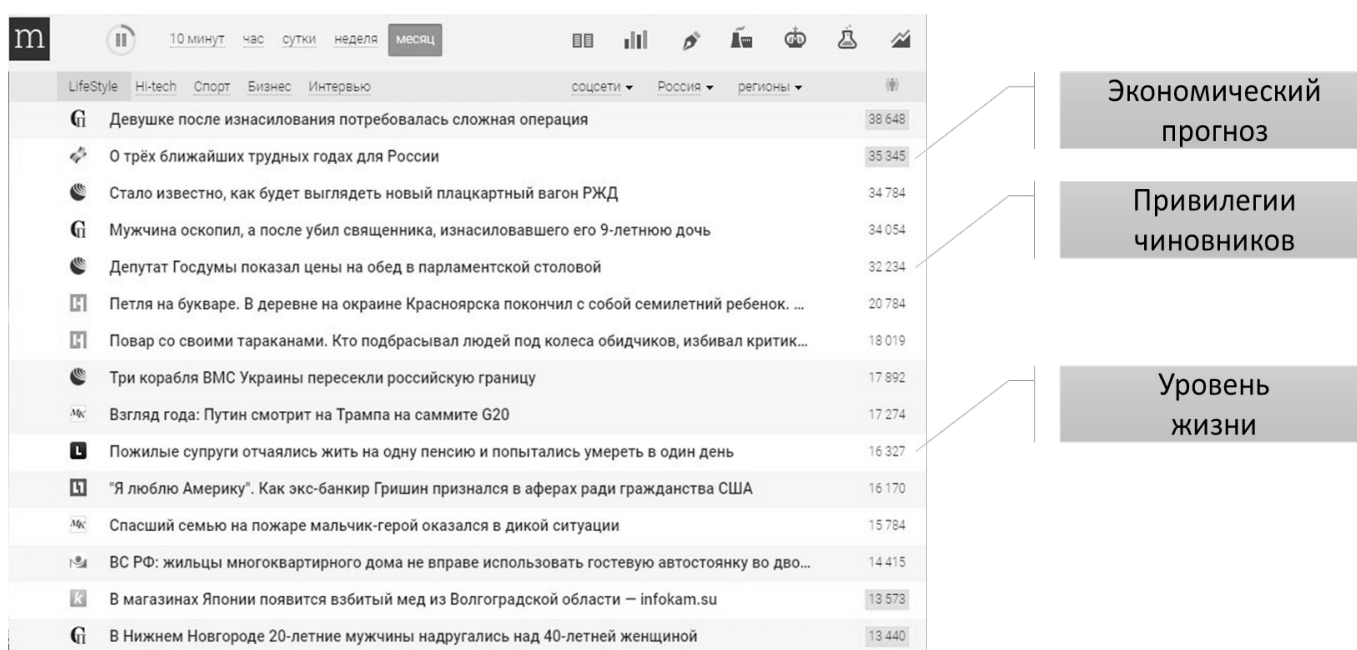


Рис. 7. Оценка актуальности тем в общем списке популярных статей за месяц.

иной проблеме у активных пользователей сетевых сервисов. В качестве тестового рассматривался временной период с 7.11 по 7.12~<2018 года.

Проведенная оценка содержания заголовков показала, что на десятом месте общего списка находится статья «Пожилые супруги отчаялись жить на одну пенсию и попытались умереть в один день», не только посвященная рассмотрению вопроса уровня жизни, но и уже задающего коннотацию его рассмотрения.

Если взять отношение количества переходов к данной статье и соотнести с количеством переходов на самую популярную статью, то можно отметить, что оно составит примерно 42%. Данный показатель интересно сравнить с результатами опросов «Левада-центра», опубликованного в газете «Коммерсант» 13 декабря 2018 г.: «Массовые выступления населения против падения уровня жизни и в защиту своих прав считают маловероятными 59% респондентов, возможными — 37%...

Опрос проводился 22–28 ноября методом личного интервью. В нем участвовали 1,6 тыс. человек старше 18 лет.»

Обратите внимание, что выступления против падения уровня жизни маловероятны для 59%, соответственно возможными в той или иной степени выступления считают около 41%, что приблизительно совпадает с показателями Mediametrics. Не исключено, что для других факторов в другие временные диапазоны данное значение может существенно отличаться, но даже без проведения дополнительных исследований данный результат можно считать не случайным.

Еще одним результатом исследования можно считать первое место статьи «Девушке после изнасилования потребовалась сложная операция». Несмотря на то, что в рассматриваемый период тема сексуального насилия впрямую не выходила на первые полосы сетевых изданий, такое внимание со стороны сетевых пользователей

свидетельствует о воздействии, которая информационная компания #metoo оказала на сознание членов российского общества. Интересным совпадением можно считать количество переходов на статью и количество женщин, в 2017 г. сразу поддержавших данный хештег (38 тыс.).

Вместе с тем, вышеописанная модель дает оценку относительного количества пользователей сети Интернет, для которых тема уровня жизни представляет интерес. На вопрос, достаточно ли относительного и абсолютного количества сторонников идеи для обеспечения ее доминирования в общественном сознании отвечают перколяционные модели.

Постановка задачи теории перколяции. Имеется решетка связей или матрица, случайная часть ячеек которых K «черная», а остальная — «белая», не проводящая поток. Необходимо найти минимальную концентрацию «черных» ячеек, при котором имеется сквозной путь по «черным» связям через всю матрицу в заданном направлении, иными словами такую концентрацию K_p , при котором вся матрица в целом будет проводить поток. Дополнение: при информационном воздействии ячейки могут «перекрашиваться». Если представить сложную социотехническую систему в виде множества акторов, то с помощью теории перколяции можно определить критическое количество сторонников целевой идеи.

Современное государство и общество можно представить в виде сложной социотехнической (социальной) системы. В настоящей работе рассматривался комплекс методов выявления, описания и оценки информационного воздействия, осуществляемого с использованием сервисов сети Интернет, позволяющего оценить устойчивость сложных социотехнических систем. Показано, что предложенный комплекс является взаимосвязанным и позволяет оценить степень или возможность реализации заданного по отношению к целевому социуму информационного управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фролов Д. Б., Грунюшкина С. А., Старостин А. В. Информационная геополитика и сеть Интернет: монография / Под общ. ред. Д. Б. Фролова. — М.: РФК Имидж Лаб, 2008–404с.
2. Кульба В.В., Малюгин В. Д., Шубин А. Н., Вус М. А. Введение в информационное управление: учебно-методическое издание. — СПб.: Изд-во С.-Петербургского университета, 1999 г. — 116 с.
3. Губанов Д.А., Новиков Д. А., Чхартишвили А. Г. Социальные сети: модели информационного влияния, управления и противоборства / Под ред. член-корр. РАН Д. А. Новикова — М.: Издательство физико-математической литературы, 2010–228 с.
4. Бартлетт Джейми. Подпольный интернет: Темная сторона мировой паутины. — М.: Эксмо, 2017. — 352 с.
5. Расторгуев С.П., Литвиненко М. В. Информационные операции в сети Интернет / Под общ. ред. А. Б. Михайловского. — М.: АНО ЦСОиП, 2014. — 128 с.
6. Расторгуев С.П. Математические модели в информационном противоборстве. Экзистенциальная математика. — М.: АНО ЦСОиП, 2014–260 с.

7. Кульба В.В., Кононов Д. А., Чернов И. В., Янич С. С. Сценарии управления государством (на примере Союза Сербии и Черногории) // Проблемы управления. № 5, 2005. С. 33–42.
8. Сычев М.П., Астрахов А. В., Правиков Д. И., Тягунков О. И. Применение методов кластеризации для анализа неиндексируемых Интернет-ресурсов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 2 (14). С. 8.
9. Самарин И. В. Алгоритм мониторинга пожаровзрывобезопасности в АСУП на объектах топливно-энергетического комплекса с применением методов стратегического планирования // Естественные и технические науки (ISSN1684–2626). № 12, стр. 368–375

© Гриняев Сергей Николаевич, Гришенин Роман Николаевич, Правиков Дмитрий Игоревич (dip@gubkin.pro).
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

БИОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ В ПАРАМЕТРАХ РЕЧЕПОДОБНЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ АУТЕНТИФИКАЦИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ В СИСТЕМАХ ГОЛОСОВОГО ВВОДА И УПРАВЛЕНИЯ

Дворянкин Сергей Владимирович

Д.т.н., профессор, РГУ нефти и газа (НИУ) имени

И. М. Губкина

s_dvrn@mail.ru

Дворянкин Никита Сергеевич

Аспирант, Национальный исследовательский ядерный

университет «МИФИ»

nik.dvrn@gmail.com

BIOMETRIC FEATURES IN THE SETTINGS OF THE SPEECH-LIKELY SIGNALS FOR USER AUTHENTICATION IN VOICE DRIVING SYSTEMS

S. Dvoryankin

N. Dvoryankin

Summary. Voice communications have been and remain one of the most common and convenient ways of human communication and remote human-machine interface. In recent years, there have been many reports of the successful creation and application of computer technology of speech cloning, with which you can successfully attack the system of speech control and automatic speech recognition, built-in information systems for various purposes. In this regard, the creation of methods for modeling speech-like signals with specified properties, used as specific audio markers, to confirm the authenticity of speech commands and messages is very important. Moreover, often in the process of remote interaction requires confirmation of the presence of a particular live subscriber with the verification of his authority, and not a robot acting in his place. The paper shows the possibility of using as identification audio markers, biometric characteristics of the legitimate user of protected resources, which in the form of graphic information (images) can be inserted into the spectral-time parameters of speech-like signals transmitted together with the passphrase (voice-key) via speech communication channels during the negotiations of the user with the employee of the company, providing remote access to the protected resource.

Keywords: speech information protection, image analysis-synthesis, speech signal, binarization of spectrogram images, short-term Fourier transform.

Аннотация. Голосовые коммуникации были и остаются одним из распространенных и удобных способов человеческого общения и удаленного человеко-машинного интерфейса. В последнее время появилось много сообщений об успешном создании и применении компьютерных технологий речевого клонирования, с помощью которых можно успешно атаковать системы речевого управления и автоматического распознавания речи, встроенные в информационные системы различного назначения. В этой связи создание методов моделирования речеподобных сигналов с заданными свойствами, используемых как специфические аудиомаркеры, для подтверждения подлинности речевых команд и сообщений представляется весьма актуальным. Более того, часто в самом процессе удаленного взаимодействия требуется подтверждение присутствия конкретного живого абонента с верификацией его полномочий, а не робота, выступающего вместо него. В работе показана возможность использования в качестве идентификационных аудиомаркеров, биометрических признаков легитимного пользователя защищаемых ресурсов, которые в виде графической информации (образов) могут быть вставлены в спектрально-временные параметры речеподобных сигналов, передаваемым вместе с парольной фразой (словом) по голосовым каналам связи во время ведения переговоров пользователя с сотрудником компании, предоставляющим дистанционный доступ к защищенному ресурсу.

Ключевые слова: защита речевой информации, образный анализ-синтез, речевой сигнал, бинаризация изображений спектрограмм, кратковременное преобразование Фурье.

Введение

На сегодняшний день существует достаточно широкий набор методов и средств обработки и защиты значимой акустической (речевой) информации от НСД. В зависимости от требований безопасности и условий применимости используют тот или иной способ или их комбинации [1].

Отдельного внимания исследователей заслуживает технология образного анализа-синтеза (ОАС) акустических и речевых сигналов (РС) как оригинальная база моде-

лирования существующих способов защиты и обработки акустической речевой информации (РИ) с возможностью оценки эффективности их работы, так и как платформа создания и использования ранее не применявшихся способов речепреобразования для их реализации в различных перспективных системах голосового управления, безопасности и связи, в которых циркулирует РИ [2–4].

Суть указанной технологии ОАС или по-другому технологии «звук-изображение-звук» состоит в преобразовании звукового или речевого сигнала в изображение узкополосной спектрограммы с применением к нему

развитых эффективных методов цифровой обработки изображений с последующим переходом от него к новой волновой форме звукового или речеподобного сигнала (РПС) с требуемыми характеристиками [2]. Понятно, что в таком случае на тех же базовых элементах и принципах можно реализовать «зеркальное» преобразование «изображение-звук-изображение», которое также может найти свое применение в указанных системах.

Исследованию возможностей ОАС изображений спектрограмм РС в различных областях применения: маскировании и скремблировании, аудио стеганографии, кодировании и компрессии речи, нейтрализации помех и искажений, идентификации говорящего и т.п. посвящено множество работ [2–4], в которых описаны различные варианты успешного применения технологии ОАС за счет реализации алгоритмов синтеза звуковых сигналов с требуемыми свойствами на основе заданного изображения спектрограммы. В качестве базовых в исследованиях использовались полутоновые (в уровнях серого цвета) изображения с достаточной информационной избыточностью.

В данной работе была сделана попытка оценить возможности прямого и обратного ОАС применительно к решению задач противодействия фальсификации голосовых команд и значимых речевых сообщений, их изменения и подмены клонами. Для достижения цели необходимо решение следующих задач: собственно обнаружения признаков подделки по анализу изображения спектрограмм РС и противодействия фальсификации посредством внедрения в РС специального PIN-кода, маскирование РС, маркирования защищаемого РС цифровыми водяными знаками (ЦВЗ) в виде буквенно-цифровых вставок, личных фото и подписи в спектрально-временных описаниях речевых команд и сообщений.

Особый интерес использования в качестве указанных ЦВЗ вызывает оценка возможности использования в их качестве биопризнакам легитимного пользователя путем преобразования их образов в спектрально-временные параметры речеподобного сигнала (РПС), имеющего основные характеристики подобные натуральной речи, что позволяет передавать РПС по всем существующим каналам речевой связи.

Усовершенствованная система
образного анализа-синтеза речевых
и речеподобных сигналов

Современная система анализа-синтеза речи с использованием свойств слухового восприятия (учета работы органов слуха, эффектов частотного и времен-

ного маскирования, психоакустики и др.) и контурного анализа узкополосных спектрограмм, соответствующая узкополосной модели РС, предложенной в разных вариациях в [1, 4], представлена на рис. 1.

Исходный РС можно рассматривать как выход линейной системы, представляющей характеристики речевого тракта при поступлении на нее сигнала возбуждения от голосовых связок. Согласно такому представлению процесса речеобразования формируемый РС при длительности анализируемого фрейма речи до 40 мс (оптимально 6–8 мс) может быть представлен как:

$$s(n) = \sum_{i=1}^L A_i e^{-\frac{n^2}{2\sigma}} \cos(\omega_i n + \varphi_i) + e(n) \quad (1)$$

где n — номер временного отсчета; L — количество значимых синусоид; A_i — амплитуда i -й синусоиды; ω_i — частота i -й синусоиды; φ_i — фаза i -й синусоиды, σ — эффективная ширина окна функции Гаусса, $e(n)$ — остаточный сигнал.

В таком виде исходный речевой сигнал можно рассматривать как суперпозицию синусоидальных узкополосных сигналов или вейвлетов Морле. Такое представление (1) можно распространить и на другие акустические сигналы.

В блоке анализа входной дискретизированный речевой сигнал $S(n)$, подвергаясь кратковременному преобразованию Фурье (КПФ), периодически от фрейма к фрейму взвешивается временным окном $W(n)$ (например, усеченным окном Гаусса или окном Хэмминга), вычисляется его спектр $|S(f)|$. На каждом спектральном срезе $|S(f)|$ осуществляется отбор пиков локальных максимумов главных синусоидальных компонент РС, наиболее подходящих с точки зрения наилучшего перцептуального качества синтезированной речи, её слухового восприятия.

На получаемом по развертке спектральных срезов изображении спектрограммы отрисовываются треки или контура этих пиков для каждой узкополосной составляющей (УС).

В блоке синтеза по положениям контуров выбранных пиков определяются частоты наиболее мощных синусоид, определяющих основное звучание РС, и их амплитуды. Оригинальные фазы синусоид определяются по действительной и мнимой компонентам спектра $S(f)$ на соответствующих найденных частотах или вычисляются искусственным путем [1, 4] по функции развития фазы, определяемой также по изображению (разверткам) амплитудного спектра $|S(f)|$ или изображению иного содержания.

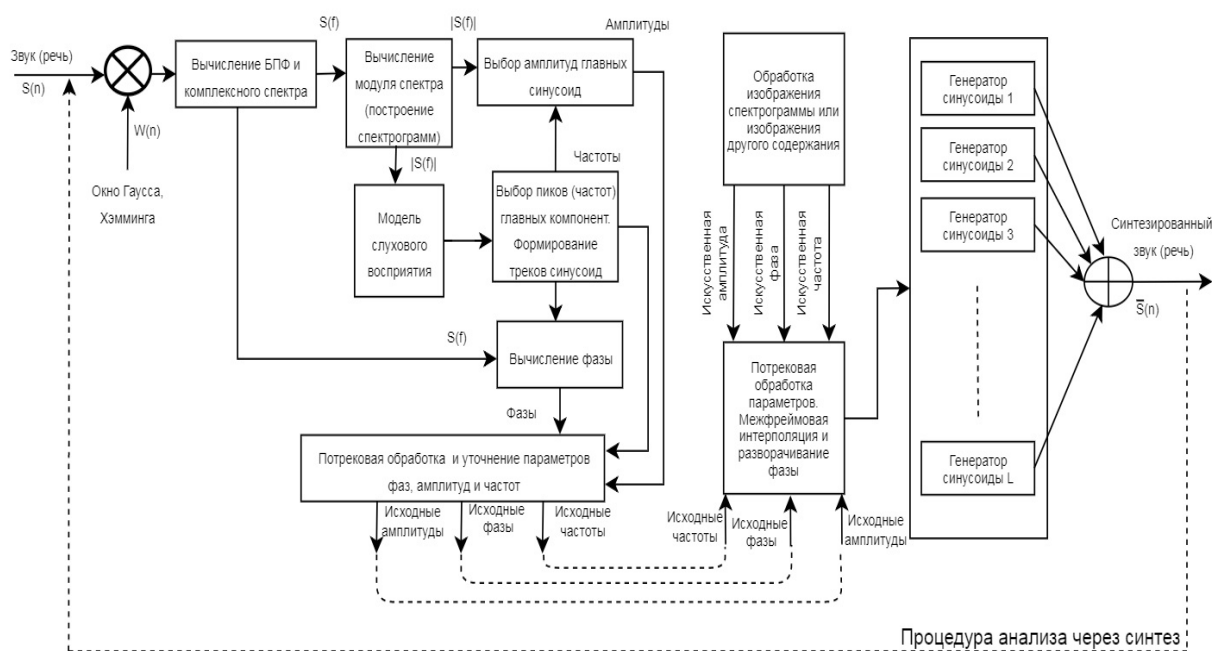


Рис. 1. Система образного анализа-синтеза речевого и речеподобного сигнала на основе узкополосной синусоидальной модели и свойств слуха.

(Fig.1. Image analysis and speech-likely signal synthesis system based on a sinusoidal narrowband model and hearing properties.)

Процесс синтеза новых речеподобных сигналов с заданными свойствами сводится либо к процедуре обратного КПФ для изменённого в зависимости от решаемой задачи спектрального среза с новым заданным пиковым подбором главных УС, либо к суммированию сгенерированных главных синусоидальных компонент с найденными для них в процессе анализа амплитудами, фазами и частотами (рис. 1).

При этом для получения в процессе синтеза приемлемого качества речи необходимо генерировать синусоиды, непрерывно изменяющиеся во времени. С этой целью применяется частотное упорядочивание синусоид и интерполяция их параметров от фрейма к фрейму [1, 4].

Система образного анализ-синтеза акустического (речевого) сигнала на основе синусоидальной узкополосной модели РС и учета свойств слуха, представленная на рис. 1, послужила основой для моделирования работы различных речепреобразующих устройств [2–4], когда на выходе анализирующей части системы (рис. 1) собирался ансамбль спектральных срезов модуля спектра (спектральные развертки), рассматриваемый в дальнейшем как изображение. На так получаемых графических образах РС определялись треки (линии) пиков локальных максимумов, по амплитудно-частотно-фазо-

вым параметрам которых в блоке синтеза (рис. 1) генерировался новый речеподобный сигнал в соответствии с заданным порядком модифицированной спектрограммой.

Если изображение корректно рассчитанной спектрограммы не менялось, то синтезированный по ней РС и по волновой форме, и по звучанию практически совпадал с исходным. Для реализации различных процедур аудимаркирования значимого РС, подлежащего защите от подделки, изображение участков его спектрограммы подвергалось необходимым для этого трансформациям.

Построение и анализ полутоновых изображений спектрограмм РС на основе КПФ производится в анализирующей левой части системы ОАС (рис. 1). Заметим, что на всех далее приведенных изображениях спектрограмм по оси абсцисс задается время, по оси ординат — частота. В уровнях серого цвета — мощность на данной частоте в данное время. Максимальная — чёрный цвет, минимальная — белый. Максимальная частота на оси абсцисс — 4 КГц, соответствовала половине частоты дискретизации РС в 8 КГц. Шаг анализа по времени, расстояние между столбцами спектральных срезов изображения спектрограммы — 8 мс.

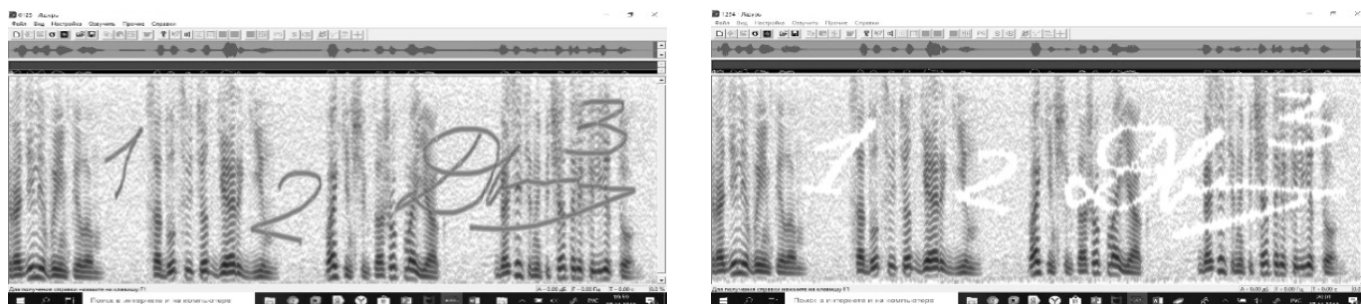


Рис. 2. Встраивание ЦВЗ в тело спектрограммы: а) «дорисовка» треков узкополосных составляющих; б) «продавливание» (стирание) треков с буквенно-цифровой и символической информацией.
 (Fig. 2. Embedding digital watermarks in the spectrogram body: a) “drawing” tracks of narrowband components; b) “pushing” (erasing) tracks with alphanumeric and symbolic information)

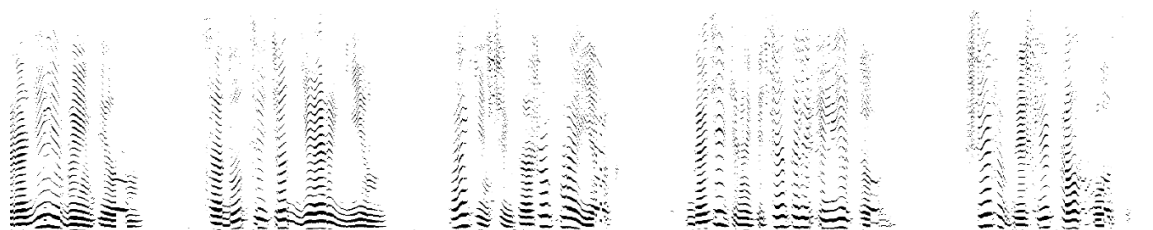


Рис. 3. Бинарное изображение спектрограммы речевого сигнала — бинарной речевой подписи.
 (Fig. 3. Binary image of the speech signal spectrogram — speech signature)

Методы аудиомаркирования биопризнаками значимой речевой информации

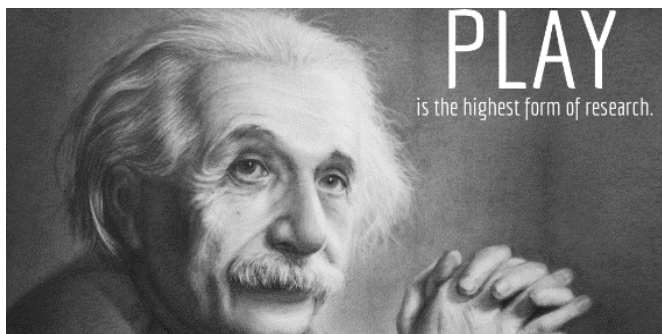
Как отмечалось, аудиомаркирование предполагает наличие в спектре значимого РС специального маркера или «цифрового водяного знака» (ЦВЗ), подтверждающего его связь именно с этим РС. Маркер проставляется на передающем конце канала голосовой связи во время отправки РС в паузах или в конце сообщения и выделяется для сравнения с записанным в кодовой книге уже при получении сообщения на приемном конце. Если сравнение происходит, значит РС не подвергся изменениям и подмене в процессе его передачи по каналам связи.

Возможно также встраивание ЦВЗ в тело спектрограммы значимого, подлежащего защите РС. Например, посредством «дорисовки» или стирания треков узкополосных составляющих, несущих буквенно-цифровую, символическую и иную информацию (см рис. 2).

Метод стирания оказался более эффективным поскольку его влияние на слуховое восприятие эксперта-аудитора практически не ощущалось. Дорисовка ЦВЗ, напротив, вносила мешающие восприятию свистки и помехи.

На основе использования системы ОАС (рис. 1) помимо метода внедрения в спектрограммы буквенно-цифровой информации (см рис. 2) были разработаны и исследованы следующие нижеперечисленные методы перевода образов биопризнаков в частотно-временные параметры речеподобных сигналов для «подписания» ими значимых РС в целях их защиты от модификаций и подмены. Это речь в виде бинарного образа в фоновых шумах в паузах или в конце значимого РС, бинарный образ отпечатка пальца, полутоновые или бинарные образы фото и рукописной подписи легитимного пользователя удаленного защищённого ресурса и др.

Действительно, помимо различных видов встраивания буквенно-цифровой и символической информации в полутоновые спектрограммы значимых РС, можно встраивать в паузные и шумовые участки собственно бинарные спектрограммы РС, используемые в качестве ЦВЗ. Заметим, что бинарные и полутоновые корректно рассчитанные спектрограммы, получаемые по технологии ОАС, несут равнозначную информацию о разборчивости, узнаваемости, естественности и громкости исходного РС, являются взаимно обратимыми: из одной всегда можно получить другую без потери информативности.



а)



б)

Рис. 4. Фотопортрет — а) и его реализация в виде спектральной развертки осциллограммы звука-носителя — б)
(Fig. 4. Photo — a), and its implementation in the form of a spectral scan of the sound carrier oscillogram — b))

Бинарную спектрограмму РС (см рис. 3) также можно «продавливать» в фоновом паузном шуме или на вокализованных участках полутоновых спектрально-временных описаний значимого РС, по аналогии действий с буквенно-цифровой и символьной информацией

Заметим, что бинарные спектрограммы РС и отпечатка пальца крайне похожи и используют практически одинаковые подходы к их обработке и защите методами ОАС.

Рассмотрим другие способы аудиомаркирования значимых РС биопризнаками легитимного пользователя.

Так на основе выше рассмотренных базовых элементов и принципах прямого ОАС можно реализовать его обратное «зеркальное» преобразование: «изображение-звук-изображение». Тогда изображение любого вида и содержания может быть преобразовано в звуковой речеподобный сигнал, спектрограмма которого будет похожа, например, на исходное фото, как это показано на рис. 4.

Звуковые сигналы со спектральными характеристиками в виде различных фотоснимков, образов могут найти своё применение в виде специфических аудиомаркеров, которыми можно, например, подтверждать, подлинность голосовых команд в системах речевого управления или доверенность среды передачи голосовых сообщений.

Аудиомаркеры можно использовать в системах голосовой аутентификации используя речеподобный сигнал с заданным селфи-фото, в качестве парольной фразы

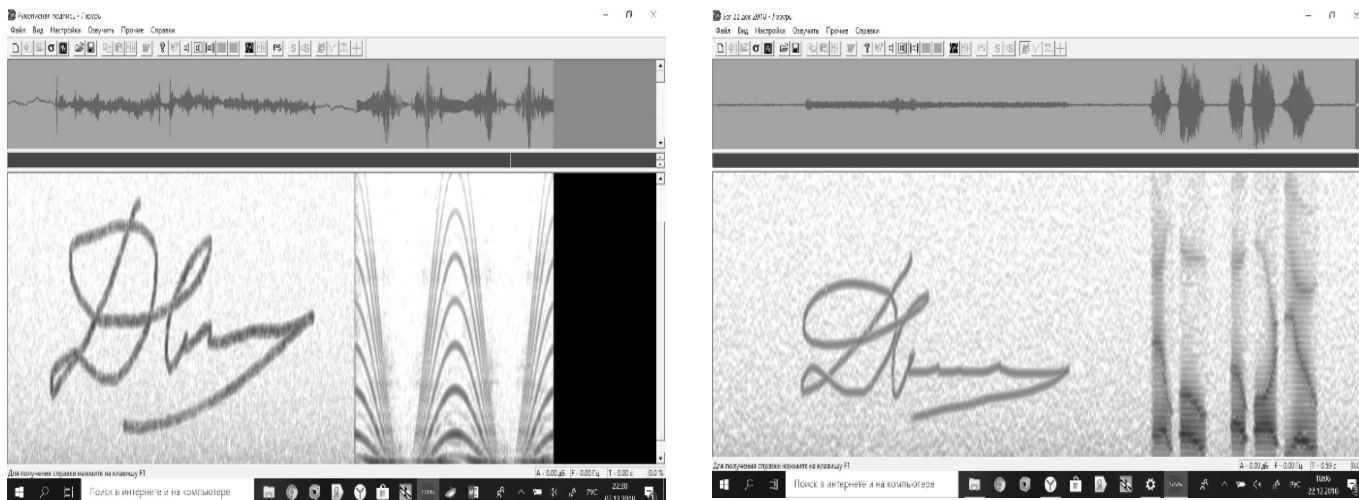
в процессе непрерываемого голосового общения с поставщиками необходимых мобильных услуг или call-центром.

Еще более интересные возможности открывает создание и применение в системах дистанционной аутентификации пользователя защищенного информационного ресурса речеподобного образа его рукописной подписи (рис. 5).

Причем в этом случае для сравнения с эталоном можно использовать не только статическое изображение самой рукописной подписи в спектре звука-носителя, но и динамические характеристики ее написания, сохраненные в виде изменений параметров частоты основного тона и количества формант в дополнительно создаваемом образе речеподобного сигнала, соответствующем движению пера (пальца) на экране смартфона.

Так, движение пера (пальца) на экране смартфона «вверх-вниз» изменяет частоту основного тона на спектрограмме синтезируемого речеподобного сигнала (РПС) от 100 до 250 Гц. Движение «слева-направо» соответствует двум формантам в спектре РПС с глобальными максимумами в области 200 и 500 Гц. Обратное движение — «справа-налево» характеризуется добавлением в спектральный образ РПС третьей форманты с глобальным максимумом в 1500 Гц.

Силе нажима на кончик пера в параметрах речеподобного сигнала будет соответствовать движение формант на спектрограмме РПС также сверху-вниз или снизу-вверх.



а)

б)

Рис. 5. Представление рукописной подписи в качестве спектрограммы речеподобного сигнала, его статических и динамических характеристик: а) в частоте основного тона; б) в количестве и направленности формант

(Fig. 5. Sonification of the handwritten signature as a spectrogram, static and dynamic characteristics of the speech-like signal: a) in the frequency of the pitch tone; b) in the quality and direction of the formants)

Такая техника сонификации рукописной подписи как типовой частный случай применения ОАС проста в реализации и весьма перспективна.

Наличие для взаимного сравнения трёх образов рукописной подписи: один, как эталон-образец создается при первоначальном личном присутствии пользователя в службах сервиса и безопасности, а два других определяются из статических и динамических характеристик спектра РПС, передаваемого по каналу связи, существенно повышают надежность аутентификации удаленного пользователя защищенного информационного ресурса.

РПС с образцами подписей также может рассматриваться как некая парольная фраза и тогда можно ещё усилить надежность аутентификации, добавив к существующим хорошо отработанным процедурам сравнения рукописных подписей такую же хорошо отработанную процедуру и решения голосового паролирования и сравнения от известных российских и зарубежных производителей.

Возможны и другие не менее интересные приложения обратного преобразования «изображение-звук-изображение». Например, совмещение в системах удаленной аутентификации одновременно сразу двух вышеописанных приложений инверсного ОАС: речеподобных фото лица или отпечатка пальца и самой подписи.

Заметим, что помимо способов аудиомаркирования значимых РС возможно также их асинхронное маскирование от перехвата, распознавания и использования в своих целях злоумышленником. Здесь следует упомянуть два основных способа, использующих технологию ОАС.

Первый — «понижение уровня информативного сигнала», предполагает, например, скрытие бинарных спектрограмм значимых РС в шумах и помехах канала связи с общим уровнем мощности смеси, не превышающей уровень шума — носителя.

Второй — «повышение уровня сопутствующих помех», предусматривает закрытие значимого РС мощной речеподобной помехой, формируемой либо от внешнего источника, либо из самого передаваемого РС.

На приемном конце получателя значимые РС с использованием технологии ОАС демаскируются и затем используются в процессах голосового распознавания, информирования и управления.

Заключение

Работа посвящена развитию уже хорошо зарекомендовавшей себя в решении задач защиты и обработки речевой информации технологии образного анализа-синтеза РС.

В рамках указанной технологии исследован подход защиты и установления подлинности значимых сообщений и голосовых команд, заключающийся во внедрении в них на передающем конце канала связи и извлечении на приемном конце идентификационных данных и цифровых водяных знаков (ЦВЗ) или аудиомаркеров, находящихся в спектрально-временных описаниях РС (изображениях их спектрограмм). Внедрение аудиомаркеров практически не искажает качественные характеристики защищаемого ими РС. Его разборчивость и узнаваемость остаются на прежнем уровне.

В качестве таких аудиомаркеров в исследовании применялись преобразованные в спектрально-временные параметры речеподобного сигнала биопризнаки легитимного пользователя (бинарное изображение речевой подписи, бинарные и полутоновые изображения отпечатка пальца, фото лица, рукописной подписи с динамическими характеристиками ее написания), что не влияло на качество слухового восприятия речевого сигнала контейнера.

Такие ЦВЗ, подтверждающие подлинность речевого сообщения или голосовой команды переведенные в спектрально-временные характеристики речеподобного сигнала, рекомендуется добавлять в конец защищаемого РС, чтобы не нарушать качество его звучания и разборчивость.

Также использовались буквенно-цифровые вставки в изображения спектрограмм РС, подлежащего защите с последующим по ним синтезом нового защищенного РС. Причем использование при начертании на изображениях спектрограмм стирающих «следы» РС вставок (инструмент «ластик») оказалось предпочтительнее для сохранения речевой разборчивости чем использование «вставок», добавляющих (инструмент «карандаш»). Звучание последних в синтезируемой смеси РС плюс ЦВЗ воспринималось как фоновый свист.

Заметим, что в принципе, в качестве ЦВЗ можно использовать изображение любого содержания, о котором осведомлены участники речевого обмена «человек-человек» и «человек-машина» и которое затем на приемном конце связи будет сравниваться с изображением, заранее занесенным в кодовую книгу и соответствующим данному РС или голосовой команде. По результатам сравнения таких ЦВЗ принимается решение о подлинности или нет защищаемого ими РС.

Использование рукописной речевой подписи в качестве маркирующего РПС видится наиболее предпочтительным среди других биопризнаков, используемых

в качестве ЦВЗ, поскольку в спектрально-временные описания РПС самой рукописной подписи могут быть вставлены ее статические (образ) и динамические (нажим, направление движения) характеристики. В результате РПС рукописной подписи может быть предъявлен к идентификационной проверке и как образец подписи и как уникальная специфическая парольная фраза, для которой уже применяются готовые решения для идентификации голосовых паролей. Таким образом, можно считать, что РПС рукописной подписи содержит в себе все необходимые данные для двухфакторной идентификации как защищаемого РС, так и самого пользователя а не его «аватара». Понятно, что такая идентификация обладает более высокой надежностью, чем просто парольная фраза (слово) и образец подписи по отдельности.

Также в качестве ЦВЗ рекомендуется использовать бинарные образы защищаемого РС, внедряемые в вокализованные, шумовые или в паузные участки его «тела» без нарушения РР.

Кроме использования в указанном приложении бинарные образы РС имеют большой потенциал для решения других задач защиты и обработки РС, в частности сжатия-восстановления, маскирования и др.

Так, помимо защиты собственно значимого РС от подмены, бинарные спектральные образы можно использовать для защиты бумажных и электронных документов от фальсификации и подделки, причем такие аудиомаркеры можно размещать на текстовом документе в явном и в скрытом виде, используя уже разработанные методы компьютерной стеганографии.

В традиционных приложениях компьютерной стеганографии бинарные изображения РС также могут оказаться предпочтительнее известных, поскольку их, например, гораздо проще встраивать в стегоконтейнеры по сравнению с полутоновыми и цветными изображениями разного содержания.

Бинарные образы РС также могут быть использованы в виде оригинальных цифровых водяных знаков для охраны авторских прав на аудиовизуальную и печатную продукцию.

На основе бинарного ОАС, реализуя сжатие речи через сжатие образов, возможно создание широкодиапазонного помехоустойчивого аудиокодека, работающего на скоростях от 1 до 64 Кбод с плавной адаптацией к пропускной способности канала связи. С учетом использования голосовой базы данных конкретного диктора можно достичь нижней границы в 400–600 бум/с, приближаясь вплотную к теоретическому пределу — 70 бум/с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дворянkin С. В. Речевая подпись. М.: РИО МТУСИ. 2003. 184 с.
2. Дворянkin С. В., Нагорных И. М. К вопросу о технологии преобразования звук — изображение — звук. // Спецтехника и связь. 2013. № 1. С. 28–32.
3. Алюшин В. М., Дворянkin С. В. Технологии образного анализа в задачах цифровой обработки речевой информации. // Научная визуализация. 2013. Т. 5. № 3. С. 75–88.
4. McAulay R.J., Quatieri T.F. Speech Analysis/Synthesis Based on a Sinusoidal Representation, IEEE Trans. on Acoust., Speech and Signal Processing.— 1988. Vol. I. ASSP-34. P. 744–754.

© Дворянkin Сергей Владимирович (s_dvrn@mail.ru), Дворянkin Никита Сергеевич (nik.dvrn@gmail.com).
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ КОНТРОЛЯ ПРИМЕСЕЙ ВОДЫ И ПЕСКА В ПРОДУКЦИИ ГАЗОВЫХ И ГАЗОКОНДЕНСАТНЫХ СКВАЖИН

IMPROVEMENT OF MEASURING CONVERTERS FOR CONTROL OF WATER AND SAND INCLUSIONS IN THE GAS AND GAS CONDENSATE WELL PRODUCT FLOW

**O. Yermolkin
Ya. Popova
I. Khrabrov
M. Gavshin**

Summary. The article is dedicated to the improvement of measuring converters for the control of impurities of water and sand in the production of gas and gas condensate wells used in the information and measuring systems of «Potok» («Flow») series. New unified information models of channels for the registration of inclusions, convenient for practical use, are proposed and investigated.

Keywords: multiphase flows, spectral flow measuring method, inclusions flow of water and sand, measuring converters.

Ермолкин Олег Викторович

Д.т.н., профессор, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина
ove@gubkin.ru

Попова Янина Дмитриевна

Аспирант, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина,
yanina.zykova@yandex.ru

Храбров Игорь Юрьевич

К.т.н., доцент, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина
khrabrov@gubkin.ru

Гавшин Михаил Александрович

Ведущий инженер, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина
gavshin@gubkin.ru

Аннотация. Статья посвящена совершенствованию измерительных преобразователей контроля примесей воды и песка в продукции газовых и газоконденсатных скважин, применяемых в составе информационно-измерительных систем серии «Поток». Предложены и исследованы новые унифицированные информационные модели каналов регистрации примесей, удобные для практического применения.

Ключевые слова: многофазные потоки, спектрометрический метод измерения расхода фаз, расход примесей воды и песка, измерительные преобразователи.

Вступление

Продукция подавляющего большинства газовых и газоконденсатных скважин, обеспечивающих основной объём добычи газа в России, представляет многофазный поток со сложной структурой, в котором помимо газовой фазы содержатся примеси воды и песка [1]. В таких условиях наряду с измерением дебита основной продукции возникает задача контроля количества примесей. Информация о количестве примесей в потоке продукции при различных режимах по дебиту является ключевой для своевременного обнаружения аварийного выноса примесей и принятия решений по изменению режима эксплуатации скважин.

Измерительный преобразователь информационных сигналов каналов регистрации примесей песка и воды

Для контроля и оценки количества примесей воды и песка в многофазном потоке скважин разработана оригинальная двухканальная схема вторичного измерительного преобразователя информационных сигналов (рис. 1) [2]. Обработке подвергаются сигналы ударного воздействия капель жидкости и частиц песка, регистрируемые первичным измерительным преобразователем с пьезокерамическим чувствительным элементом.

Разработанный вторичный измерительный преобразователь включает в себя два информационных канала с различными схемами обработки сигналов. Так, в канале регистрации удельного содержания примесей воды (УСПВ) для оценки количества примесей воды вычисляется среднееквадратическое значение сигнала ударного воздействия капель жидкости в соответствующей информативной полосе частот в ультразвуковом диапазоне. А для получения информации о количестве при-

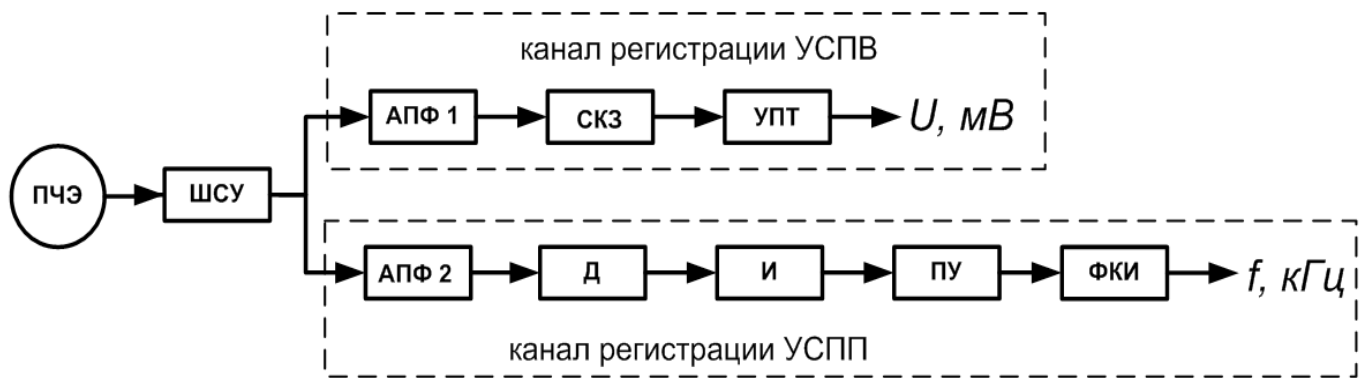


Рис. 1. Функциональная схема измерительного преобразователя информационных сигналов каналов регистрации примесей

месей песка в канале регистрации удельного содержания примесей песка (УСПП) используется специальный функциональный преобразователь, позволяющий формировать на выходе информационного канала пачки импульсов, количество которых пропорционально интенсивности сигнала отдельного ударного воздействия. Средняя частота импульсной последовательности пропорциональна общей интенсивности ударов песчинок за время измерения.

ПЧЭ — пьезокерамический чувствительный элемент; ШСУ — широкополосный согласующий усилитель; АПФ1, АПФ2 — активные полосовые фильтры; СКЗ — вычислитель среднеквадратического значения сигнала; УПТ — усилитель постоянного тока; Д — детектор; И — интегратор; ПУ — пороговое устройство; ФКИ — формирователь квантованных импульсов.

В работе [3] приведены временные диаграммы, иллюстрирующие процедуру формирования информационного сигнала канала регистрации УСПП. Предложенный подход позволил не только регистрировать факт соударения песчинок о выступающую в многофазный поток часть датчика, но и учитывать параметры ударного воздействия (массу песчинок и скоростные характеристики потока), что существенно улучшает точность измерения количества примесей песка.

Работы [4,5] посвящены разработке и исследованию информационных моделей, функционально связывающих количество примесей песка и воды в газовом потоке продукции с соответствующими выходными сигналами разработанного измерительного преобразователя. В настоящей статье приводятся результаты исследований, направленные на разработку и исследование новых унифицированных информационных моделей удельного содержания примесей.

В обобщённом виде информационные модели каналов регистрации УСПВ (модель 1) и УСПП (модель 2) можно представить следующим образом:

$$f = \varphi_1(Q_G, S_B, d) + \varepsilon_1 \tag{1}$$

$$и U = \varphi_2(Q_G, S_B, d) + \varepsilon_2, \tag{2}$$

где Q_G — дебит газа; S_B — удельное содержание примесей воды, которое определяется, как отношение Q_B / Q_G , где Q_B — расход примесей воды; $S_{П}$ — удельное содержание примесей песка, которое определяется, как отношение $Q_{П} / Q_G$, где $Q_{П}$ — расход примесей песка; d — диаметр сужающего устройства; f — частота сигнала на выходе канала регистрации УСПП; U — среднеквадратическое значение напряжения на выходе канала регистрации УСПВ; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ — аддитивные помехи, учитывающие случайные ошибки измерений, шумы, влияние неучтенных факторов.

Экспериментальные исследования моделей (1) и (2) выполнены на специальной лабораторной установке, позволяющей создавать водо-воздушные и песко-воздушные потоки с заданными расходами воздуха и примесей [5]. Для исследований были задействованы опытные образцы промышленных датчиков, включающих первичный преобразователь и преобразователи расходных информационных каналов. Эти датчики получили название скважинных измерительных модулей (СИМ).

В результате исследования информационных моделей каналов регистрации примесей (1) и (2) удалось получить обратные модели (информационные модели расхода), связывающие концентрацию примесей с выходными сигналами информационных каналов и расходом газа. В работе [4] подробно изложены алгоритмы построения информационных моделей расхода приме-

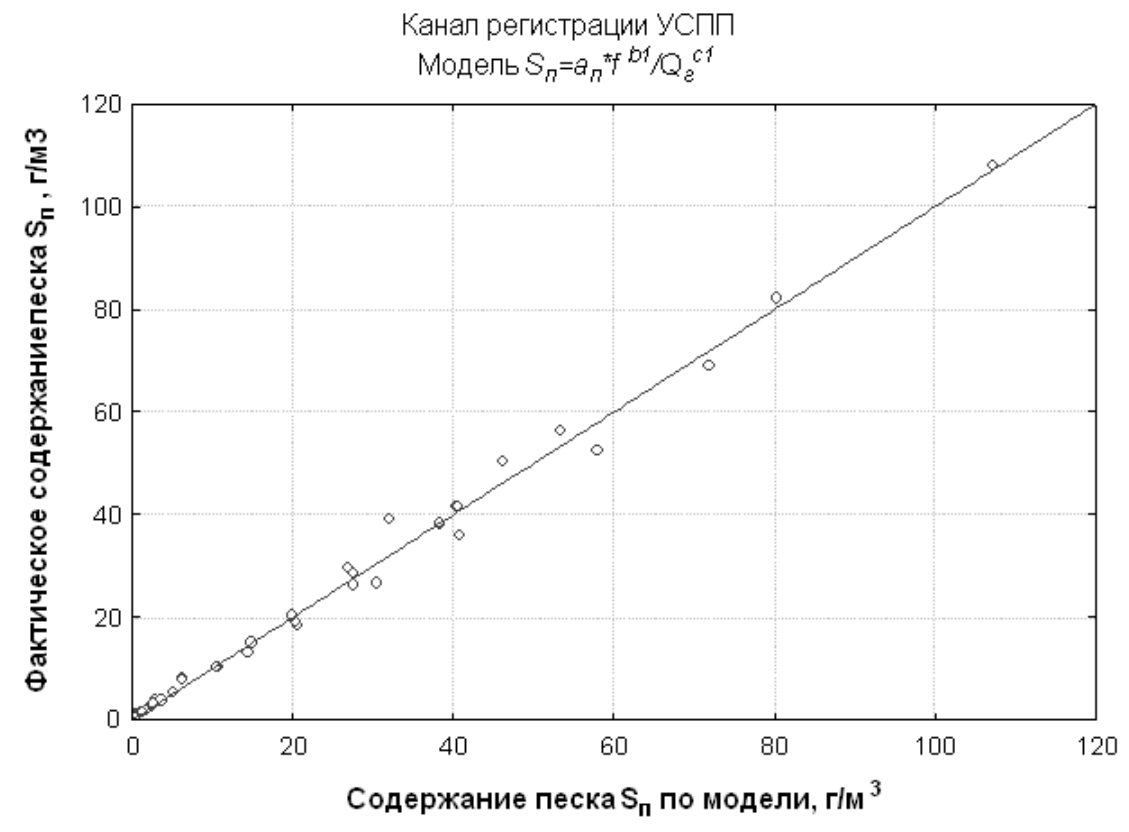


Рис. 2. Зависимость фактического содержания песка от содержания песка, рассчитанного по модели (3)

сей. Для канала регистрации УСПП определена модель следующего вида:

$$S_n = a_n * f^{b_1} / Q_\Gamma^{c_1}, \quad (3)$$

а для канала регистрации УСПВ модель вида:

$$S_\varepsilon = a_\varepsilon * U^{b_2} / Q_\Gamma^{c_2}, \quad (4)$$

где $a_n, a_\varepsilon, b_1, b_2, c_1$ и c_2 — постоянные коэффициенты моделей.

Для полученных моделей (3) и (4) выполнена проверка адекватности, в ходе которой сравнивалась дисперсия адекватности с дисперсией воспроизводимости с помощью критерия Фишера. Результаты проверки оказались положительными при 5% уровне значимости.

Разработка унифицированной модели расхода удельного содержания примесей песка

Результаты применения модели (3) для одного из СИМ отражены на рис. 2, где построены зависимости реальных содержаний песка, измеренных в ходе прове-

дения эксперимента, от содержаний песка, рассчитанных по регрессионной модели.

Как видно из рисунка, наблюдается хорошая сходимость расчетных значений удельных содержаний примесей с заданными в ходе эксперимента. Учитывая немалый объем экспериментальных данных и широкий диапазон их изменения, можно сделать вывод о хорошей сходимости результатов и работоспособности регрессионных моделей.

Предложенная модель (3) была исследована и для других идентичных образцов СИМ, и получены графики зависимостей, аналогичные графику, представленному на рис. 2. Ниже в табл. 1 приведены результаты расчета регрессионных коэффициентов a_1, b_1 и c_1 модели (3) для десяти СИМ, а так же соответствующих коэффициентов множественной корреляции R , вычисленных по формуле:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (3)$$

где y_i — фактическое значение; \hat{y}_i — значение, вычисленное по модели; \bar{y} — среднее фактических значений; n — количество измерений.

Таблица 1. Результаты расчета неизвестных коэффициентов регрессионной модели (3) и коэффициентов R

| № СИМ | Коэффициенты регрессионной модели | | | R |
|-------|-----------------------------------|-------|-------|--------|
| | a_1 | b_1 | c_1 | |
| 1 | 0,77 | 1,15 | 2,302 | 0,9964 |
| 2 | 1,02 | 1,12 | 2,32 | 0,9958 |
| 3 | 0,82 | 1,13 | 2,27 | 0,9967 |
| 4 | 0,43 | 1,16 | 2,14 | 0,9974 |
| 5 | 1,12 | 1,15 | 2,43 | 0,9945 |
| 6 | 0,95 | 1,12 | 2,32 | 0,9949 |
| 7 | 1,05 | 1,103 | 2,29 | 0,9961 |
| 8 | 1,98 | 1,08 | 2,43 | 0,9940 |
| 9 | 0,33 | 1,18 | 2,1 | 0,9988 |
| 10 | 1,00 | 1,12 | 2,39 | 0,9955 |

Таблица 2. Результаты расчета коэффициентов множественной корреляции R для модели (3) при $b_1=1$

| № СИМ Коеф-т c_1 | Коэффициенты множественной корреляции R | | | | | | | | | |
|-----------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 2 | 0,9921 | 0,9908 | 0,9932 | 0,9948 | 0,9862 | 0,9899 | 0,9916 | 0,9828 | 0,9955 | 0,9879 |
| 2,1 | 0,9939 | 0,9935 | 0,9948 | 0,9937 | 0,9901 | 0,9926 | 0,9943 | 0,9883 | 0,9933 | 0,9918 |
| 2,15 | 0,9941 | 0,9940 | 0,9948 | 0,9924 | 0,9913 | 0,9932 | 0,9948 | 0,9903 | 0,9916 | 0,9930 |
| 2,2 | 0,9937 | 0,9941 | 0,9944 | 0,9908 | 0,9921 | 0,9933 | 0,9949 | 0,9918 | 0,9894 | 0,9937 |
| 2,25 | 0,9930 | 0,9937 | 0,9935 | 0,9887 | 0,9923 | 0,9929 | 0,9945 | 0,9928 | 0,9869 | 0,9939 |
| 2,3 | 0,9918 | 0,9929 | 0,9922 | 0,9863 | 0,9921 | 0,9921 | 0,9937 | 0,9933 | 0,9840 | 0,9936 |
| 2,4 | 0,9881 | 0,9900 | 0,9884 | 0,9804 | 0,9904 | 0,9892 | 0,9908 | 0,9929 | 0,9772 | 0,9918 |

Таблица 3. Результаты расчета коэффициентов множественной корреляции R для модели (3) при $b_1=1,1$

| № СИМ Коеф-т c_1 | Коэффициенты множественной корреляции R | | | | | | | | | |
|-----------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 2 | 0,9901 | 0,9871 | 0,9911 | 0,9964 | 0,9809 | 0,9864 | 0,9875 | 0,9737 | 0,9981 | 0,9953 |
| 2,1 | 0,9941 | 0,9921 | 0,9948 | 0,9970 | 0,9872 | 0,9913 | 0,9925 | 0,9819 | 0,9978 | 0,9823 |
| 2,15 | 0,9953 | 0,9938 | 0,9959 | 0,9966 | 0,9896 | 0,9930 | 0,9941 | 0,9852 | 0,9968 | 0,9887 |
| 2,2 | 0,9959 | 0,9949 | 0,9965 | 0,9958 | 0,9915 | 0,9941 | 0,9953 | 0,9879 | 0,9954 | 0,9911 |
| 2,25 | 0,9961 | 0,9956 | 0,9965 | 0,9945 | 0,9929 | 0,9947 | 0,9959 | 0,9901 | 0,9936 | 0,9929 |
| 2,3 | 0,9959 | 0,9958 | 0,9962 | 0,9928 | 0,9938 | 0,9949 | 0,9961 | 0,9918 | 0,9914 | 0,9942 |
| 2,4 | 0,9940 | 0,9948 | 0,9941 | 0,9882 | 0,9942 | 0,9938 | 0,9950 | 0,9937 | 0,9858 | 0,9951 |

Величина

$$\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

представляет собой «необъяснённую» дисперсию, т.е. долю общей дисперсии, которая не объясняется функцией регрессии, а возникает за счёт изменчивости неучтенных факторов или за счет случайностей.

Как видно из табл. 1, коэффициенты множественной корреляции R для всех исследованных СИМ превышают величину 0,99, что свидетельствует о том, что выбран-

ная модель достаточно хорошо описывает экспериментальные данные. Кроме того, можно отметить, что коэффициенты b_1 для всех СИМ отличаются незначительно, а также коэффициенты c_1 для всех СИМ отличаются незначительно. Поэтому их можно зафиксировать, оставив в модели (3) только один коэффициент a_1 . Это позволит существенно упростить процедуру градуировки канала регистрации УСПП по месту эксплуатации.

Целесообразно для исследований зафиксировать следующие значения коэффициентов b_1 и c_1 : $b_1=1; 1,1$ и $c_1=2; 2,15; 2,2; 2,25; 2,3; 2,4$. Для выбранных значе-

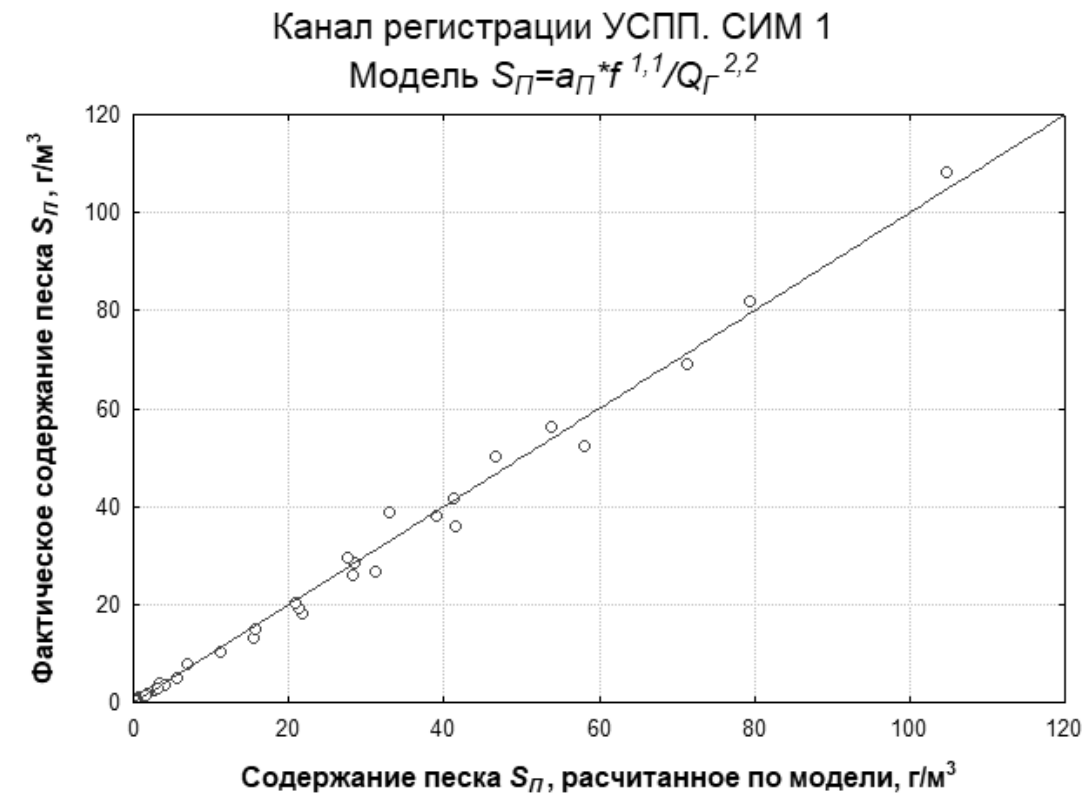


Рис. 3. Зависимость фактического содержания песка от содержания песка, рассчитанного по унифицированной модели (5)

ний коэффициентов регрессионной модели были рассчитаны соответствующие коэффициенты множественной корреляции R (табл. 2 и 3).

Анализируя полученные значения коэффициентов множественной корреляции R , отвечающие различным значениям коэффициентов регрессионной модели (3), унифицированную информационную модель расхода песка, содержащую всего один градуировочный коэффициент, целесообразно определить так:

$$S_{п} = a_{п} * f^{1,1} / Q_{г}^{2,2} \quad (5)$$

Пример применения унифицированной модели для одного из СИМ приведен на рис. 3. Видно, что достигнута хорошая сходимость экспериментальных и рассчитанных по унифицированной модели значений.

Для оценки точности модели (5) рассчитаны и приведены в табл. 4 приведённые среднеквадратические погрешности γ_{σ} вычисления удельного содержания примесей песка для всех десяти исследуемых СИМ:

$$\gamma_{\sigma} = \frac{\sigma}{S_{п \text{ факт } MAX}} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где: σ — среднеквадратическое отклонение результатов измерения содержания песка, рассчитываемое по формуле (7),

$S_{п \text{ факт } MAX}$ — максимальное значение фактического содержания песка.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_{п \text{ факт } i} - S_{п \text{ мод } i})^2}{n-1}} \quad (7)$$

$S_{п \text{ факт } i}$ — фактическое содержание песка, измеренное в ходе i -го опыта,

$S_{п \text{ мод } i}$ — содержание песка, рассчитанное по модели (5) и соответствующее условиям i -го опыта,

n — количество опытов ($n=36$), i — номер проводимого опыта.

Учитывая немалый объём экспериментальных точек, представительную выборку измерительных преобразователей (десять СИМ), а также широкий динамический диапазон изменения параметров, можно заключить о достижении хороших результатов. Приведённые сред-

Таблица 4. Приведённые среднеквадратические погрешности γ_σ вычисления удельного содержания примесей песка для контрольной партии СИМ,%

| № СИМ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| γ_σ | 2,19 | 2,45 | 2,05 | 2,24 | 3,16 | 2,63 | 2,36 | 3,79 | 2,33 | 2,89 |

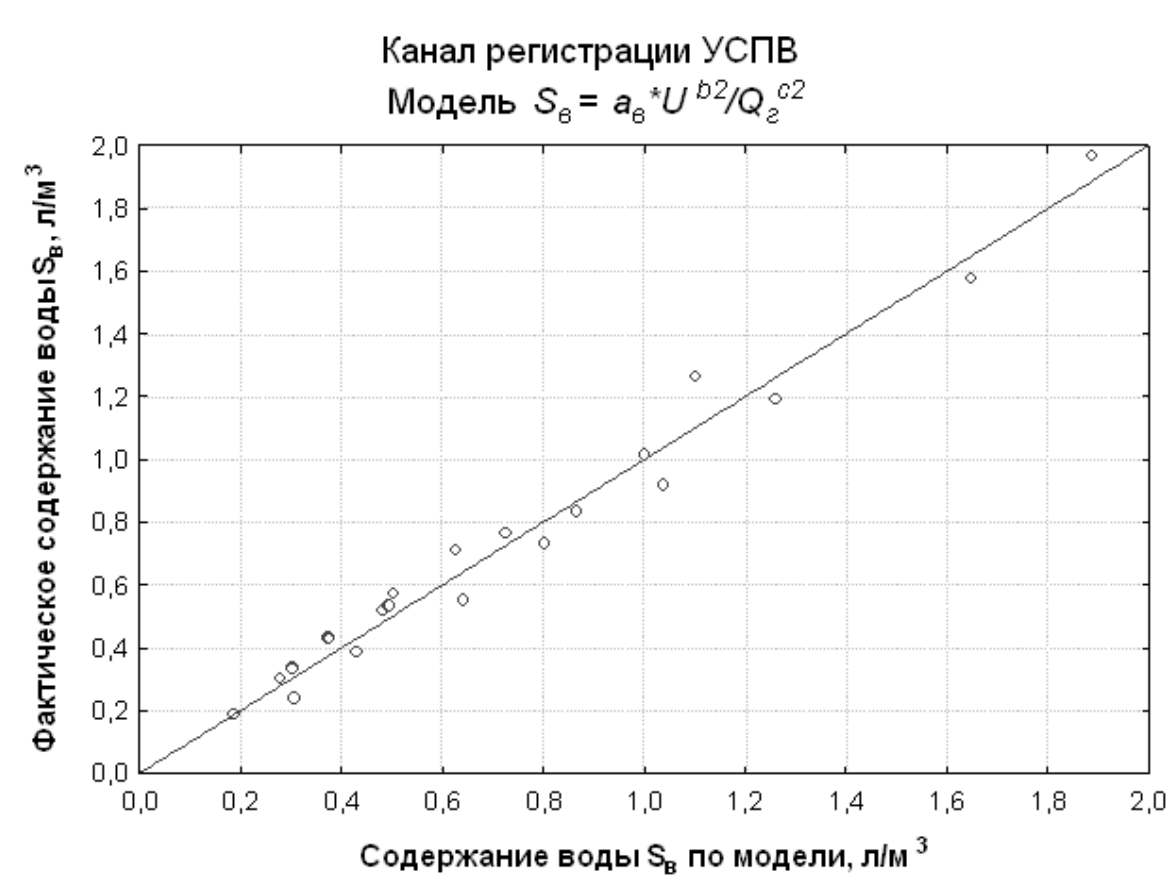


Рис. 4. Зависимость фактического содержания примесей воды от содержания воды, рассчитанного по модели (4)

неквадратические погрешности вычисления удельного содержания примесей песка для выбранных СИМ составили от 2,05% до 3,79% (в динамическом диапазоне концентраций песка от 0,005 до 110 г/м³). Это вполне удовлетворяет требованиям технологического контроля режима работы скважин.

Разработка унифицированной модели канала регистрации удельного содержания примесей воды

Результаты применения модели (4) для одного из СИМ отражены на рис. 4, где построена зависимость реального содержания примесей воды, измеренного

в ходе проведения эксперимента, от содержания примесей воды, рассчитанного по выбранной регрессионной модели.

Здесь также наблюдается хорошая сходимость экспериментальных и рассчитанных по модели значений в широком диапазоне изменения параметров. Разброс точек на графиках зависимостей, построенных для остальных исследуемых СИМ, аналогичен наблюдаемому на рис. 4.

В табл. 5 приведены результаты расчета регрессионных коэффициентов a_B , b_2 и c_2 модели (4) для десяти образцов идентичных СИМ. Коэффициенты множественной корреляции для всех исследованных СИМ превыша-

Таблица 5. Результаты расчета неизвестных коэффициентов регрессионной модели (4)

| № СИМ | Коэффициенты регрессионной модели | | | Коэф-т R |
|-------|-----------------------------------|-------|-------|----------|
| | a_B | b_2 | c_2 | |
| 1 | 494,82 | 2,24 | 7,50 | 0,9879 |
| 2 | 551,85 | 2,24 | 7,51 | 0,9899 |
| 3 | 707,37 | 2,24 | 7,55 | 0,9687 |
| 4 | 907,48 | 2,01 | 7,15 | 0,9822 |
| 5 | 601,52 | 2,10 | 7,21 | 0,9895 |
| 6 | 1105,93 | 2,10 | 7,43 | 0,9850 |
| 7 | 835,11 | 2,09 | 7,31 | 0,9886 |
| 8 | 1084,69 | 2,42 | 8,07 | 0,9699 |
| 9 | 923,04 | 2,18 | 7,50 | 0,9860 |
| 10 | 509,2354 | 2,10 | 7,13 | 0,9874 |

Таблица 6. Результаты расчета коэффициентов множественной корреляции R для модели (4) при $b_2=2,1$

| № СИМ Коэф-т c_2 | Коэффициенты множественной корреляции R | | | | | | | | | |
|-----------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 6,5 | 0,8993 | 0,8980 | 0,8502 | 0,7648 | 0,8596 | 0,7553 | 0,8053 | 0,8470 | 0,8370 | 0,8790 |
| 7 | 0,9858 | 0,9867 | 0,9624 | 0,9399 | 0,9799 | 0,9419 | 0,9619 | 0,9615 | 0,9696 | 0,9825 |
| 7,5 | 0,9509 | 0,9587 | 0,9426 | 0,9809 | 0,9713 | 0,9839 | 0,9833 | 0,9380 | 0,9750 | 0,9621 |
| 8 | 0,8392 | 0,8553 | 0,8382 | 0,9249 | 0,8773 | 0,9250 | 0,9111 | 0,8278 | 0,8931 | 0,8608 |

Таблица 7. Результаты расчета коэффициентов множественной корреляции R для модели (4) при $b_2=2,2$

| № СИМ Коэф-т c_2 | Коэффициенты множественной корреляции R | | | | | | | | | |
|-----------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 6,5 | 0,7754 | 0,7774 | 0,7034 | 0,5625 | 0,7076 | 0,5328 | 0,6216 | 0,6940 | 0,6784 | 0,7409 |
| 7 | 0,9540 | 0,9531 | 0,9172 | 0,8491 | 0,9269 | 0,8464 | 0,8861 | 0,9170 | 0,9088 | 0,9388 |
| 7,5 | 0,9840 | 0,9874 | 0,9679 | 0,9681 | 0,9891 | 0,9719 | 0,9837 | 0,9672 | 0,9851 | 0,9862 |
| 8 | 0,9118 | 0,9229 | 0,9068 | 0,9678 | 0,9405 | 0,9709 | 0,9631 | 0,9012 | 0,9505 | 0,9276 |

Таблица 8. Приведённые среднеквадратические погрешности γ_σ вычисления удельного содержания примесей воды для контрольной партии СИМ, %

| № СИМ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| γ_σ | 4,21 | 3,73 | 5,93 | 5,91 | 3,47 | 6,72 | 4,24 | 5,99 | 4,06 | 3,91 |

ют величину 0,96, что также свидетельствует об удачном выборе модели (4). Кроме того, анализируя численные значения коэффициентов b_2 и c_2 модели (4) для всех рассмотренных СИМ, можно заключить, что их целесообразно зафиксировать.

Для исследований предложено выбрать следующие фиксированные значения коэффициентов b_2 и c_2 : $b_2=2,1$; $2,2$ и $c_2=6,5$; 7 ; $7,5$; 8 . Соответствующие этим значениям коэффициентов b_2 и c_2 коэффициенты множественной корреляции R для модели (4) приведены в таблицах 6 и 7.

На основе анализа расчетных значений R (табл. 6 и 7) можно предложить следующий вид унифицированной модели удельного расхода воды:

$$S_B = a_B * U^{2,2} / Q_T^{7,5} \quad (8)$$

Пример применения унифицированной модели (8) для одного из СИМ приведен на рис. 5. Приведенная среднеквадратическая погрешность γ_σ составила 4,21% при изменении заданных значений водосодержаний в диапазоне от 0,2 л/м3 до 2 л/м3.

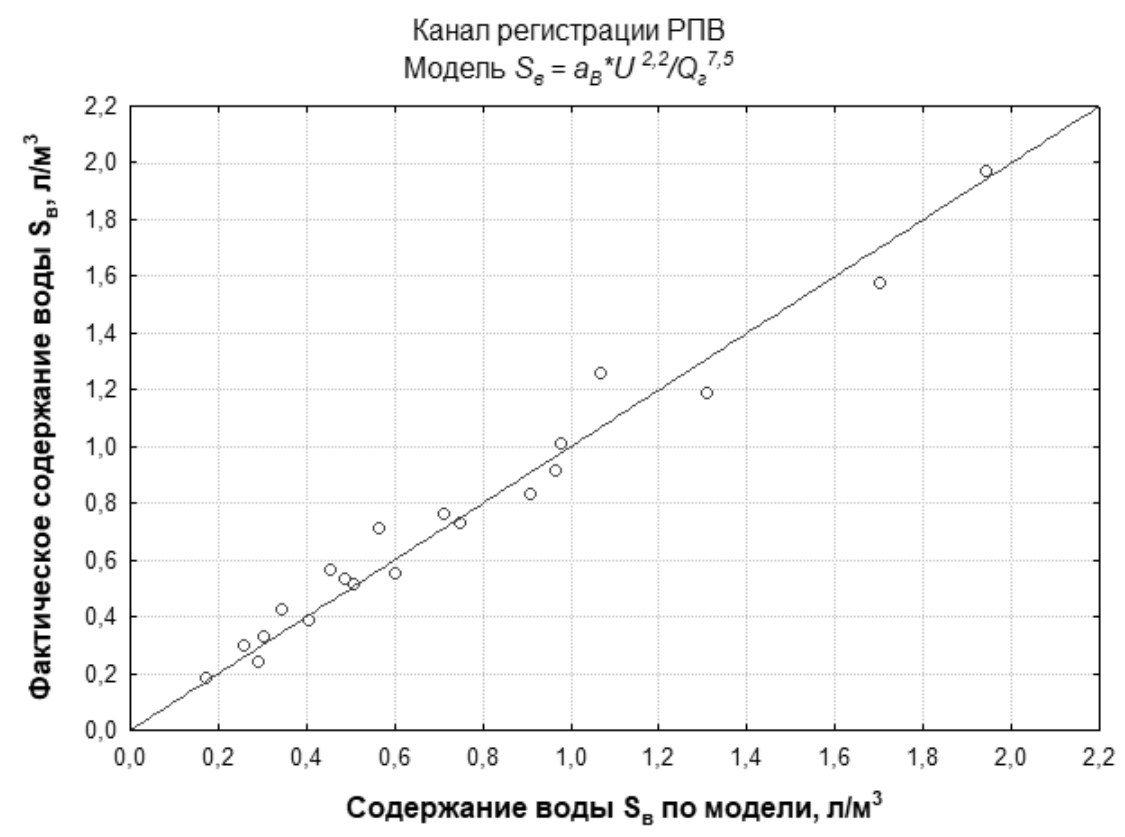


Рис. 5. Зависимость фактического содержания воды от содержания воды, рассчитанного по модели (8) для СИМ № 1

Аналогичные результаты получены при исследовании партии из десяти СИМ. Результаты расчета среднеквадратической погрешности γ_σ для этих СИМ сведены в таблицу 8.

Учитывая немалый объем экспериментальных точек, представительную выборку измерительных преобразователей (десять СИМ), а также широкий динамический диапазон изменения параметров, можно заключить о достижении хороших результатов, удовлетворяющих требованиям технологического контроля режима работы скважин.

Выводы

Результаты обработки большого объема экспериментальных данных, полученных в ходе проведения лабора-

торных исследований подтверждают перспективность предложенных алгоритмов обработки выходного сигнала усовершенствованного измерительного преобразователя для решения задач регистрации количества примесей воды и песка в потоке газа.

Получены удобные для практического применения унифицированные информационные модели расхода примесей песка и воды, содержащие всего один градуировочный коэффициент. Это позволяет упростить процедуру градуировки датчика по месту эксплуатации.

Проведенные исследования унифицированных моделей для десяти различных СИМ позволяют говорить о достижении точности вычисления содержания примесей, удовлетворяющей требованиям технологического контроля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вяхирев Р.И., Гриценко А. И., Тер-Саркисов Р. М. Разработка и эксплуатация газовых месторождений. — М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. — 880 с.
2. Ермолкин О.В., Попова Я. Д., Горохов А. В. Разработка и исследование электронных преобразователей каналов регистрации примесей в потоке продукции газовых и газоконденсатных скважин // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2018. № 3. С. 18–23.

3. Ермолкин О.В., Великанов Д. Н., Попова Я. Д., Храбров И. Ю. Контроль параметров сложных потоков продукции эксплуатационных скважин измерительной системой «Поток» нового поколения // Труды РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина. 2018. № 3/288. С. 195–207.
4. Ермолкин О.В., Великанов Д. Н., Гавшин М. А., Попова Я. Д. Комплексный контроль параметров продукции эксплуатационных скважин // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2017. № 4. С. 12–20.
5. Попова Я. Д. Разработка и исследование информационных моделей расхода примесей в потоке продукции газовых и газоконденсатных скважин // Нефть, газ, бизнес. 2017. № 11. С. 9–16.
6. Браго Е.Н., Ермолкин О. В., Ланчаков Г. А., Великанов Д. Н., Гавшин М. А. Совершенствование информационно-измерительных технологий в нефтегазодобыче // Труды РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина. 2012. № 3. С. 24–42.

© Ермолкин Олег Викторович (ove@gubkin.ru), Попова Янина Дмитриевна (yanina.zykova@yandex.ru),
Храбров Игорь Юрьевич (khrabrov@gubkin.ru), Гавшин Михаил Александрович (gavshin@gubkin.ru).
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МОДИФИКАЦИИ ПОТОЧНОГО ШИФРА RC4

MODIFICATIONS
OF STREAM CIPHER RC4**A. Zelenoritskaya**
M. Ivanov

Summary. In this paper, we consider possible modifications of the stream cipher RC4, which became widespread due to its properties, such as elegant design and an effective software and hardware implementation. We present an enhancement version of the RC4 algorithm, which obtained by adding parallel LFSR and stochastic transformation boxes (R-boxes). The result of proposed modification is the increased complexity of dependence between the key and the initial state of the cipher, as well as increased bit depth of the internal state.

Keywords: Stream cipher, RC4, Spritz, LFSR, R-box.

Зеленорицкая Анастасия Викторовна
Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ»

Иванов Михаил Александрович
Д.т.н., профессор, РГУ нефти и газа (НИУ) имени
И. М. Губкина
fkb-info@gubkin.ru

Аннотация. Рассматриваются возможные модификации поточного шифра RC4, который благодаря своим свойствам, в первую очередь элегантному дизайну и эффективной программной и аппаратной реализации, получил широкое распространение. Анализируется возможность внедрения в структуру алгоритма параллельных LFSR и блоков стохастического преобразования (R-блоков). Результатом таких модификаций является усложнение зависимости между ключом и начальным состоянием шифра, а также увеличение разрядности внутреннего состояния.

Ключевые слова: поточный шифр, RC4, Spritz, R-блок.

Введение

Поточный, байт-ориентированный шифр RC4 был разработан Р. Ривестом в 1987 году. Сначала алгоритм являлся коммерческой тайной, но спустя семь лет шифр был анонимно разослан и выложен в Интернет [1]. С тех пор шифр интенсивно изучался и нашел широкое применение (SSL/TLS, WEP, Oracle secure SQL и др.). Базовая идея автора RC4 понятна, наличие каждого элемента шифра можно легко объяснить. Благодаря элегантному дизайну, эффективной программной и аппаратной реализации шифр получил широкое распространение и до сих пор является самым популярным поточным шифром.

Достоинства алгоритма:

- ◆ Большой размер внутреннего состояния (8-разрядная таблица замен S и два 8-разрядных счетчика $Q1$ и $Q2$ ($8 \times 256 + 16$ бит);
- ◆ Быстрые функции обновления состояния и получения выходного значения;
- ◆ Масштабируемость: шифр хорошо работает при любой разрядности $n > 2$ (не только для $n = 8$);
- ◆ Ключ, состоящий из произвольного числа n -разрядных элементов, может быть любой длины вплоть до $2n$;
- ◆ Универсальный самодостаточный алгоритм формирования таблицы замен;
- ◆ В процессе работы криптоалгоритма состояние шифра меняется: за $2n$ шагов гарантированно полностью изменяется таблица замен.

Как показывает история развития криптографии с течением времени криптоалгоритмы ослабевают, в том числе по причине разработки новых видов атак и обнаружения новых уязвимостей. Кроме того, известны неудачные примеры реализации RC4, например, в протоколе WEP [2]. Со временем были выявлены статистические слабости как алгоритма инициализации S -блока, так и функции генерации псевдослучайных чисел (ПСЧ). Основные найденные уязвимости алгоритма [3]:

- ◆ алгоритм инициализации S -блока в некоторых случаях позволяет по состоянию шифра восстановить ключ;
- ◆ зависимость начальных значений в таблице замен S -блока от ключа;
- ◆ встречаются коллизии ключей: разные ключи переключают шифр в одно и то же состояние;
- ◆ в некоторых случаях возможно определение текущего состояния шифра по выходной псевдослучайной последовательности;
- ◆ первые байты ключевого потока с выхода генератора псевдослучайных чисел (PRNG) всегда неслучайны, в результате по этим байтам можно делать предположения об используемом ключе. В результате в тех случаях, когда долговременный ключ и поспе просто склеиваются для создания ключа шифра, этот долговременный ключ может быть получен с помощью анализа достаточно большого количества сообщений, зашифрованных с использованием данного ключа.

Таблица 1. Формирование выходного байта и изменение состояния шифра в RC4 и Spritz.

| RC4 | Spritz | Комментарий |
|-------------------------|--|---|
| 1: $i = i + 1$ | 1: $i = i + w$ | Параметр w является константой. В RC4 $w = 1$, а в Spritz параметр w может принимать любое нечетное значение. |
| 2: $j = j + S[i]$ | 2: $j = k + S[j + S[i]]$ 2a: $k = i + k + S[j]$ | В RC4 для обхода массива S использовались параметры i и j . В Spritz к ним добавляется параметр k . |
| 3: SWAP($S[i]; S[j]$) | 3: SWAP($S[i]; S[j]$) | - |
| 4: $z = S[S[i] + S[j]]$ | 4: $z = S[j + S[i + S[z + k]]]$ | См. пункт 2 |
| 5: Return z | 5: Return z | - |

И хотя RC4 все еще можно использовать, естественно относиться с повышенным вниманием к обнаруженным уязвимостям, ему на замену ищутся новые, более стойкие альтернативы.

Поточный шифр Spritz

Самая серьезная модификация, алгоритм Spritz, была предложена самим автором RC4 [4]. В этой модификации были сохранены основные особенности оригинального шифра, при этом авторы постарались закрыть найденные уязвимости, сохранив главные достоинства алгоритма — высокое быстродействие и простоту реализации. Серьезным нововведением является внедрение в архитектуру Spritz конструкции Sponge. Sponge — это итеративная конструкция на основе преобразования (псевдослучайной перестановки) F для создания функции, принимающей на входе строку данных произвольной длины («впитывание») и дающей на выходе в качестве результата строку данных также произвольной длины («выжимание»). Многие свойства функций Sponge основываются на том, что нет никаких характеристик преобразования F , которые могли бы быть полезны для атакующего. Конструкция имеет внутреннее состояние фиксированного размера b (бит), которое разделено на две части — первая имеет разрядность r , а вторая — разрядность c . Значение r называется битовой скоростью, а значение c — мощностью [5, 6].

Стойкость шифра зависит от значения c : этот параметр показывает, какое количество информации останется без изменения при впитывании новой порции данных и будет изменено только во время преобразования f . Атакующему потребуется количество времени, равное

$$O\left(2^{\frac{c}{2}}\right),$$

для поиска коллизии в пространстве состояний. Мощность Spritz при значении параметра $n = 8$ составляет не менее 112 байт (именно последние 112 байт S -блока остаются нетронутыми функцией «Впитывание»).

Помимо повышения криптостойкости, Spritz, в отличие от RC4, можно использовать не только как поточный шифр. По задумке авторов, Spritz может быть использован в качестве хеш-функции и генератора имитовставки.

В табл. 1 приведены операции ядра шифра Spritz (формирование выходного байта и изменение состояния шифра) и его отличия от RC4.

Spritz — не единственная модификация алгоритма RC4. До и после нее появлялись и другие варианты улучшения RC4.

Основные строительные блоки поточных шифров

Существует огромное количество поточных шифров, однако какого-то единого универсального подхода к их синтезу, как это имеет место в мире блочных шифров, нет. Однако все же можно выделить основные строительные блоки поточных криптоалгоритмов, это регистры сдвига с линейной обратной связью (LFSR, Linear Feedback Shift Register), блоки замен (S -блоки) и блоки стохастического преобразования (R -блоки).

LFSR. Исторически первыми поточными криптоалгоритмами были именно шифры на LFSR. LFSR по сути — это простейший PRNG. Однако сейчас эти устройства используются лишь в качестве строительных блоков. Логика работы LFSR описывается системой линейных уравнений и поэтому имея фрагмент выходной последовательности небольшой длины, можно легко восстановить структуру устройства.

Существуют две конструкции последовательных LFSR: схема Галуа и схема Фибоначчи. На рис. 1 показан пример LFSR, построенного по схеме Фибоначчи, где Q_i — состояние i -го элемента памяти LFSR, а \oplus — операция сложения по модулю два. Характер обратных связей устройства определяется видом образующего примитивного многочлена

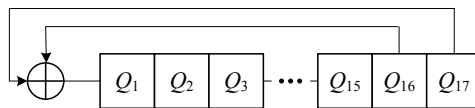


Рис. 1. Схема последовательного LFSR при $\Phi(x) = x^{17} + x^{16} + 1$.

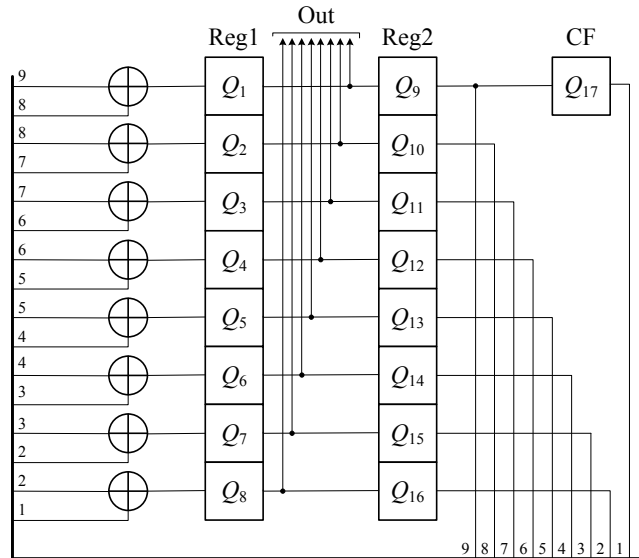


Рис. 2. Схема параллельного LFSR при $\Phi(x) = x^{17} + x^{16} + 1$ и $n = 8$.

$\Phi(x) = \varphi(x-1) x^{-N}$, где $\varphi(x-1)$ — характеристический многочлен, N — степень многочленов $\Phi(x)$ и $\varphi(x)$ [7].

Рассмотренные LFSR последовательного типа могут использоваться только для генерации битовой ПСЧ, которая снимается с выхода одного из разрядов регистра. Если необходима n -разрядная последовательность, необходимо использовать LFSR параллельного типа.

Выбираем образующий многочлен степени $N > n$, выбираем схему Фибоначчи или Галуа и синтезируем PRNG, работающий в n раз быстрее исходного LFSR (иначе говоря, выполняющего за один такт своей работы преобразования, которые в исходном LFSR выполняются за n тактов). При этом следует помнить, что если числа n и $S = 2N - 1$ не являются взаимно простыми, генератор ПСЧ вырождается, так как длина формируемой им последовательности оказывается существенно меньше максимально возможной длины, равной S . При программной реализации наибольшее быстродействие достигается в случае использования конструкции Фибоначчи и разреженного многочлена (многочлена с относительно небольшим числом ненулевых коэффициентов) $\Phi(x)$. На рис. 2 приведен пример построения такого параллельного LFSR.

Как показано ниже, один такт работы устройства требует использования всего трех ассемблерных инструкций.

```

; Вход:
; CF || Reg2 || Reg1 = (Q17 Q16 ... Q9 Q8 ... Q1) — «старое» состояние PRNG
RCR Reg2; Циклический сдвиг вправо через флаг переноса CF, CF = Q9
XCNG Reg1, Reg2; Reg2 = (Q8 Q7 Q6 Q5 Q4 Q3 Q2 Q1)
XOR Reg1, Reg2; CF || Reg2 || Reg1 — «новое» состояние PRNG
    
```

S-блоки. Блок замен — это важнейший криптографический примитив, базовый элемент всех современных блочных и многих поточных шифров [8–12]. Как уже отмечалось выше, в шифре RC4 специфирован универсальный алгоритм формирования блоков замен приемлемого для большинства приложений качества.

R-блоки. В [13] предложен блок стохастического преобразования (*R*-блок), который может эффективно использоваться для решения различных задач защиты информации. Схема одного из возможных вариантов построения *R*-блока, впервые предложенного в работе

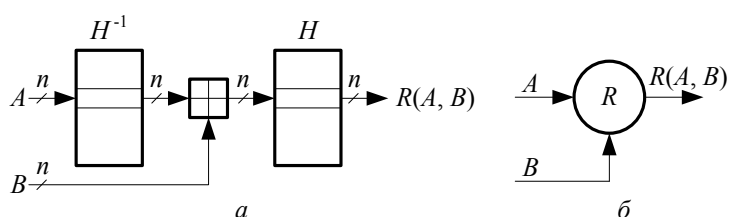


Рис. 3. Логика работы R-блока (а) и его условное графическое обозначение (б).
 \oplus — сумматор по модулю 2^n .

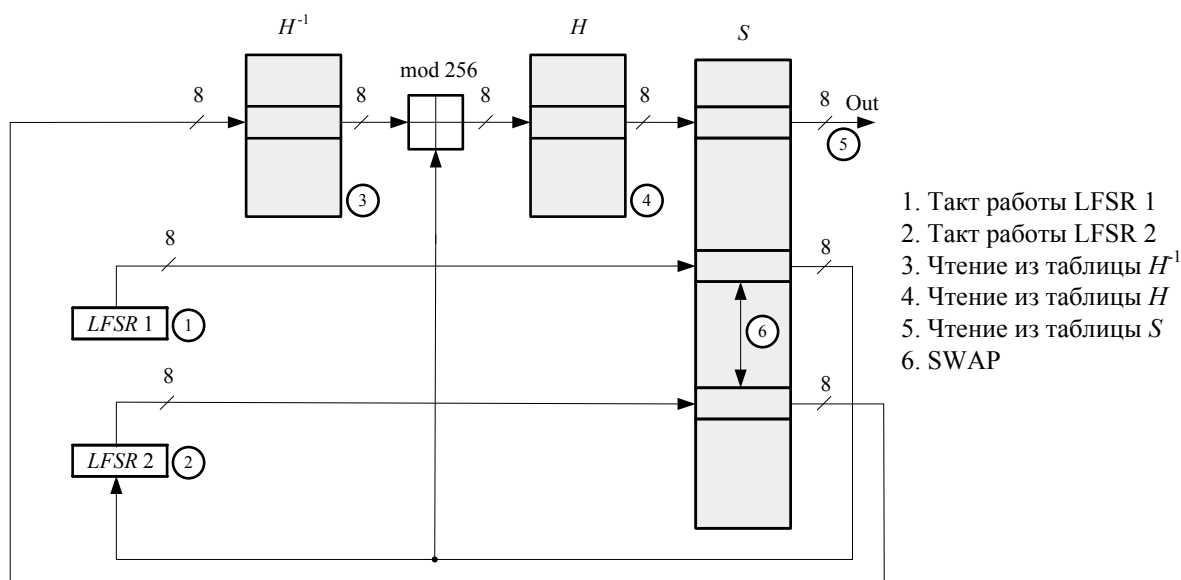


Рис. 4. Вариант ядра модифицированного PRNG RC4.

[14] для обеспечения универсальной защиты информации, пересылаемой по каналу связи, и его условное графическое обозначение показаны на рис. 3. Ключевая информация n -разрядного R-блока — заполнение таблицы $H = \{H(m); m = 0, \dots, (2^n - 1)\}$, размерности $n \times 2^n$, содержащей элементы $GF(2n)$, перемешанные случайным образом, т.е. $H(m) \in GF(2^n)$. Результат $R_H(A, B)$ стохастического преобразования входного n -разрядного двоичного набора A зависит от заполнения таблицы H и параметра преобразования B , задающего смещение в таблице относительно ячейки, содержащей значение A , следующим образом $R_H(A, B) = H((m_A + B) \bmod 2^n)$, где m_A — адрес ячейки таблицы H , содержащей код A , т.е. $H(m_A) = A$. Иначе говоря, результат работы R-блока суть считывание содержимого ячейки таблицы H , циклически смещенной на B позиций в сторону старших адресов относительно ячейки, содержащей код A . Для обеспечения независимости времени преобразования от исходных данных в состав R-блока вводится таблица $H^{-1} = \{H^{-1}(j)\}$ размерности $n \times 2^n$, причем $\forall j = 0, 1, \dots, (2n - 1) H^{-1}(j) = mj$. Иными словами ячейка с адресом j в массиве

H^{-1} хранит адрес ячейки массива H , содержащей код j . Интересно отметить, что, во-первых, при $H^{-1} = \{0, 1, \dots, (2n - 1)\} B = 0$ получаем классический S-блок с таблицей замен H ; во-вторых, при записи в каждую ячейку массивов H и H^{-1} ее собственного адреса получаем классический сумматор по модулю 2^n , а значит, R-блок может быть назван *стохастическим сумматором*, т.е. сумматором с непредсказуемым результатом работы, зависящим от заполнения ключевой таблицы H .

Достоинством R-блока является простая программная реализация (4 инструкции Ассемблера, по две инструкции XLAT и ADD).

R-блок может использоваться для реализации шифрования методом гаммирования. В этом случае на вход A подается исходная последовательность, на вход B — гамма шифра (Keystream), а с выхода $R_H(A, B)$ шифртекст. Единственное, что надо учитывать — это необходимость использования преобразования R^{-1} (обратного R) на принимающей стороне. Вторая возможная область

применения R -блоков — замена сумматоров по модулю 2^n при модификации известных алгоритмов стохастического преобразования данных, например, поточных алгоритмов PIKE, RC4 и ряда других. Кстати, R -блоком можно двумя способами заменить сумматор по модулю 2^n на рис. 3, получив при этом две разновидности R^2 -блоков.

Варианты модификации алгоритма RC4

Главная цель предлагаемых модификаций — сохранить первоначальный замысел автора RC4, усилив шифр в части конкретной реализации счетчиков и сумматоров по модулю 256.

Предлагаются два направления модификации шифра RC4. Первое, легковесное (Light-Weight) направление связано с реализацией счетчиков i и/или j на параллельных LFSR, формирующих n -разрядные псевдослучайные последовательности. Пример такого решения для $n = 8$ был рассмотрен ранее на рис. 2. При этом следует отметить, что наиболее простая программная реализация имеет место при выборе в качестве образующего многочлена $\Phi(x)$ LFSR трехчлена вида $x^N + x^k + 1$, где $k \in \{n, 2n, 3n, \dots\}$. Для $n = 8$ такими многочленами помимо

$x^{17} + x^{16} + 1$ являются $x^{15} + x^8 + 1$, $x^{39} + x^8 + 1$, $x^{63} + x^{32} + 1$, $x^{65} + x^{32} + 1$,

Второе направление связано с заменой сумматора (сумматоров) по модулю 256 в составе RC4 на восьмиразрядные стохастические сумматоры в схеме инициализации таблицы замен и/или в схеме генерации выходной последовательности. В первом случае очевидно

усложняется связь между ключом и исходным состоянием алгоритма. При этом исходный ключ имеет вид $K = K_1 \parallel K_2$, где K_1 обеспечивает формирование таблицы стохастического преобразования H , а K_2 обеспечивает формирование таблицы замен S . Во втором случае помимо устранения известных уязвимостей PRNG RC4 мы получаем существенное увеличение (по сути удвоение) разрядности внутреннего состояния шифра. На рис. 4 показан один из вариантов ядра модифицированного PRNG.

Заключение

Рассмотрены достоинства поточного алгоритма RC4. Дано объяснения причинам появления многочисленных модификаций алгоритма. Приведено описание функция ядра алгоритма Spritz, самой существенной модификация RC4. Перечислены основные строительные блоки современных поточных шифров: LFSR, S - и R -блоки. В RC4 и всех его многочисленных модификациях используются только блоки замен, поэтому логичным является попытка встраивания LFSR и R -блоков в структуру алгоритма. Приводится Light-Weight версия RC4 на основе использования параллельных LFSR. Описываются возможные модификации RC4 на основе использования R -блоков. Большое количество вариантов такой модификации позволит в будущем синтезировать полиморфную конструкцию шифра.

Тестирование PRNG модифицированного алгоритма, построенных с использованием R -блоков по методике НИСТ [15], показало статистическую безопасность этих модификаций, так как число пройденных оценочных тестов оказалось сопоставимо с результатами тестирования блочных PRNG на основе ГОСТ 28147–89 и AES-128.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ronald L. Rivest. RSA security response to weaknesses in key scheduling algorithm of RC4. Technical note, RSA Data Security, Inc., 2001. [The structure of RC4 was never published officially, it was leaked in 1994 to the Internet. This note confirms that the leaked code is indeed RC4.]
2. Поточные шифры. А. А. Асосков, М. А. Иванов, А. А. Мирский и др. — М.: Кудиц-образ, 2003.
3. Sourav Sen Gupta. Analysis and Implementation of RC4 Stream Cipher. Indian Statistical Institute. Kolkata, West Bengal, India, 2013.
4. Rivest R., Schuldt J.: Spritz — a spongy RC4-like stream cipher and hash function, 2014. [<https://people.csail.mit.edu/rivest/pubs/RS14.pdf>]
5. G. Bertoni, J. Daemen, M. Peeters, G. Van Assche. Sponge functions. ECRYPT Hash Workshop, Barcelona, Spain, May 2007. <http://sponge.noekeon.org/>.
6. G. Bertoni, J. Daemen, M. Peeters, G. Van Assche. Permutation-based encryption, authentication and authenticated encryption. <http://keccak.noekeon.org/KeccakDIAC2012.pdf>
7. Иванов М.А., Чугунков И. В. Криптографические методы защиты информации в компьютерных системах и сетях. — М.: НИЯУ МИФИ, 2012.
8. Carlisle Adams, Stafford E. Tavares. Good S-boxes are easy to find. Advances in cryptology — CRYPTO '89. Proceedings of a conference held at the University of California, Santa Barbara, CA (USA), August 20–24, 1989, pp.612–615.
9. Serge Mister, Carlisle Adams. Practical S-Box Design. Workshop on Selected Areas in Cryptography (SAC'96). Queen's University, 1996, pp. 61–76.
10. El-Sheikh, H.M.; El-Mohsen, O.A.; Elgarf, S.T.; Zekry, A. A new approach for designing key-dependent S-box defined over GF (24) in AES. Int. J. Comput. Theory Eng. 2012, 4, 158.
11. Leander, G.; Poschmann, A. On the classification of 4 bit S-boxes. In Proceedings of the 1st international Workshop on Arithmetic of Finite Fields, Madrid, Spain, 21–22 June 2007; pp. 159–176.

12. Zhang, W.; Bao, Z.; Rijmen, V.; Liu, M. A New Classification of 4-bit Optimal S-boxes and its Application to PRESENT, RECTANGLE and SPONGENT. In International Workshop on Fast Software Encryption; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2015; pp. 494–515.
13. Ahmad Albatsha, Michael A. Ivanov. Stochastic data transformation boxes for information security applications. Biologically Inspired Cognitive Architectures (BICA) for Young Scientists. Editors Alexei V. Samsonovich, Valentin V. Klimov. Proceedings of the First International Early Research Career Enhancement School on BICA and Cybersecurity (FIERCES2017) pp. 221–227.
14. Осмоловский С. А. Стохастические методы передачи данных. — М.: Радио и связь, 1991.
15. A Statistical Test Suite for Random and Pseudorandom Number Generators for Cryptographic Applications. NIST Special Publication 800–22. <http://csrc.nist.gov/groups/ST/toolkit/rng/documents/SP800–22b.pdf>.

© Зеленицкая Анастасия Викторовна, Иванов Михаил Александрович (fkb-info@gubkin.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ КОНЕЧНОЙ МАРКОВСКОЙ ЦЕПЬЮ С НЕЧЁТКО ЗАДАННОЙ ВЕРОЯТНОСТНОЙ МЕРОЙ

Карманов Анатолий Вячеславович

Д.ф.-м.н., профессор, РГУ нефти и газа (НИУ) имени

И. М. Губкина

abkar2007@yandex.ru

Попадько Владимир Ефимович

К.т.н., профессор, РГУ нефти и газа (НИУ) имени

И. М. Губкина

pve@gubkin.ru

OPTIMAL CONTROL WITH A FINITE MARKOV CHAIN AND A FUZZY GIVEN PROBABILITY MEASURE

**A. Karmanov
V. Popadko**

Summary. The article poses the problem of controlling a homogeneous Markov chain, which is often found in applications, under conditions when the probability measure on the trajectory space of this chain is not clearly defined, i.e. the measure is an unknown element of some certain set of probability measures. In this case, the problem of optimal control with such Markov chain with a guaranteed income functional and maximum guaranteed income optimality criterion is formulated. An iterative procedure for solving the problem is given.

Keywords: homogeneous finite Markov chain with income controlled finite Markov chain, Cesario limit of the stochastic matrix, the Markov chain optimal control with income.

Аннотация. В статье ставится задача управления однородной Марковской цепью, часто встречающаяся в приложениях, в условиях, когда вероятностная мера на пространстве траекторий этой цепи задана не чётко, т.е. мера является неизвестным элементом некоторого определённым образом заданного множества вероятностных мер. При этом формулируется задача оптимального управления такой Марковской цепью с функционалом — гарантированный доход, и критерием оптимальности — максимум гарантированного дохода. Приводится итерационная процедура решения поставленной задачи.

Ключевые слова: однородная конечная Марковская цепь с доходом, управляемая конечная Марковская цепь, предел по Чезаро стохастической матрицы, оптимальное управление Марковской цепью с доходом.

1. Постановка задачи

Рассмотрим управляемую конечную Марковскую цепь (УКМЦ), которая задаётся следующей совокупностью данных:

$$(J, p_0, \{U_i, iJ\}, \{h_i(s), s U_i\}), \quad (1)$$

где $J = \{1, \dots, n\}$ — конечное множество состояний, p_0 — n -мерный стохастический вектор-строка, являющийся начальным распределением для УКМЦ, $U_i = \{1, \dots, m(i)\}$ — конечное множество управлений в состоянии $i, i = 1, \dots, n, h_i(s) = [h_{i,1}(s), \dots, h_{i,n}(s),$

$h_{i,n+1}(s)], [h_{i,1}(s), \dots, h_{i,n}(s)]$ - n -мерный стохастический вектор-строка, являющийся при фиксированном i , вектором переходных вероятностей из состояния i в состояние j при управлении $s U_i, j = 1, \dots, n, h_{i,n+1}(s)$ - средний

доход в состоянии i при управлении $s U_i$. При этом средний доход определяется соотношением:

$$h_{i,n+1}(s) = h_{i,1}(s) \cdot c_{i,1}(s) + \dots + h_{i,n}(s) \cdot c_{i,n}(s), \quad (2)$$

где $c_{i,j}(s)$ — доход, получаемый от перехода УКМЦ из состояния i в состояние j при управлении $s, j = 1, \dots, n$. В дальнейшем этот доход будет считаться ограниченной функцией, т.е. $c_{i,j}(s) I_1$ для любых $iJ, J, s U_i, I_1$ — ограниченный числовой интервал вида:

$$[-\beta_0, \beta_0], \text{ где } \beta_0 > 0. \quad (3)$$

Для формулирования стандартной задачи оптимального управления УКМЦ введём следующие обозначения:

1. $U = U_1 x \dots x U_n$ — множество управлений, являющееся прямым

произведением множеств $U_i, i = 1, \dots, n$. Произвольный элемент $u \in U$ будем представлять (в случае необходимости) в виде: $u = (u_1, \dots, u_n)$, где $u_i \in U_i, i = 1, \dots, n$.

2. $h(u) = [h_1(u), \dots, h_n(u)]^T$ — матрица размерности $n \times (n+1)$, где

i -ой строкой является $h_i(u) = [h_{i,1}(u), \dots, h_{i,n}(u), h_{i,n+1}(u)]$, $u_i \in U_i$. Каждому элементу $h(u)$, где $u \in U$, соответствует 1) стохастическая матрица $P(h(u))$ порядка n , i -ая строка которой — $[h_{i,1}(u), \dots, h_{i,n}(u)]$, $i = 1, \dots, n$, 2) вектор дохода $q(h(u)) = [h_{1,n+1}(u), \dots, h_{n,n+1}(u)]^T$.

Стандартная задача оптимального управления УМКЦ состоит в нахождении такого управления $u^* \in U$, которое удовлетворяет соотношению:

$$G(u^*) = \max \{p_0 \Pi(u) \cdot q(u) \mid u \in U\}, \quad (4)$$

где $\Pi(u)$ — предел по Чезаро матрицы $P(h(u))$, т.е. $\Pi(u) = \lim_{n \rightarrow \infty} n^{-1} \cdot [E + P(h(u)) + \dots + P^{n-1}(h(u))]$, $q(u) = q(h(u))$.

Решение задачи (4) существует и определяется по процедуре Р. Ховарда, изложенной, например, в [1]. Однако в приложениях часто возникает ситуация, когда вероятности $h_{i,j}(u)$, где $i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n$, известны с точностью до некоторого интервала, т.е. при каждом фиксированном i выполняются соотношения:

$$h_{i,j}(u) I_j(u), h_{i,l}(u) + \dots + h_{i,n}(u) = 1, \quad (5)$$

$I_j(u)$ — числовой интервал $[h^{(l)}_{i,j}(u), h^{(2)}_{i,j}(u)]$, включенный в интервал $[0, 1]$.

Из соотношений (5), (2) и (3) следует, что каждому управлению $u_i \in U_i$, где $i = 1, \dots, n$, соответствует замкнутый линейный многогранник (симплекс) $D(u_i)$ следующего вида:

$$D(u_i) = \{h_i = [h_{i,1}, \dots, h_{i,n+1}] \mid h_{i,1} + \dots + h_{i,n} = 1, h_{i,j} \geq 0, h_{i,j} I_j(u_i), j = 1, \dots, n\}, \quad (6)$$

где

$$h_{i,n+1} = h_{i,1} \cdot c_{i,1} + \dots + h_{i,n} \cdot c_{i,n}, c_{i,j} \in [-\beta_0, \beta_0], \beta_0 > 0. \quad (7)$$

Замечание 1. Из соотношения (5) следует, что вероятностная мера на пространстве траекторий УМКЦ [2, с.11] определяется нечётко, т.е. при выбранном управлении $u \in U$ она является элементом некоторого множества $S(u)$ вероятностных мер, каждая из которых может в равной степени определять решение стандартной задачи.

Если ввести обозначение $D(u) = D(u_1) \times \dots \times D(u_n)$, то в условиях замечания 1 стандартную задачу можно

трансформировать в следующую задачу 1: найти такое управление $u^* \in U$, для которого выполняется соотношение:

$$g(u^*) = \max \{g(u) \mid u \in U\}, \quad (8)$$

где

$$g(u) = \inf \{p_0 \Pi(h) \cdot q(h) \mid h \in D(u)\}, \quad (9)$$

$\Pi(h)$ — предел по Чезаро стохастической матрицы $P(h)$, в которой i -ая строка равна $[h_{i,1}, \dots, h_{i,n}]$, $i = 1, \dots, n$, а вектор дохода $q(h) = [h_{1,n+1}, \dots, h_{n,n+1}]^T$, $h_{i,n+1}$ соотношением (7).

Замечание 2. Из (9) и (8) следует, что $g(u)$ является гарантированным доходом при управлении $u \in U$, а $g(u^*)$ является максимальным гарантированным доходом на УМКЦ. При этом, именно управление $u^* \in U$ в задаче 1 объявляется оптимальным управлением УМКЦ с нечётко заданной вероятностной мерой на пространстве траекторий этой цепи.

В [2] доказано, что задача 1 эквивалентна задаче 2, т.е. управление $u^* \in U$, для которого выполняются соотношения (8), (9), удовлетворяет следующим соотношениям:

$$g_i(u^*) = \max \{r(t(u)) \mid u \in U\}, r(t(u)) = \inf \{r(h) \mid h \in D(u)\}, \quad (10)$$

где

$$r(h) = \Pi(h) \cdot q(h). \quad (11)$$

Отметим, что из (10) и (11) следует выполнение следующих векторных соотношений:

$$r(t(u)) \leq r(h) \text{ для любого } h \in D(u), \quad (12)$$

$$g_i(u^*) \geq r(t(u)) \text{ для любого } u \in U, \quad (13)$$

где неравенства для рассматриваемых векторов понимаются как покомпонентные неравенства. Таким образом, $g_i(u^*)$ является максимальным вектором гарантированного дохода. При этом управление u^* не зависит от начального распределения p_0 .

Ниже излагается процедура, которая решает за конечное число итераций задачу 2 для случая, когда характеристики $D(u_i)$, где $u_i \in U_i, i = 1, \dots, n$, являются замкнутыми линейными многогранниками — симплексами, задаваемыми выражением (6).

2. Решение вспомогательных задач

Итерационная процедура решения задачи 2 основывается на алгоритмах решения ряда вспомогательных задач.

2.1. Вспомогательная задача 2.1

Введём следующее обозначение для множества всех стохастических векторов размерности n :

$$P_{1,n} = \{z = (z_1, \dots, z_n) \mid z_i \geq 0, z_1 + \dots + z_n = 1\}, \quad (14)$$

и сформулируем первую вспомогательную задачу 2.1.

Задача 2.1. Пусть имеется симплекс D :

$$D = \{z = [z_1, \dots, z_n] \in P_{1,n} \mid 0 \leq p_i^{(1)} \leq z_i \leq p_i^{(2)}, p_i^{(1)} < p_i^{(2)} \ i = 1, \dots, n\}, \quad (15)$$

и пусть имеются две линейные формы, имеющие вид

$$F_k(z) = a_0^{(k)} + a_1^{(k)}z_1 + \dots + a_n^{(k)}z_n, \quad k = 1, 2. \quad (16)$$

Тогда необходимо найти один из следующих двух элементов, принадлежащих симплексу D :

1. Элемент $z^{(1)}$, который удовлетворяет условию:

$$F_1(z^{(1)}) > 0, \quad (17)$$

2. В том случае, если $F_1(z^{(1)}) = 0$, найти элемент $z^{(2)}$, который удовлетворяет условию:

$$F_2(z^{(2)}) = \min \{F_2(z) \mid z, F_1(z) = 0\} > 0. \quad (18)$$

В случае, когда элементы $z^{(1)}$ и $z^{(2)}$, удовлетворяющие условиям (17), (18), не существуют, то будем считать, что решение задачи 2.1 отсутствует.

Задача 2.1 решается в соответствии с общим алгоритмом симплекс-метода [3].

2.2. Вспомогательная задача 2.2

Задача 2.2. Пусть имеются симплекс D , определяемый выражением (15), и три линейные формы, имеющие вид:

$$F_k(z) = a_0^{(k)} + a_1^{(k)}z_1 + \dots + a_n^{(k)}z_n, \quad k = 1, 2, 3, \quad (19)$$

где z . При этом линейные формы обладают следующим свойством: существует такой элемент, для которого выполняются равенства

$$F_k(t) = 0, \quad k = 1, 2, 3. \quad (20)$$

Тогда необходимо найти такие элементы $z^{(1)}$, $z^{(2)}$ и $z^{(3)}$ из симплекса D , которые удовлетворяют одному из следующих трех условий:

$$1. F_1(z^{(1)}) = \min \{F_1(p_i)\} < 0, \quad (21)$$

$$2. \text{ Если } F_1(z^{(1)}) = 0, \text{ то } F_2(z^{(2)}) = \min \{F_2(z) \mid F_1(z) = 0\} < 0, \quad (22)$$

3. Если $F_1(z^{(1)}) = F_2(z^{(2)}) = 0$, то

$$F_3(z^{(3)}) = \min \{F_3(z) \mid F_1(z) = 0, F_2(z) = 0\} \leq 0. \quad (23)$$

Отметим, что из соотношения (20) следует, что задача 2.2 всегда имеет решение, которое может быть найдено по общему алгоритму симплекс-метода [3].

2.3. Вспомогательная задача 2.3

Ниже ставится и решается вспомогательная задача 2.3 по определению основных стационарных характеристик однородной конечной Марковской цепи с доходом $\zeta(p_0, h)$, задаваемой начальным распределением p_0 , матрицей переходных вероятностей $P(h)$ и вектором дохода $q(h)$, где $h = (h_1, \dots, h_n) \in H^n, h_i \in H, i = 1, \dots, n, H = x[-\beta_0, \beta_0]$. Отметим, что $D(u)$ является подмножеством множества H^n для любого $u \in U$.

Задача 2.3. Пусть имеется однородная Марковская цепь с доходом $\zeta(p_0, h)$, которая имеет $n(h)$ эргодических классов состояний, где $n(h) \in \{1, \dots, n\}$. Необходимо определить стационарные характеристики этой цепи где $\Pi(h) \cdot q(h)$, $\Pi(h)$ - предел по Чезаро матрицы $P(h)$, — вектор первого «веса», — фундаментальная матрица Марковской цепи $\zeta(p_0, h)$, — вектор второго «веса».

Ниже приводится алгоритм 2.3 решения задачи 2.3, основанный на решении рекуррентных систем линейных уравнений, приведенных в разделе 2.3.2 [2].

Алгоритм 2.3 определения стационарных характеристик представляет собой следующую двухшаговую вычислительную процедуру.

Шаг 1. Для каждого m -го эргодического класса состояний однородной Марковской цепи $\zeta(p_0, h)$, где определяются (рекуррентно по $k = 1, 2, 3$) величины: c_m^k и $w_{k,i}^0$ как единственное решение системы линейных уравнений

$$c_m^k + w_{k,i}^0 = b_i^{k-1} + \sum_{j=1}^n p_{ij} \cdot w_{k,j}^0, \quad i \in J_m(h) \quad (24)$$

где $J_m(h)$ — множество состояний, образующее m -й эргодический класс, $b_i^0 = q_i(h)$ — i -я компонента вектора $q(h)$, $b_i^1 = -w_{1,i}^0$, $b_i^2 = -w_{2,i}^0$, p_{ij} — соответствующий элемент матрицы $P(h)$ и одно любое равно нулю.

Далее, положив $r_i = c_m^1$, $w_{1,i} = w_{1,i}^0 + c_m^2$, $w_{2,i} = w_{2,i}^0 + c_m^3$ если $i \in J_m(h)$, перейдем к реализации второго шага алгоритма.

Шаг 2. Для класса невозвратных состояний Марковской цепи $\zeta(p_0, h)$ определяются величины:

2.1. r_i и $w_{1,i}$, где $i \in J_0(h)$ как единственное решение системы линейных уравнений:

$$\begin{aligned} r_i &= \sum_{j=1}^n p_{i,j} \cdot r_j, r_i + w_{1,i} = \\ &= q_i + \sum_{j=1}^n p_{i,j} \cdot w_{1,j}, i \in J_0(h), \end{aligned} \quad (25)$$

где $w_{1,j}, r_j$ — величины, определенные на шаге 1,

$$j \in [J_1(h) + \dots + J_n(h)(h)]$$

2.2. $w_{2,i}, i \in J_0(h)$ как единственное решение системы линейных уравнений:

$$w_{2,i} = -w_{1,i} + \sum_{j=1}^n p_{i,j} \cdot w_{2,j}, i \in J_0(h), \quad (26)$$

где величина $w_{2,j}$ при $j \in [J_1(h) + \dots + J_n(h)(h)]$ определяется на шаге 1 алгоритма 2.3. Действие алгоритма завершается.

Таким образом, по алгоритму 2.3 определяются три вектора

$$r(h) = [r_1, \dots, r_n]^T, w_1(h) = [w_{1,1}, \dots, w_{1,n}]^T,$$

$$w_2(h) = [w_{2,1}, \dots, w_{2,n}]^T.$$

1.4. Вспомогательная задача 2.4

Ниже ставится задача 2.4, решение которой представляет собой основу итерационной процедуры решения исходной задачи 2 оптимального управления, определяемой выражением (10).

Задача 2.4. Пусть имеется управление

$$u = [u_1, \dots, u_n] \in U.$$

Тогда в множестве $D(u) = D_1(u_1) \times \dots \times D_n(u_n)$, $D_i(u_i)$, где — симплекс, определяемый выражением (6), $i = 1, \dots, n$ необходимо найти такой элемент $t(u)$, для которого справедливо выражение

$$r(t(u)) \leq r(h), \forall h \in D(u) \quad (27)$$

В разделе 4.3 [2] доказывается, что $t(u)$ существует в каждом множестве, где, и является 1-минимальным элементом в множестве $D(u)$, т.е. для $t(u)$ выполняется соотношение:

$$r(t(u)) = \min \{r(h): h \in D(u)\} \quad (28)$$

Следующий алгоритм 2.4, основанный на решении задач 2.2 и 2.3, позволяет решить задачу 2.4. Алгоритм 2.4 представляет собой итерационную пошаговую процедуру, в которой на каждом m -ом шаге ($m = 0, 1, 2, \dots, m_0$) производятся следующие вычислительные действия.

1. Для имеющегося элемента $h^{(m)} \in D(u)$, где $h^{(0)}$ — любой элемент из множества $D(u)$, по алгоритму 2.3 определяются векторы $r(h^{(m)})$, $w_1(h^{(m)})$, $w_2(h^{(m)})$

2. Для каждого i , где $i = 1, \dots, n$, по алгоритму 2.2 решается задача 2.2, где $D = D_i(u_i)$ — симплекс, определяемый выражением (6), $t = h^{(m)}$ — элемент, для которого выполняются равенства (20), $z = p_i(h_i)$,

$$F_1(p_i(h_i)) = [p_i(h_i) - e_i]r(h^{(m)}),$$

$$F_2(p_i(h_i)) = q_i(h_i) + [p_i(h_i) - e_i]w_1(h^{(m)}) - r_i(h^{(m)}),$$

$$F_3(p_i(h_i)) = [p_i(h_i) - e_i]w_2(h^{(m)}) - w_{1,i}(h^{(m)}), \quad (29)$$

e_i — n -мерный вектор-строка, в котором i -я компонента равна единице, а остальные — нулю.

Возможные варианты решения задачи 2.2 имеют вид:

2.1. Если $F_1(z^{(2)}) < 0$, то положить: $h_i^{(m+1)} = z^{(1)}$.

2.2. Если $F_1(z^{(2)}) = 0, F_2(z^{(2)}) < 0$, то положить: $h_i^{(m+1)} = z^{(2)}$.

2.3. Если $F_1(z^{(3)}) = F_2(z^{(3)}) = 0, F_3(z^{(3)}) < 0$ то положить: $h_i^{(m+1)} = z^{(3)}$.

2.4. Если $F_1(z^{(1)}) = F_2(z^{(2)}) = F_3(z^{(3)}) = 0$, то положить: $h_i^{(m+1)} = z^{(m)}$.

В результате выполнения действий пункта 2 возможны следующие исходы:

- ♦ $h_i^{(m+1)} = h^{(m)}$, тогда полагаем и действие алгоритма 2.4 прекращается;
- ♦ $h_i^{(m+1)} \neq h^{(m)}$, тогда делается переход к следующему $(m+1)$ -му шагу алгоритма 2.4.

С помощью алгоритма 2.4 в множестве

$$D(u) = D_1(u_1) \times \dots \times D_n(u_n),$$

где $u \in U$, за конечное число m_0 итераций определяется минимальный элемент $t(u)$, т.е. элемент, для которого справедливо выражения (27), (28).

3. Решение задач 1 и 2

Ниже приводится итерационная процедура, позволяющая отыскать за конечное число итераций оптимальное управление u^* , для которого выполняется соотношение (10) и, следовательно (7), (8), т.е. эта процедура решает как задачу 2, так и задачу 1.

Итерационная процедура представляет собой пошаговую процедуру, в которой на каждом k -ом шаге, где $k = 0, 1, \dots, \omega$, производятся следующие действия.

1. Для управления выбирается произвольно из множества U , в множестве D (с помощью алгоритма 2.4 вычисляется элемент и по алгоритму 2.3. вектора $r(t^{(k)})$, $w_1(t^{(k)})$, $w_2(t^{(k)})$). Далее осуществляется переход к пункту 2 этой процедуры;

2. Для каждого i , где $i = 1, \dots, n$, и для каждого u_i применяется алгоритм решения задачи 2.1, где — симплекс, определяемый выражением (6), $z = p_i(h_i)$, n -мерный вектор-строка, в котором i -я компонента равна единице, а остальные — нулю. При этом возможны следующие исходы:

2.1. Если отыскивается такое управление u_i для которого решение задачи 2.1 существует, то:

2.1.1. Если $F_1(z^{(1)}) = \{F_1(z) \mid z \in D\} > 0$, то $u_i^{(k+1)} = z^{(1)}$.

2.1.2. Если $F_1(z^{(2)}) = 0$, $F_2(z^{(2)}) = \min \{F_2(z) \mid z, F_1(z) = 0\} > 0$, $u_i^{(k+1)} = z^{(2)}$.

2.2. Если для управления $u_i \in U_i$ решение задачи 2.1 не существует, то полагаем $u_i^{(k+1)} = u_i^{(k)}$.

В результате вычислений по пункту 2 возможны следующие исходы:

А. Если $u_i^{(k+1)} = u_i^{(k)}$ для каждого i , где $i = 1, \dots, n$, то полагаем $u^* = (u_1^{(k)}, \dots, u_n^{(k)}) \in U$, и действие процедуры прекращается.

Б. Если $u_i^{(k+1)} \neq u_i^{(k)}$ хотя бы для одного i , где $i = 1, \dots, n$, то делается переход к следующему $(k+1)$ -му шагу п. 1 настоящей процедуры.

В результате осуществления изложенной итерационной процедуры строится конечная последовательность управлений $\{u^k, k=1, \dots, \omega\}$ из множества U , для которой выполняются соотношения

$$r(t^{(k-1)}) < r(t^{(k)}) \quad k = 1, \dots, \omega, \tag{30}$$

где $t^{(v)} = t(u^{(v)})$ — минимальный элемент в множестве $D(u^{(v)})$, $v = 0, \dots, \omega$.

При этом из теоремы 1 (п. 2.2) раздела 8.2 и процедуры 1 раздела 5.2 [2] непосредственно следует, что полученное управление $u^* = u^{(\omega)}$ является решением задачи 2 и, следовательно, задачи 1.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ховард Р. А. Динамическое программирование и марковские процессы — М.: Советское радио, 1964. 189 с.
2. Карманов А. В. Исследование управляемых конечных марковских цепей с неполной информацией. — М.: Физматлит, 2002. 173 с.
3. Карманов В. Г. Математическое программирование. — М.: Физматлит, 2000. 256 с.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ВОДОНЕФТЯНЫХ ЭМУЛЬСИЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

PREDICTING THE STABILITY OF WATER-IN-OIL EMULSIONS BASED ON FUZZY LOGIC METHODS

**О. Kochueva
V. Itkin**

Summary. The dependence of the stability of water-in-oil emulsions on various factors was investigated. In the research [6], a stability index is introduced, and various mathematical models are proposed for its prediction. Our study provides the examination of the shortcomings of these models and offers two more reliable methods for predicting the emulsion stability index: based on the regression analysis and based on the fuzzy logic methods.

Keywords: water-in-oil emulsions, stability index, regression analysis, fuzzy logic, neuro fuzzy systems.

Кочуева Ольга Николаевна

*К.т.н., доцент, РГУ нефти и газа (НИУ) имени
И. М. Губкина
olgakoch@mail.ru*

Иткин Виктор Юрьевич

*К.т.н., доцент, РГУ нефти и газа (НИУ) имени
И. М. Губкина
itkin.v@gubkin.ru*

Аннотация. Исследуется зависимость стабильности водонефтяных эмульсий от различных факторов. В работе [6] вводится индекс стабильности и предлагаются различные математические модели для его прогнозирования. В нашей статье мы исследуем недостатки этих моделей и предлагаем два более надежных метода для прогнозирования индекса стабильности эмульсий: на основе регрессионного анализа и на основе методов нечеткой логики.

Ключевые слова: водонефтяная эмульсия, индекс стабильности, регрессионный анализ, нечеткая логика, нейро-нечеткие сети.

Изучение свойств нефтяных, топливных и битумных эмульсий важно для совершенствования многих технологических процессов добычи, переработки и утилизации нефти и нефтепродуктов. Математические модели для прогнозирования стабильности водонефтяных эмульсий еще недостаточно разработаны исследователями.

Образование водонефтяных эмульсий происходит под влиянием различных факторов [1,2,3]. Добываемая сырая нефть обычно содержит значительные примеси воды, и первичный продукт представляет собой водонефтяную эмульсию. Водонефтяные эмульсии могут образовываться при нагнетании воды в пласт (по разным источникам более 80% пластов подвергаются заводнению). Причем, эмульсия может образоваться не только в призабойной зоне, но и на некотором отдалении от нее, определяемом зоной проникновения воды в пласт. Образование в пористой среде стойких водонефтяных эмульсий является одной из основных причин снижения естественной проницаемости призабойной зоны.

При фонтанном способе добычи наибольшее перемешивание нефти и воды происходит в подъемных трубах и при прохождении нефтегазовой смеси через штуцеры. При механизированных способах добычи наиболее устойчивые водонефтяные эмульсии образуются при использовании электроцентробежных насосов (перемешивание продукции в рабочих колесах). При использовании штанговых и винтовых насосов образуются

менее стойкие эмульсии. При компрессорном способе добычи получают эмульсии крайне высокой стойкости из-за того, что происходит окисление нафтеновых кислот с образованием соединений, которые являются эффективными эмульгаторами. При движении газированных обводненных нефтей в системе сбора также возможно образование эмульсий. Основной причиной здесь является энергия турбулентного потока.

Кроме того, эмульсии образуются при разливах нефтепродуктов.

Традиционно исследователи выделяют эмульсии двух видов: гидрофобные В-Н (вода в нефти) и гидрофильные Н-В (нефть в воде). Кроме того, в последнее время рассматривают третий вид — «множественные эмульсии», для которых характерно повышенное содержание различных механических примесей. Известно, что чем меньше поверхностное натяжение на границе нефть — вода, тем лучше будут диспергироваться вода в нефти и нефть в воде. Низкое поверхностное натяжение в свою очередь зависит от наличия поверхностно-активных компонентов в нефти и воде. Наиболее поверхностно-активными компонентами нефти являются нафтеновые кислоты, асфальтены, смолы и парафины [6]. Кроме того, устойчивость нефтяных эмульсий зависит от величины глобул воды (ее дисперсности), плотности и вязкости нефти, содержания в ней легких фракций углеводородов, а также от состава и свойств эмульгированной воды [3,4].

В работе [6] автор предлагает две регрессионные модели для прогнозирования показателя стабильности нефтяной эмульсии. В первую модель включены 15 эффектов (нелинейных слагаемых), зависящих от 5 измеряемых параметров (D – плотность, г/мл, V — вязкость, мПа/с, S — парафины,%, R — смолы,%, A — асфальтены,%). Автор проверил значимость коэффициентов по критерию Стьюдента и оказалось, что только 4 из них значимы, т.е. существенно влияют на результат. Во вторую модель включены 16 эффектов, из которых лишь один значим. Несмотря на это, все незначимые эффекты были сохранены в моделях.

Нелинейные слагаемые имеют сильно отличающиеся масштабы и скорости роста, например e^{e^D} или $\ln(\ln V)$. Коэффициенты имеют разный масштаб, от 2.88×10^{-10} до 9520. Такие модели обычно оказываются плохо обусловленными.

В статье приведены некоторые статистические данные, позволяющие оценить качество этих моделей: значения входных параметров (плотность, вязкость, смолы, асфальтены — т.е. все, кроме парафинов), измеренный индекс стабильности и его прогнозируемые значения по двум моделям. Модель 1 равномерно описывает приведенные данные с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.45$, а модель 2 — неравномерно: для одной части выборки (83 наблюдения) коэффициент детерминации равен $R^2 = 0.54$, а для другой (41 наблюдение) он отрицателен и равен $R^2 = -6.2$. Для всей выборки в целом он тоже отрицателен и равен $R^2 = -0.75$.

Воспроизвести эти модели в полной мере оказалось невозможно, так как в статье не приведены данные по содержанию парафинов. Но, даже по имеющимся данным можно оценить качество моделей. Число обусловленности матрицы нормальной системы уравнений (без учета парафинов) для модели 1 равно 6×10^8 , для модели 2 — 2.5×10^{13} . С учетом парафинов этот показатель был бы еще больше, что говорит о большой чувствительности модели к точности входных данных.

Мы предлагаем другие модели, которые, по нашему мнению, лучше подходят для описания зависимости индекса стабильности эмульсии от измеряемых показателей.

Рассмотрим регрессионную модель

$$\text{Stability} = 86.5 - 76.5D - 2.13 \ln V + 545 \frac{A}{R^3}$$

Все коэффициенты значимы, коэффициент детерминации равен 0.68, число обусловленности матрицы нормальной системы уравнений равно 1602, что говорит о хорошей обусловленности модели. Анализ остатков

показал, что они удовлетворяют основным требованиям регрессионного анализа: несмещенностью (математическое ожидание не зависит от факторов и равно нулю), гомоскедастичностью (дисперсия не зависит от факторов), некоррелированностью и нормальным распределением. Переносимость модели мы проверили с помощью теста Чоу: при разбиении выборки на обучающую и тестовую (в соотношении 2:1), коэффициенты, оцененные для каждой части и всей выборки в целом, статистически не различимы. Стандартное отклонение остатков равно 5.7, т.е. 95%-я погрешность модели около 12. Поскольку значения индекса стабильности меняются в диапазоне $[-20;30]$ для имеющихся данных, то относительная погрешность превышает 40%.

Таким образом, предлагаемая модель адекватно описывает данные, ее качество выше моделей [6], но она все же мало пригодна для прогнозирования.

Предлагается опробовать другой подход — построение нечеткой нейронной сети. Для набора входных переменных будет построена система нечеткого вывода, основанная на алгоритме Сугено [7, 8, 9]. Значения констант для выходной переменной системы нечеткого вывода будут определены в процессе обучения нейронной сети. Первый вопрос, который возникает в процессе исследования, — какие показатели следует включить в набор входных переменных? Желание включить максимальное число показателей ограничивается объемом имеющихся данных.

Для построения системы нечеткого вывода необходимо для каждой входной переменной определить термы и функции принадлежности. Следует отметить, что в случае, если выбраны 4 входные переменные и для каждой будет задано по 3 терма, нейронная сеть будет определять значения 81 константы для выходной переменной. Это требует значительного объема исходных данных. Если для одной из переменных сократить число термов до 2, количество констант уменьшится до 54. Для случая двух термов для двух входных переменных и трех для двух других число констант уменьшится до 36. Для представленного объема данных имеет смысл рассматривать именно последний вариант. Таким образом, в число входных переменных предлагается включить плотность (выделяя 2 терма — “средняя” и “высокая”), вязкость с тремя термами (“низкая”, “средняя” и “высокая”), содержание смол с двумя термами и содержание асфальтенов с тремя термами. Из имеющихся данных случайным образом были отобраны 15% для формирования тестовой выборки. Была произведена проверка репрезентативности отбора, так чтобы значения параметров для отобранных точек равномерно охватывали диапазон изменения параметров для данных в целом. Оставшиеся данные были использованы в качестве обучающей вы-

борки. Для обучающей выборки получено стандартное отклонение остатков 5.05, для тестовой выборки — 3.26. Полученная ошибка на тестовой выборке не превышает ошибку на обучающей выборке, из чего можно сделать вывод, что обучение прошло успешно, сеть не является переобученной. Для всего объема данных стандартное отклонение остатков 4.87, что лучше результата для регрессионной модели. Коэффициент детерминации для всей выборки равен $R^2 = 0.76$, что свидетельствует о том, что предлагаемая модель удовлетворительно описывает исходные данные. Кроме того, следует отметить, что исследование в работе [6] было направлено на изучение стабильности водонефтяных эмульсий, которые могут образовываться в результате разливов нефтепродуктов. Для этого применения не столь важно совпадение прогнозируемых и реальных индексов стабильности, сколь-

ко качественное определение будет ли являться образующаяся эмульсия стабильной, мезостабильной или нестабильной. Получаемые значения показали хорошее согласование при проведении качественной оценки стабильности.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что даже при наличии не столь большого объема данных, который требуется для применения нейронных сетей (для анализа были использованы результаты 124 замеров), нечеткие нейронные сети могут давать удовлетворительные результаты для прогнозирования стабильности водонефтяных эмульсий и показали лучший результат в сравнении с результатами, полученными с помощью регрессионных моделей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жумаев К. К., Хабибов Х. Причины образования водонефтяных эмульсий // Молодой ученый. — 2016. — № 2. — С. 153–155.
2. Ю. Г. Фролов. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. М., Химия, 1982, 399 с., ил.
3. Р. З. Сафиева, Л. А. Магадова, Л. З. Климова, О. А. Борисова. Физикохимические свойства нефтяных дисперсных систем. Под ред. проф. В. Н. Кошелева — М.: Изд. РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, 2001. — 60 с.
4. Ф. Шерман. Эмульсии. Л., Химия, 1972. — 448 с.
5. Fingas, M., B. Fieldhouse, and J. Mullin, *Studies of Water- In-Oil Emulsions: Stability and Oil Properties*, AMOP, 1, 1998.
6. Fingas M. *Handbook of Oil Spill Science and Technology* Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2015.
7. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. — М.: Бином, 2013, 800 с.
8. Sugeno M., *Industrial applications of fuzzy control*, Elsevier Science Pub. Co., 1985, 269 p.
9. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control. *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernet.* 15, 1985, 116–132.

ОБЩИЙ СЛУЧАЙ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ В ЗАШУМЛЕННЫХ СИГНАЛАХ

Кротов Александр Васильевич

К.т.н., доцент, РГУ нефти и газа (НИУ) имени

И. М. Губкина

a.krotov@sovtigaz.ru

THE GENERAL CASE OF SOLVING THE PROBLEM OF DIFFERENTIATION OF NOISY SIGNALS

A. Krotov

Summary. The general case of differentiation of noisy Gaussian stationary signals close in its characteristics to the optimal differentiator in the mean square sense is considered. The scheme of realization of the differentiator on the basis of systems with variable structure is presented.

Keywords: differentiation, optimal, system with variable structure.

Аннотация. Рассмотрен общий случай дифференцирования зашумленных гауссовских стационарных сигналов, близкий по своим характеристикам к оптимальному в среднеквадратическом смысле дифференциатору. Представлена схема реализации дифференциатора на основе систем с переменной структурой.

Ключевые слова: дифференцирование, оптимальный, система с переменной структурой.

Решение задачи идентификации параметров математических моделей технологических объектов в ряде случаев связано с определением производных первого и второго порядка от переходных характеристик, полученных в результате прямых измерений контролируемых технологических параметров. Однако поиск производных затруднен наличием в измеряемых сигналах шумов.

В статье предлагается близкий к оптимальному в среднеквадратическом смысле метод решения задач дифференцирования гауссовских стационарных сигналов. Задача решается с помощью нелинейных динамических систем, а методом исследования этих систем является метод статистической линеаризации.

Постановка задачи дифференцирования.

Будем рассматривать сигнал следующего вида:

$$y(t) = x(t) + \xi(t) \tag{1}$$

где: $x(t)$ — полезный стационарный гауссовский сигнал, $\xi(t)$ — некоррелированная с $x(t)$ стационарная гауссовская помеха.

При этом будем считать, что спектральные плотности полезного сигнала и помехи известны с точностью до уровня, то есть спектральная плотность полезного сигнала:

$$f_x(Q, \omega) = \frac{Q \cdot (\sum_{j=1}^{m-p} b_j \cdot \omega^{2j+1})}{\sum_{j=1}^n a_j \cdot \omega^{2j+1}} \tag{2}$$

где: $m < n$, $m - p > 0$, m, n, p, b_j, a_j — известные параметры, $Q > 0$ — неизвестный параметр.

Спектральная плотность помехи:

$$f_{\xi}(R, \omega) = \frac{R \cdot \sum_{l=1}^e b_l \cdot \omega^{2 \cdot l}}{\sum_{l=1}^d a_l \cdot \omega^{2 \cdot l+1}} \tag{3}$$

где: $d \leq n$, e, d, a_l, b_l — известные параметры, $R > 0$ — неизвестный параметр.

В работе [1] показано, что передаточная функция оптимального с точки зрения минимума среднеквадратической ошибки фильтра определяется соотношением:

$$W_o\left(\frac{Q}{R}, i\omega\right) = \frac{\sum_{j=0}^n k_j \left(\frac{Q}{R}\right) \cdot (i\omega)^j}{\sum_{j=0}^{n-1} k_j \left(\frac{Q}{R}\right) \cdot (i\omega)^j + (i\omega)^n} \tag{4}$$

где: k_j, \hat{k}_j — параметры передаточной функции

$$W_o\left(\frac{Q}{R}, i\omega\right),$$

являются непрерывной функцией отношения Q/R .

Оптимальный фильтр (4) реализуется по схеме, приведенной на рис. 1.

Передаточная функция оптимального дифференциатора (4) используется для синтеза нелинейного дифференциатора переменной структуры, эквивалентная передаточная функция которого будет близка к передаточной функции оптимального дифференциатора при любых значениях отношения Q/R . Близость этих передаточных функций при произвольных Q/R будет гаранти-

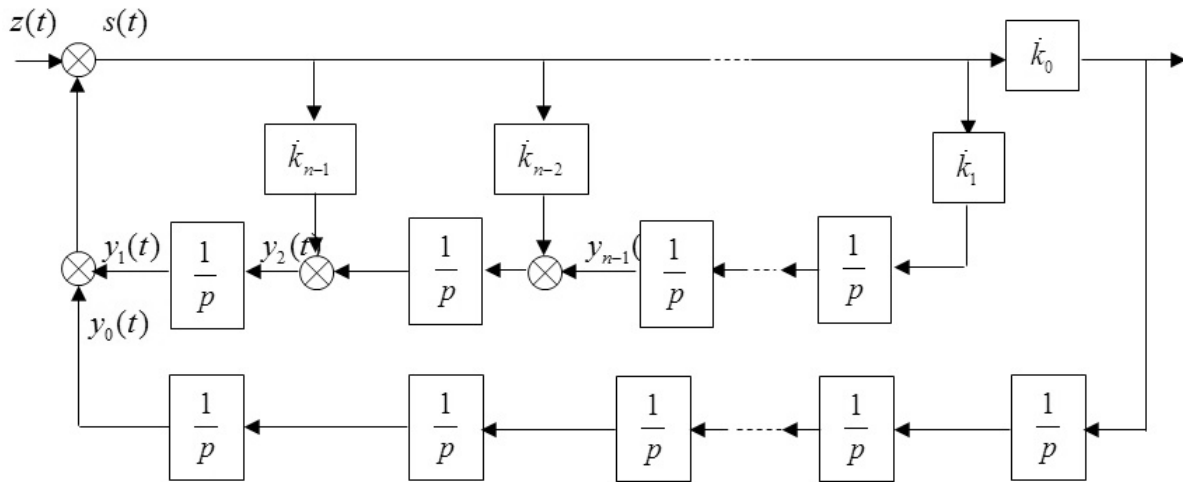


Рис. 1. Схема оптимального фильтра.

ровать высокое качество дифференцирования нелинейного дифференциатора.

Нелинейные близкие к оптимальным дифференциаторы синтезируем с помощью переключающих элементов систем с переменной структурой вида:

$$u_a(t) = \begin{cases} u_a^*(t), & \text{при } s(t) > 0 \\ -u_a^*(t), & \text{при } s(t) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

где $u_a^*(t)$ — некоторая неотрицательная функция, имеющая вид:

$$u_a^*(t) = k_{ga} \cdot |g(t)|^a \cdot |s(t)|^{1-a}$$

где $g(t)$ — линейное преобразование $y(t)$.

$s(t)$ — сигнал ошибки оптимального фильтра, связан с $y(t)$ передаточной функцией:

$$W_{ys}(i\omega) = \frac{(i\omega)^n}{\sum_{j=0}^{n-1} k_j \left(\frac{Q}{R}\right) (i\omega)^j + (i\omega)^n} \quad (6)$$

Переключающий элемент с логикой (5), (6) будем называть Ψ_s^a -элементом.

Найдем эквивалентный коэффициент передачи Ψ_s^a -элемента, обеспечивающий минимальную среднеквадратическую ошибку:

$$\sigma^2 = M\{[u'(t) - u_a(t)]^2\} = \min \quad (7)$$

Где

$$u'(t) = k_{\Psi_s^a} \cdot s(t) \quad (8)$$

Выражение (7) справедливо в предположении, что $g(t)$ и $s(t)$ имеют нулевые математические ожидания. Минимум выражения (2.13) ищется из условий:

$$\frac{\partial \sigma^2}{\partial k_{\Psi_s^a}} = \frac{\partial M\{[u'(t) - u_a(t)]^2\}}{\partial k_{\Psi_s^a}} = 0 \quad (9)$$

После дифференцирования (9) получаем:

$$k_{\Psi_s^a} = \frac{M\{u_a(t) \cdot s(t)\}}{M\{s^2(t)\}} \quad (10)$$

Считая, что $g(t)$ и $s(t)$ — независимые гауссовские сигналы, получим выражение для $k_{\Psi_s^a}$:

$$k_{\Psi_s^a} = \frac{k_{ga} \cdot \sigma_g^a}{\pi \cdot \sigma_s^a} \cdot \Gamma\left(\frac{a+1}{2}\right) \cdot \Gamma\left(\frac{3-a}{2}\right) \quad (11)$$

Из (11) видно, что эквивалентный коэффициент передачи $k_{\Psi_s^a}$ зависит от отношения дисперсий, характеризующих сигналы $g(t)$ и $s(t)$.

Отмеченные свойства оптимального дифференциатора и найденный эквивалентный коэффициент передачи $k_{\Psi_s^a}$ (11) Ψ_s^a -элемента дают возможность синтезировать нелинейный дифференциатор, эквивалентная передаточная функция которого близка при произвольных отношениях Q/R к передаточной функции оптимального дифференциатора, что гарантирует его устойчивость.

Для этого достаточно, чтобы знаменатель эквивалентной передаточной функции дифференциатора при произвольных отношениях Q/R был близок к передаточной функции оптимального дифференциатора. В этом случае устойчивость искомого дифференциатора будет обеспечена автоматически, так как оптимальный дифференциатор, рассчитанный из условия минимума среднеквадратической ошибки, всегда устойчив.

Добиться близости знаменателей эквивалентной передаточной функции нелинейного дифференциатора и

$$W_o\left(\frac{Q}{R}, i\omega\right) \quad (4)$$

можно, заменив элементы \dot{k}_j ($j=1, \dots, n$) Ψ_s^a -элементами так, чтобы их эквивалентные коэффициенты передачи при любом значении отношения Q/R были сколь угодно близки к

$$\dot{k}_j\left(\frac{Q}{R}\right).$$

Для проведения такой замены необходимо установить связь между эквивалентным коэффициентом передачи $k_{\Psi_s^a}$ (11) и отношением Q/R .

Пусть одним из входных сигналов Ψ_s^a -элемента является сигнал $s(t)$, дисперсия которого определяется помехой:

$$\sigma_s^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{R \cdot \sum_{l=1}^e b_l \cdot \omega^{2l}}{\sum_{l=1}^d a_l \cdot \omega^{2l+1}} d\omega = R \cdot A \quad (12)$$

В качестве второго сигнала Ψ_s^a -элемента, возьмем выходной сигнал $g(t)$ низкочастотного линейного фильтра с передаточной функцией $W_{yg}(i\omega)$, на входе которого действует наблюдаемый гауссовский сигнал $y(t)$.

В силу того, что фильтр низкочастотный, гауссовский сигнал $g(t)$ будет определяться низкочастотной составляющей сигнала $y(t)$. Дисперсия сигнала $g(t)$ имеет вид:

$$\begin{aligned} \sigma_g^2 &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W_{yg}(i\omega)|^2 f_{yx}(Q, R, \omega) d\omega = \\ &= Q \cdot B + R \cdot C \end{aligned} \quad (13)$$

где

$$B = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W_{yg}(i\omega)|^2 \frac{\sum_{j=1}^{m-p} b_j \cdot \omega^{2j+1}}{\sum_{j=1}^n a_j \cdot \omega^{2j+1}} d\omega \quad (14)$$

$$C = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W_{yg}(i\omega)|^2 \frac{\sum_{l=1}^e b_l \cdot \omega^{2l}}{\sum_{l=1}^d a_l \cdot \omega^{2l+1}} d\omega \quad (15)$$

Или

$$\sigma_g = \sqrt{Q \cdot B + R \cdot C} \quad (16)$$

Эквивалентный коэффициент передачи:

$$k_{\Psi_s^a} = \frac{k_{ga}}{\pi \cdot A^{0.5a}} \cdot \Gamma\left(\frac{a+1}{2}\right) \cdot \Gamma\left(\frac{3-a}{2}\right) \cdot B^{0.5a} \left(\frac{Q}{R} + \frac{C}{B}\right)^{0.5a} \quad (17)$$

Для совпадения знаменателей эквивалентной передаточной функции нелинейного фильтра и передаточной функции оптимального фильтра достаточно каждый из коэффициентов \dot{k}_j ($j=1, \dots, n$) представить с требуемой степенью точности в виде разложения по функциям

$$\dot{k}_j\left(\frac{Q}{R}\right) \approx \sum_{l=1}^{N_j} \dot{k}_{jl}\left(\frac{Q}{R} + D\right)^{\beta_{jl}} \quad (18)$$

Коэффициенты разложения \dot{k}_{jl} совпадут с соответствующими коэффициентами перед степенными функциями в $k_{\Psi_s^a}$ при выполнении равенства:

$$\dot{k}_{jl} = \frac{k_{g2\beta_{jl}} \cdot \Gamma\left(\frac{2\beta_{jl}+1}{2}\right) \cdot \Gamma\left(\frac{3-2\beta_{jl}}{2}\right) \cdot B^{\beta_{jl}}}{\pi \cdot A^{\beta_{jl}}} \quad (19)$$

где

$$\beta_{jl} = \frac{a_{jl}}{2}$$

Отсюда:

$$k_{g2\beta_{jl}} = \frac{\dot{k}_{jl} \cdot \pi \cdot A^{\beta_{jl}}}{\Gamma\left(\frac{2\beta_{jl}+1}{2}\right) \cdot \Gamma\left(\frac{3-2\beta_{jl}}{2}\right) \cdot B^{\beta_{jl}}} \quad (20)$$

Заменяя в (4) каждый из \dot{k}_{jl} группой Ψ_s^a -элементов с параметрами

$$\beta_{jl} = \frac{a_{jl}}{2} \text{ и } k_{g2\beta_{jl}}$$

добьемся того, что знаменатель эквивалентной передаточной функции нелинейного дифференциатора будет с требуемой степенью точности совпадать со знаменателем передаточной функции оптимального дифференциатора при любом отношении Q/R . Следовательно, степень устойчивости нелинейного дифференциатора сколь угодно близка к степени устойчивости оптимального дифференциатора.

Качество дифференцирования будет тем выше, чем меньше

$$\left[W_{\text{эк}}\left(\frac{Q}{R}, i\omega\right) - W_o\left(\frac{Q}{R}, i\omega\right) \right]^2$$

при любых $\frac{Q}{R} > 0$, где $W_{\text{эк}}\left(\frac{Q}{R}, i\omega\right)$ —

эквивалентная передаточная функция нелинейного дифференциатора.

Чтобы добиться приемлемого качества дифференцирования необходимо обеспечить соответствие предельных и допредельных соотношений эквивалентной передаточной функцией нелинейного дифференциатора и передаточной функцией оптимального дифференциатора. В частности, при

$$\frac{Q}{R} \rightarrow \infty$$

передаточная функция

$$W_o\left(\frac{Q}{R}, i\omega\right)$$

близка к величине $W_q(i\omega) = (i\omega)^q$, $q=0, 1, 2, \dots, p$. С другой стороны при

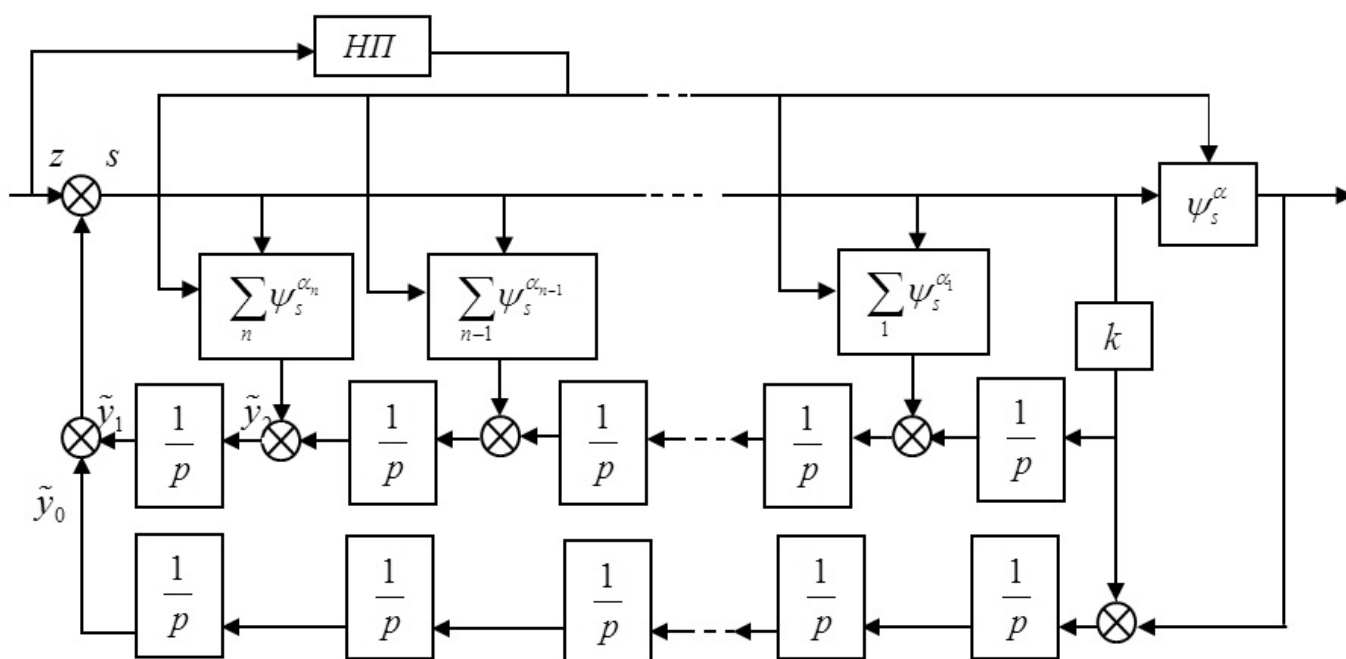


Рис. 2. Схема нелинейного дифференциатора.

$$0 < \frac{Q}{R} < 1 \quad W_o\left(\frac{Q}{R}, i\omega\right)$$

близка к нулю, а при

$$\frac{Q}{R} \rightarrow 0 \quad W_o\left(\frac{Q}{R}, i\omega\right) \rightarrow 0.$$

Введение в схему дифференциатора рис. 1 безынерционных линейных элементов с коэффициентом передачи k , как показано на рис. 2, обеспечит высокое качество дифференцирования при произвольных

$\frac{Q}{R} > 0$, если k удовлетворяет условию:

$$k = \lim_{\frac{Q}{R} \rightarrow 0} \sum_{l=1}^{N_o} \dot{k}_{ol} \cdot \left(\frac{Q}{R} + D\right)^{\beta_{ol}} \quad (21)$$

где $\sum_{l=1}^{N_o} \dot{k}_{ol} \cdot \left(\frac{Q}{R} + D\right)^{\beta_{ol}} = k_{\text{экв}}$

В этом случае получим эквивалентную передаточную функцию нелинейного дифференциатора:

$$W_{\text{экв}}\left(\frac{Q}{R}, i\omega\right) = \frac{(i\omega)^q \cdot [k_{\text{экв}}\left(\frac{Q}{R}\right) - k]}{\sum_{j=0}^{n-1} k_j \left(\frac{Q}{R}\right) \cdot (i\omega)^j + (i\omega)^n} \quad (22)$$

Введение в схему нелинейного дифференциатора элемента k сказалось только на числителе. При этом полученная передаточная функция нелинейного дифференциатора дает необходимые нам предельные соотношения. В частности при

$$\frac{Q}{R} \rightarrow \infty$$

передаточная функция

$$W_{\text{экв}}\left(\frac{Q}{R}, i\omega\right) \rightarrow (i\omega)^q,$$

$q=0, 1, 2, \dots, p$, а при

$$\frac{Q}{R} \rightarrow 0 \quad W_o\left(\frac{Q}{R}, i\omega\right) \rightarrow 0.$$

Таким образом, получили нелинейный дифференциатор, среднеквадратическая ошибка которого в достаточно широком диапазоне

$$\frac{Q}{R} > 0$$

близка к ошибке оптимального линейного дифференциатора.

Можно сказать, что незначительно проигрывая в качестве дифференцирования, нелинейный дифференциатор, во-первых, существенно проще реализуется подстраиваемого оптимального дифференциатора, и во-вторых, время адаптации к изменяющимся параметрам Q и R в нелинейном дифференциаторе, который не требует набора статистики, существенно меньше времени адаптации в подстраиваемом оптимальном дифференциаторе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теория систем с переменной структурой, под редакцией С. В. Емельянова, Издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, М., 1970, 592 стр.
2. Емельянов С. В., Уткин В. И., Таран В. А., Костылева Н. Е., Шубладзе А. М., Езеров В. Б., Дубровский Е. Н. Теория систем с переменной структурой. М., Изд-во «Наука». 1970.
3. Нелинейные помехозащищенные дифференциаторы // Проблемы управления / С. В. Гуляев, А. М. Шубладзе, С.и. Кузнецов, А. В. Кротов, В. Р. Ольшванг, В. А. Малахов, — 2010. — № 3. — С. 26–29.

© Кротов Александр Васильевич (a.krotov@sovtigaz.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ ПРИ КИСЛОТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА КАРБОНАТНЫЕ ПЛАСТЫ

ASPECTS OF GEOCHEMICAL MATHEMATICAL MODELLING OF ACID IMPACT IN CARBONATE RESERVOIR

A. Novikov

Summary. Major models of acid impact can't take into account certain kinetics of acid-mineral interactions. In this paper, the developed model of acid impact based on reactive flow conservation laws is considered. In scope of this model the influence of an arbitrary reaction kinetics on the resulting effect of the impact is investigated.

Keywords: acid impact, acid treatment, matrix acidizing, reaction kinetics, geochemical simulation, carbonate reservoir.

Новиков Алексей Викторович

Аспирант, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина
cranon@yandex.ru

Аннотация. Распространённые подходы к моделированию кислотного воздействия не способны учитывать кинетику реакции взаимодействия реагентов с минералами породы. В данной работе рассматривается численная модель кислотного воздействия, основанная на законах физико-химической гидродинамики пласта, способная учитывать произвольную кинетику реакции. В рамках данной модели исследуется влияние кинетики реакции на эффект от кислотного воздействия.

Ключевые слова: кислотное воздействие, кислотная обработка, кинетика реакции, геохимическое моделирование, карбонатный пласт.

Введение

Физико-химическое воздействие на пласт — один из наиболее динамично развивающихся методов увеличения нефтеотдачи. Основным его преимуществом является возможность подбора химических реагентов и способа воздействия, которые позволят достичь необходимых параметров фильтрации при заданных петрофизических свойствах и минералогическом составе породы.

Среди различных физико-химических методов, кислотное воздействие (КВ) является наиболее простой и надёжной технологией интенсификации добывающих и увеличения приёмистости нагнетательных скважин, вскрывающих карбонатные залежи. Наиболее распространённый подход включает в себя использование соляной кислоты, которая, как известно, интенсивно растворяет карбонатную породу [1, 2]. Использование загустителей, ингибиторов реакции, эмульгированных составов позволяет получить кислотную систему с заданными скоростью реакции и вязкостью. Подбор кислотного состава, наряду с определением технологических параметров закачки, при которых кислота воздействует на пласт наиболее эффективным образом, составляют задачу дизайна КВ.

Математическое моделирование КВ осложняется рядом факторов, среди них: нелинейность задачи фильтрации раствора кислоты при интенсивных химических реакциях, многомасштабность задачи. Последний фак-

тор обусловлен распространением червоточин — узких кавернообразных каналов, которые могут формироваться в околоскважинной зоне при КВ. В результате при решении задачи дизайна часто используют простейшие модели КВ.

В большинстве “механистических” моделей КВ червоточины представляются *капиллярными трубками* [3], продуктивность которых оценивается аналитически. Широкое распространение получили модели, основанные на анализе результатов экспериментов с закачкой кислоты в керн. Установлено, что при *числе Дамкёллера* $Da = 0.29$ КВ осуществляется наиболее эффективным образом, для широкого диапазона кислотных систем, уровней pH и температур [4]. Также на основе экспериментальных данных предложены зависимости динамики распространения червоточин от скорости нагнетания (*числа Пекле*), числа кислотности, объёма закачанной кислоты в модели фрактальной структуры червоточин, которые позволяют идентифицировать различные режимы растворения породы и оценивать результирующий эффект от КВ [5]. Сеточные модели порового пространства [6] позволяют качественно воспроизвести динамику объёма кислоты для достижения червоточины фиксированной длины от скорости закачки, с хорошей точностью предсказывают оптимальную скорость закачки (число Дамкёлера), геометрию распространения червоточин. Подробный обзор методов моделирования КВ приведён в [7, 8].

Описанные модели несут в себе множество предположений, в том числе о бесконечной скорости реакции,

при которой растворение происходит равновесно, т.е. вся кислота реагирует на стенке червоточин. Также они оперируют к простейшим кинетическим моделям реакций растворения, что не соответствует современным кислотным системам.

Численные модели КВ [9–11], в основе которых лежат осреднённые законы фильтрации (Дарси, Дарси-Бринкмана, Дарси-Бринкмана-Стокса), переноса и гетерогенной реакции активной примеси позволяют более достоверно оценивать эффект от КВ, учесть произвольную модель кинетики неравновесного растворения породы, многофазную многокомпонентную фильтрацию раствора кислоты, продуктов реакции и пластовых флюидов.

В работе [10] предложена одномерная модель двухфазной фильтрации раствора кислоты и нефти с учётом растворения породы коллектора, проведён аналитический анализ модели, представлены численные решения для случая КВ в вертикальной скважине. В работе [11] данная модель использована для расчёта и анализа эффекта от КВ в горизонтальной скважине.

В данной работе исследуется влияние кинетической модели реакции кислотной системы на эффект от КВ на примере вертикальной скважины. В рамках модели, предложенной в [10, 11], рассчитывается эффект от двухстадийной (закачка+остановка) соляно-кислотной обработки скважины при различных параметрах кинетической модели. По результатам расчёта можно сделать вывод, что кинетика реакции используемой кислотной системы определяет глубину проникновения раствора, а также степень воздействия на стимулированную зону.

Математическая модель

В основе рассматриваемой модели КВ лежат законы баланса массы компонент: исходных веществ, минералов, слагающих породу и продуктов реакции. В соответствии с моделью [10, 11], рассматривается задача двухфазного многокомпонентного вытеснения нефти раствором активной примеси. Считается, что кислота, а также все продукты реакции — соль и углекислый газ, растворены в водном растворе, который представляет собой единую фазу.

Уравнения баланса массы компонентов водного раствора, нефти и минералов скелета включают интенсивность изменения массы q_i компонента i в результате химических превращений:

$$q_i = - \sum_k r_k (v''_{ik} - v'_{ik}) M_i \left[s a_0 \left(\frac{1 - m}{m^* - m_0} \right)^l \right], \quad (1)$$

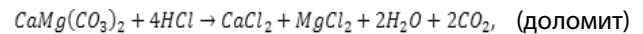
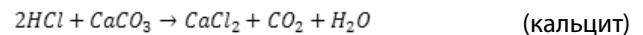
где r_k — скорость реакции, v'_{ik}, v''_{ik} — стехиометрические индексы i -го компонента до и после k -ой реакции, M_i — молярная масса i -го компонента, a_0 — начальное значение эффективной поверхности реакции в единице объёма породы, коэффициент

$$\left(\frac{1 - m}{m^* - m_0} \right)^l$$

характеризует изменение поверхности реакции в процессе растворения, l — эмпирическая константа, m_0, m^* — начальная и максимальная пористость, достижимая при растворении минерала.

Для скорости движения фаз используется закон Дарси. Ввиду изменения структуры порового пространства, укрупнения пор, меняются и относительные фазовые проницаемости, которые представляют собой средне-взвешенное начальных фазовых проницаемостей и максимально достижимых — линейных по насыщенности. Проницаемость породы выражается через пористость на основе экспоненциальной петрофизической зависимости, которая характерна для пластов, сложенных карбонатами. Влияние капиллярных сил считается пренебрежимо малым.

Рассматриваются следующие реакции взаимодействия соляной кислоты с минералами:



Кинетическая модель реакций растворения кальцита и доломита соляной (сильной) кислотой имеет вид:

$$-r_k = A_k \left(\frac{(c_a - c_a^{eq})^{n_k} \rho_w}{M_w} \right) \exp \left(- \frac{E_k}{RT} \right), \quad (2)$$

где A_k, E_k, n_k — константа, энергия активации и порядок k -ой реакции, T — температура среды, которая считается постоянной во всей рассматриваемой области и за расчётный период.

Результаты расчётов

Как правило, соляно-кислотная обработка (СКО) включает в себя множество стадий, в т.ч. предварительную очистку и обратную промывку. В простейшем случае процедура состоит из закачки раствора кислоты и последующей остановки на реакцию, во время которой остатки активного раствора реагируют с породой.

Здесь рассматривается СКО вертикальной скважины вскрывающей круговой пласт, окружённый постоянным контуром питания. В течение первой стадии происходит закачка фиксированного объёма кислоты при постоян-

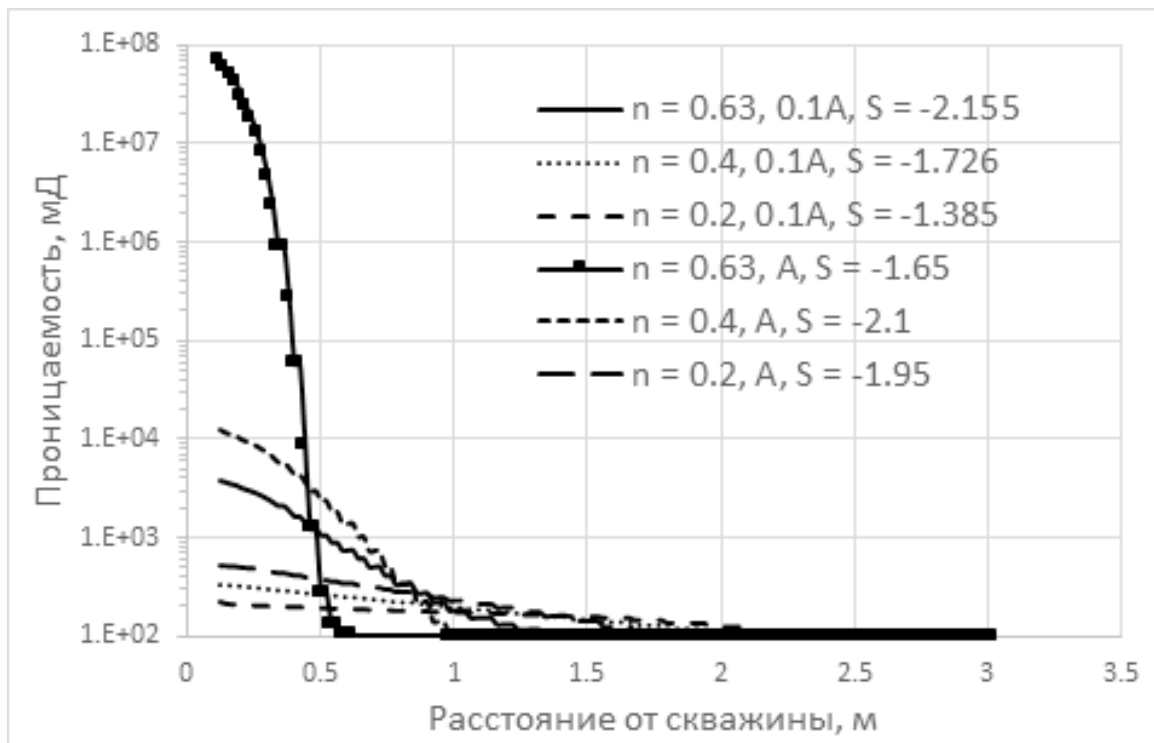


Рис. 1. Распределение проницаемости в ОЗП после СКО в известняке при различных значениях порядка реакции n для двух значений константы реакции $0.1A, A$. Приведён результирующий скин-фактор S .

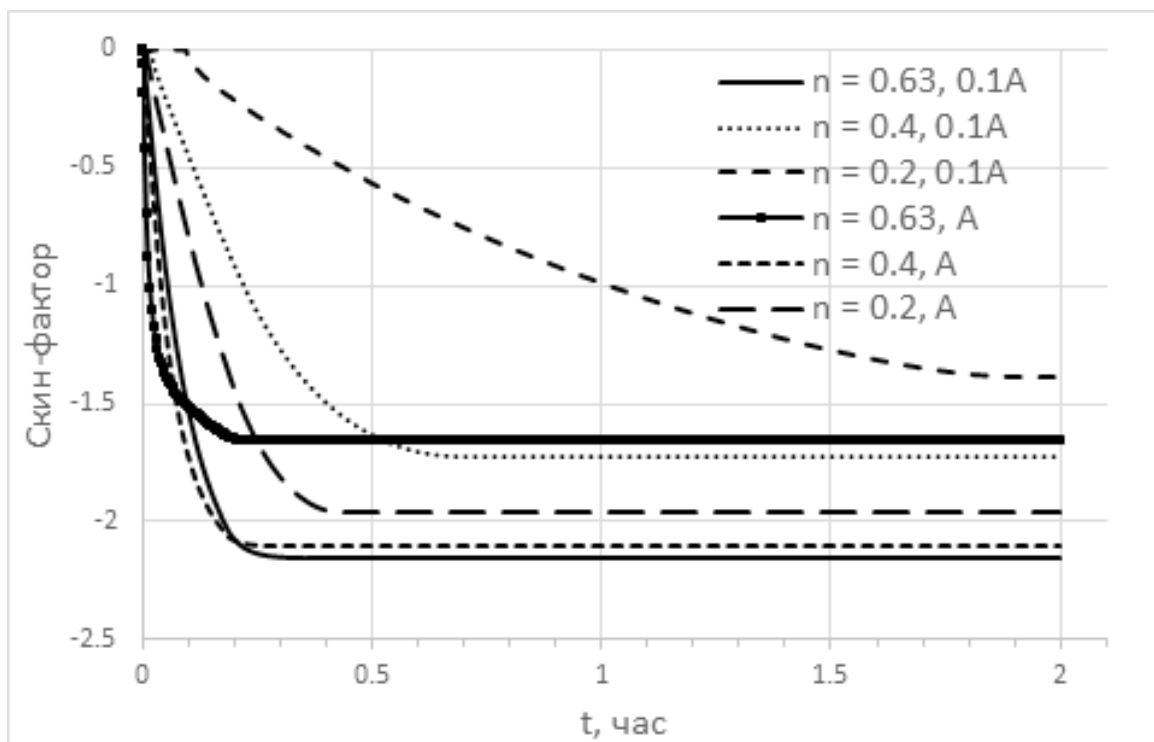


Рис. 2. Динамика изменения скин-фактора при различных значениях порядка реакции для двух значений константы реакции $0.1A, A$.

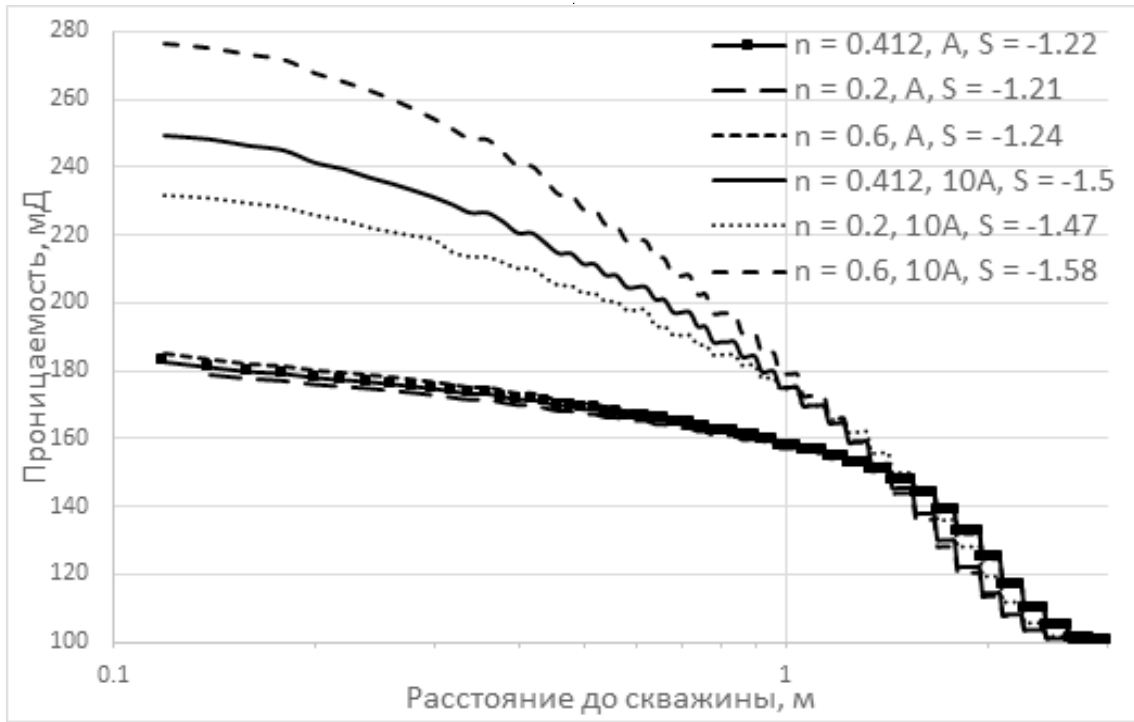


Рис. 3. Распределение проницаемости в ОЗП после СКО в доломите при различных значениях порядка реакции n для двух значений константы реакции $A, 10A$. Приведён результирующий скин-фактор S .

ном давлении, затем происходит остановка скважины, при которой нагнетаемый поток обращается в ноль.

На Рис. 1 представлены расчетные профили проницаемости в околоскважинной зоне пласта (ОЗП), состоящего из известняка, 10 м³ ~<15%-ым раствором соляной кислоты. Профили рассчитаны при различных значениях порядка реакции $n=0.63$ [2], $0.4, 0.2$ [12] и для двух значений константы реакции $0.1A$ и A . Более высокое значение порядка реакции соответствует более быстрой скорости реакции и менее глубокому проникновению кислоты в ОЗП. Как видно из графиков в случае низкой константы реакции $0.1A$ более высокому порядку соответствует наиболее эффективная обработка, тогда как в случае константы реакции A наиболее эффективная обработка соответствует значению порядка $n=0.4$. Это свидетельствует о наличии оптимального значения скорости реакции (для фиксированной скорости закачки), при которой СКО наиболее эффективна.

На Рис. 2 представлены графики динамики изменения скин-фактора скважины, рассчитанного по формуле

$$S = k_0 \int_{r_w}^{r_s} \frac{dr}{rk(r)} - \ln \frac{r_s}{r_w}.$$

Как видно из графиков, низкий порядок реакции, равно как и низкая константа реакции, требуют более длительной остановки на реакцию.

На Рис. 3 приведены аналогичные расчёты профилей проницаемости в ОЗП при обработке пласта, состоящего из доломитов. Для используемой константы реакции A [1], результирующий эффект не зависит от порядка реакции. Для константы реакции $10A$, наблюдается заметное различие в профилях проницаемости, рассчитанных для различных значений порядка реакции, однако скин-факторы скважины разнятся незначительно. Таким образом влияние порядка реакции на эффект от стимуляции при СКО в доломитах незначительно.

Заключение

В данной работе рассмотрена численная модель КВ, основанная на законах физико-химической гидродинамики, она представляет собой задачу двухфазной многокомпонентной фильтрации раствора активной примеси, продуктов химических реакций и нефти. Модель позволяет учесть произвольную кинетику гетерогенных химических реакций взаимодействия кислоты с минералами, слагающими породу.

На основе данной модели рассмотрена задача соляно-кислотной обработки вертикальной скважины, вскрывающей карбонатный пласт. На конкретных примерах исследовано влияние параметров кинетики реакции на размер стимулированной области и на степень

улучшения её пропускной способности для пластов, состоящих преимущественно из известняка или доломита. Получено, что скорость реакции определяет продолжительность стадии остановки на реакцию. Установлено,

что при заданных свойствах пласта, объёме раствора кислоты и темпов его закачки существует оптимальное значение скорости реакции, при котором эффект от СКО будет наибольшим.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lund, K., Fogler, H.S. and McCune, C.C.: "Acidization I: The Dissolution of Dolomite in Hydrochloric Acid," *Chemical Engineering Science* (1973) 28, 691–700.
2. Lund, K., Fogler, H.S., McCune, C.C. and Ault, J.W.: "Acidization II — The Dissolution of Calcite in Hydrochloric Acid," *Chemical Engineering Science* (1975) 30, 825–835.
3. Schechter, R. S. and Gidley, J. L. The change in pore size distribution from surface reactions in porous media. *AIChE Journal*. V. 15, 3, p. 339–350, 1969. <http://dx.doi.org/10.1002/aic.690150309>.
4. Wang, Y., Hill, A.D. and Schechter, R.S.: "The Optimum Injection Rate for Matrix Acidizing of Carbonate Formations," paper SPE26578, presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, USA (October 3–6, 1993).
5. G. Daccord, R. Lenormand, O. Li'etard. Chemical dissolution of a porous medium by a reactive fluid — I. Model for the "wormholing" phenomenon. *Chem. Eng. Sci.* V. 48, I. 1, 1993, 169–178. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(93\)80293-Y](https://doi.org/10.1016/0009-2509(93)80293-Y).
6. Hoefner, M.L. and Fogler, H.S.: "Pore Evolution and Channel Formation During Flow and Reaction in Porous Media," *AIChE J.* (January 1988) 34, No. 1, 45–54.
7. Р. Д. Каневская, А. В. Новиков. Методы моделирования червоточин при соляно-кислотном воздействии на карбонатные пласты. *Нефтепромышленное дело*, 3/2018.
8. Р. Д. Каневская, А. В. Новиков. Методы моделирования кислотного гидроразрыва пласта. *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности*, 3/2018.
9. On the ability of a Darcy-scale model to capture wormhole formation during the dissolution of a porous medium / F. Golfier, C. Zarcone, B. Bazin, R. Lenormand, D. Lasseux, M. Quintard // *J. of Fluid Mechanics*. — 2002. — Vol. 457. — P. 213–254. DOI: 10.1017/S0022112002007735.
10. Вольнов И. А., Каневская Р. Д. Фильтрационные эффекты растворения породы при кислотном воздействии на карбонатные нефтесодержащие пласты // *Изв. РАН. МЖГ*. 2009. № 6. С. 105–114.
11. Жучков С. Ю., Каневская Р. Д. Моделирование кислотного воздействия в горизонтальной скважине, вскрывающей карбонатный нефтесодержащий пласт // *Изв. РАН. МЖГ*. 2013. № 4. С. 93–103.
12. Nierode, D. E., & Williams, B. B. (1971, December 1). Characteristics of Acid Reaction in Limestone Formations. *Society of Petroleum Engineers*. doi:10.2118/3101-PA.

© Новиков Алексей Викторович (cranon@yandex.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ОБ ИНВАРИАНТАХ ОДНОГО КЛАССА БИЛИНЕЙНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ СИСТЕМ

ON THE INVARIANTS OF ONE CLASS OF BILINEAR CONTROL SYSTEMS

N. Osetinskiy

Summary. We investigate the properties of reachability and observability, canonical forms and invariants of bilinear control systems, as well null-forms in the space of two-dimensional bilinear systems with one-dimensional inputs and outputs under similarity transformations, i.e. action on the space of the systems of the group GL_n , determined by the change of coordinates in the state space of the system.

Keywords: bilinear controlled system, subspace, observability, canonical form, invariant.

Осетинский Николай Иосифович

К.ф.-м.н., профессор, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина
avt1948@mail.ru

Аннотация. Исследуются свойства достижимости и наблюдаемости, канонические формы и инварианты билинейных управляемых систем, а также — нуль-формы в пространстве двумерных билинейных систем с одномерными входами и выходами при преобразованиях подобия, т.е. действии на пространство систем группы GL_n , определяемое заменой координат в пространстве состояний системы.

Ключевые слова: билинейная управляемая система, подпространство, наблюдаемость, каноническая форма, инвариант.

Пространства и канонические формы билинейных систем

Билинейной управляемой системой с m входами называется набор $B = (V, A_0, \dots, A_m)$, где V — конечномерное векторное пространство (над полем комплексных чисел C или вещественных чисел R) состояний системы и A_0, \dots, A_m — линейные эндоморфизмы пространства V . Функционирование такой системы в непрерывном времени описывается дифференциальным уравнением

$$x'(t) = \left(A_0 + \sum_{i=1}^m u_i(t) A_i \right) x(t). \quad (1.1)$$

Входное воздействие (или управление) системы есть набор $u(t) = (u_1(t), \dots, u_m(t))$. Предположим, что вещественные функции $u_i(t)$ кусочно непрерывны на отрезке $[0, T]$, $T > 0$. Тогда для любого x_0 из V и $u(t)$ с указанными координатами существует единственное решение уравнения (1), определенное при всех $0 \leq t \leq T$ и удовлетворяющее начальному условию $x(0) = x_0$. Пусть $\pi(B, u, t)x_0 = x(t)$ в соответствии с обозначениями [1]. Тогда для системы B при фиксированных $u(t)$ и t определено линейное невырожденное отображение

$$\pi(B, u, t): V \rightarrow V, \quad \pi(B, u, t): x_0 \mapsto \pi(B, u, t)x_0.$$

Линейное подпространство $W \subset V$ называется B -инвариантным, если выполнено одно из двух эквивалентных условий:

(i) для любого w из W , любого входного воздействия $u(t)$ и любого t из $[0, T]$ выполняется включение $\pi(B, u, t)w \in W$;

(ii) пространство W инвариантно относительно линейных отображений A_0, \dots, A_m .

Действительно, пусть выполнено условие (i). Рассмотрим входные воздействия $u^{+,i}$ и $u^{-,i}$, где $u_j^{+,i} = \delta_{ij}$, $u_j^{-,i} = -\delta_{ij}$, здесь δ_{ij} — символ Кронекера. Тогда при $x_0 = w \in W$ решения уравнения (1) имеют следующий вид:

$$\pi(B, u^{\pm,i}, t) = \exp((A_0 \pm A_i)t)w,$$

в силу чего $\exp((A_0 \pm A_i)t)w \in W$. Дифференцируя по t в точке $t=0$, получаем включение $(A_0 \pm A_i)w \in W$. Следовательно, $A_0 w \in W$ и $A_i w \in W$ для всех $1 \leq i \leq m$. То, что из (ii) следует (i), очевидно.

Пусть $B = (V, A_0, \dots, A_m)$ и $B' = (V', A'_0, \dots, A'_m)$ — две билинейные системы с m входами. Тогда морфизмом системы B в систему B' называется линейное отображение $F: V \rightarrow V'$, для которого $FA_i = A'_i F$ для всех $0 \leq i \leq m$. Морфизм F билинейных систем называется изоморфизмом, если F обратимо. Очевидно, если $F: V \rightarrow V'$ — морфизм, то выполняется равенство

$$F(\pi(B, u, t)x) = \pi(B', u, t)F(x)$$

при всех u , t и x . Обратное также верно. Очевидно, если $F: B \rightarrow B'$ — морфизм, то $\ker F \subset V$ и $\text{Im } F \subset V'$ —

инвариантные подпространства в V и в V' соответственно.

Билинейной системой с t входами и p выходами называется набор $B = (V, A_0, \dots, A_m, \lambda_1, \dots, \lambda_p)$, где $B = (V, A_0, \dots, A_m)$ — билинейная система с t входами, а $\lambda_1, \dots, \lambda_p$ — линейные функционалы на пространстве V . При заданном входном воздействии $u(t)$ и начальном состоянии x выходной сигнал $y(t) = (y_1(t), \dots, y_p(t))$ системы B вычисляется по формуле

$$y_i(t) = \langle \lambda_i, \pi(B, u, t)x \rangle.$$

Очевидно, при заданных B , $u(t)$ и t отображение

$$\sigma(B, u, t): B \rightarrow R^p, \quad \sigma(B, u, t): x \rightarrow y(t)$$

является линейным. Пусть Ω обозначает пространство входных функций (с кусочно-непрерывными координатами), а через Γ -пространство дифференцируемых функций, определенных на $[0, T]$, со значениями в R^p . Тогда система B для каждого начального состояния x определяет отображение вход-выход $IO_{B,x}: \Omega \rightarrow \Gamma$.

Пусть $B = (V, A_0, \dots, A_m, \lambda_1, \dots, \lambda_p)$ и $B' = (V', A'_0, \dots, A'_m, \lambda'_1, \dots, \lambda'_p)$ — две билинейные системы с p выходами. Их *морфизмом* $F: B \rightarrow B'$ называется линейное отображение $F: V \rightarrow V'$ удовлетворяющее равенствам

$$A'_i F = F A_i, \quad \lambda'_j F = \lambda_j, \quad i = 0, \dots, m; \quad j = 1, \dots, p.$$

Отметим, что множество морфизмов двух билинейных систем без выходных сигналов образует линейное пространство, а множество морфизмов двух билинейных систем с выходами образует аффинное пространство, т.е. если F и G — морфизмы из B в B' , а α — некоторое число, то отображение $\alpha F + (1-\alpha)G$ также является морфизмом. Заметим также, что если $F: B \rightarrow B'$ — морфизм, то для любого $x \in V$ выполняется равенство $IO_{B',F(x)} = IO_{B,x}$. Состояния x и x' системы B называются неразличимыми, если $IO_{B,x} = IO_{B,x'}$. Система B называется *наблюдаемой*, если любые два различных состояния x и x' различимы, т.е. если $IO_{B,x} \neq IO_{B,x'}$. *Ненаблюдаемым ядром* системы B , обозначаемым через U_B , называется множество состояний, неразличимых с нулем в V . Из линейности отображений $\sigma(B, u, t)$ следует, что U_B — линейное подпространство в V и что x и x' неразличимы тогда и только тогда, когда $x - x' \in U_B$. Следовательно, система B наблюдаема тогда и только тогда, когда $U_B = 0$. Справедливы также следующие результаты [1].

Предложение 1. Пусть $B = (V, A_0, \dots, A_m, \lambda_1, \dots, \lambda_p)$ — билинейная система. Тогда: (i) ненаблюдаемое ядро U_B является инвариантным подпространством в V ; кроме

того, U_B — наибольшее инвариантное подпространство в V , на котором все функционалы λ_i обращаются в нуль; (ii) следующие утверждения эквивалентны:

- a) система B наблюдаема;
- b) $U_B = 0$;

c) для каждой билинейной системы B' с t входами и p выходами существует самое большее один морфизм $F: B' \rightarrow B$;

d) каждый морфизм из B в любую билинейную систему с t входами и p выходами инъективен.

Предложение 2. Пусть B и B' — две билинейные системы с t входами и p выходами и одинаковыми отображениями вход-выход, и пусть, кроме того, B наблюдаема. Тогда существует единственный морфизм $B \rightarrow B'$.

Следствие. Две наблюдаемые системы B и B' с t входами и p выходами и с одинаковым соответствием вход-выход изоморфны.

В теории линейных систем существует состояние, при выборе которого в качестве начального состояния почти все представляющие интерес в теории реализации отображения становятся линейными, а именно нулевое состояние. Наоборот, в теории билинейных систем нулевое начальное состояние абсолютно неинтересно, поскольку все отображения (и траектории) становятся нулевыми. Поэтому в билинейной системе нельзя выделить какое-либо «хорошее» состояние на роль начального состояния.

Пусть $B = (V, A_0, \dots, A_m, v_0^1, \dots, v_0^k)$ и $\tilde{B} = (V, \tilde{A}_0, \dots, \tilde{A}_m, \tilde{v}_0^1, \dots, \tilde{v}_0^k)$ — две билинейные системы с k фиксированными начальными состояниями. Тогда морфизмом $F: B \rightarrow \tilde{B}$ называется такое линейное отображение, что $\tilde{A}_i F = F A_i$, $0 \leq i \leq m$, $F(v_0^j) = \tilde{v}_0^j$, $1 \leq j \leq k$.

Предложение 3. Пусть B — билинейная система с t входами и k начальными состояниями. Тогда следующие условия эквивалентны:

- (a) B — достижимая система;
- (b) для каждой билинейной системы B' с t входами и k начальными состояниями существует самое большее один морфизм $F: B \rightarrow B'$;
- (c) каждый морфизм из B' в B сюръективен.

Пусть $B = (V, A_0, \dots, A_m, v_0, \lambda_1, \dots, \lambda_p)$ — билинейная система с t входами, p выходами и начальным состоянием, т.е. здесь. Отображением вход-выход IO_B системы B называется отображение IO_{B,v_0} . Отметим, что для такой системы B можно ввести понятие достижимой оболочки и, следовательно, достижимости, поскольку в этой системе фиксировано начальное состояние.

Предложение 4. Если две достижимые и наблюдаемые билинейные системы $B = (V, A_0, \dots, A_m, v_0, \lambda_1, \dots, \lambda_p)$ и $\tilde{B} = (\tilde{V}, \tilde{A}_0, \dots, \tilde{A}_m, \tilde{v}_0, \tilde{\lambda}_1, \dots, \tilde{\lambda}_p)$ имеют одинаковые отображения вход-выход, т.е. $IO_B = IO_{\tilde{B}}$, то системы B и \tilde{B} изоморфны.

Это аналог теоремы единственности минимальной реализации для линейных систем.

Остановимся на результатах статьи [1] о канонических формах билинейных систем. Подчеркнем, что все пространства, преобразования и системы определены над полем вещественных чисел R и рассматривается обычная вещественная топология. Обозначения следуют статье [1]. Будем рассматривать билинейные системы с пространством состояний Rn , элементы из Rn записываем в виде столбцов, а линейные функционалы — в виде строк. Тогда билинейная система задается $m+1$ квадратными $n \times n$ матрицами A_0, \dots, A_m . Пусть множество всех таких наборов матриц обозначено через $Bin(n, m)$. Для определения системы с k начальными состояниями надо задать еще k столбцов x_0^1, \dots, x_0^k . Соответственно, задав p строк, получим систему с p выходами. Пусть символы $Bin(n, m)^k$, $Bin(n, m)_p^k$, $Bin(n, m)_p^k$ обозначают соответственно множества всех билинейных систем с k начальными состояниями, с p выходами, а также с k начальными состояниями и с p выходами. Очевидно, все они являются векторными пространствами размерностей $n^2(m+1)$, $n^2(m+1) + nk$, $n^2(m+1) + np$, $n^2(m+1) + n(k+p)$ соответственно. Пусть $RBin(n, m)^k$ — множество всех достижимых систем $B \in Bin(n, m)^k$, $OBin(n, m)_p^k$ — множество всех наблюдаемых систем $B \in Bin(n, m)_p^k$, а $ROBin(n, m)_p^k$ — множество всех достижимых и наблюдаемых систем $B \in Bin(n, m)_p^k$. Пусть $I = (i_1, \dots, i_s)$ — произвольная последовательность индексов, где $0 \leq i_j \leq m$, и A_I обозначает произведение $A_{i_1} \cdot \dots \cdot A_{i_s}$. Как известно, система $B = (A_0, \dots, A_m, x_0^1, \dots, x_0^k)$ достижима тогда и только тогда, когда векторы вида $A_I x_0^j$ (при всех I и j) порождают пространство R^n . Из этого следует, что $RBin(n, m)^k$ — открытое подмножество в $Bin(n, m)^k$. Нетрудно проверить, что $OBin(n, m)_p^k$ и $ROBin(n, m)_p^k$ также являются открытыми подмножествами в пространствах $Bin(n, m)_p^k$ и $Bin(n, m)_p^k$ соответственно. В терминах матриц две билинейные системы $B = (A_0, \dots, A_m, x_0^1, \dots, x_0^k)$ и $\tilde{B} = (\tilde{A}_0, \dots, \tilde{A}_m, \tilde{x}_0^1, \dots, \tilde{x}_0^k)$ изоморфны (или эквивалентны), если $MA_iM^{-1} = A_i, 0 \leq i \leq m$, $Mx_0^j = \tilde{x}_0^j, 1 \leq j \leq k$ для некоторой невырожденной $n \times n$ матрицы M . Очевидно, это задает действие группы GL_n на все введенные выше пространства и их открытые подмножества.

Предложение 5. Пусть $B, \tilde{B} \in RBin(n, m)^k$ эквивалентны. Тогда существует только одна матрица M , такая, что $M : B \rightarrow \tilde{B}$ изоморфизм.

Доказательство. Пусть $N : B \rightarrow \tilde{B}$ — еще один изоморфизм. Тогда $Nx_0^j = \tilde{x}_0^j = Mx_0^j$. Кроме того, $NA_i = \tilde{A}_iN$ для всех i ($0 \leq i \leq m$). Поэтому для всех мультииндексов I выполнены равенства $NA_I = A_I N$. Следовательно,

$$NA_I x_0^j = \tilde{A}_I N x_0^j = \tilde{A}_I M x_0^j = MA_I x_0^j$$

для всех I и j . Но векторы $A_I x_0^j$ порождают R^n , поэтому $N=M$.

Дадим определение канонической формы, например, для систем из $RBin(n, m)^k$. Для других случаев формулировка аналогична.

Определение. Канонической формой для систем из $RBin(n, m)^k$ называется отображение

$$F : RBin(n, m)^k \rightarrow RBin(n, m)^k$$

такое что, для любой системы $B \in RBin(n, m)^k$ система $F(B)$ эквивалентна системе B ; если системы B_1 и B_2 из $RBin(n, m)^k$ эквивалентны, то $F(B_1) = F(B_2)$.

В [1] доказана теорема о непрерывных канонических формах вещественных достижимых билинейных систем, аналогичная теоремам Калмана — Хазевинкеля и Бирнса — Харта [2, 3] о канонических формах достижимых линейных систем над произвольным алгебраическим замкнутым полем.

Теорема. Для $n \geq 2$ непрерывна каноническая форма для систем из множества $RBin(n, m)^k$ не существует.

Дадим краткий набросок доказательства, следуя работе [1]. Прежде всего, заметим, что определенные выше действия являются аналитическими. Рассмотрим действия

$$\begin{aligned} GL_n \times Bin(n, m)^k &\rightarrow Bin(n, m)^k, \\ GL_n \times RBin(n, m)^k &\rightarrow RBin(n, m)^k \end{aligned} \tag{1.2}$$

Из предложения 5 следует, что действие (1.2) является точным: то есть для систем $B \in RBin(n, m)^k$ равенство $MB=B$ выполняется только для единичной матрицы M , т.е. стабилизатор любой точки из $RBin(n, m)^k$ тривиален. Следующий результат существен для построения фактор-многообразия.

Лемма. Отношение эквивалентности, определяемое действием (1.2), замкнуто: если $\{B_s\}$ и $\{\tilde{B}_s\}$ — две последовательности из $RBin(n, m)^k$, причем B_s и \tilde{B}_s изоморфны для каждого s , и $B_s \rightarrow \tilde{B}_\infty, \tilde{B}_s \rightarrow \tilde{B}_\infty$ при $s \rightarrow \infty$, где $B_\infty, \tilde{B}_\infty \in RBin(n, m)^k$, то системы B_∞ и \tilde{B}_∞ принадлежат одной орбите, то есть изоморфны.

Таблица

| A_0 | A_1 | x | λ | Примечание |
|--|--|--|-------------------|----------------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | Орбита замкнута, размерность 0 |
| 0 | 0 | $x = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ | 0 | Орбита незамкнута, размерность 2 |
| 0 | 0 | 0 | $\lambda = (0,1)$ | Орбита незамкнута, размерность 2 |
| 0 | 0 | $x = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ | $\lambda = (0,1)$ | Орбита незамкнута, размерность 3 |
| $\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ | 0 | 0 | 0 | Орбита незамкнута, размерность 2 |
| 0 | $\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ | 0 | 0 | Орбита незамкнута, размерность 2 |
| $\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ | 0 | $x = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ | 0 | Орбита незамкнута, размерность 3 |
| $\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ | 0 | $x = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ | 0 | Орбита незамкнута, размерность 4 |
| $\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ | 0 | 0 | $\lambda = (0,1)$ | Орбита незамкнута, размерность 4 |
| $\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ | 0 | 0 | $\lambda = (1,0)$ | Орбита незамкнута, размерность 3 |
| $\begin{pmatrix} 0 & a \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, a \neq 0$ | 0 | $x = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ | $\lambda = (0,1)$ | Орбита незамкнута, размерность 3 |
| $\begin{pmatrix} 0 & a \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, a \neq 0$ | $\begin{pmatrix} 0 & b \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, b \neq 0$ | $x = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ | $\lambda = (0,1)$ | Орбита незамкнута, размерность 3 |

Простое доказательство этой леммы имеется в [1].

Из замкнутости отношения эквивалентности и точности действия (1.2) вытекает, что множество $ER(n, m)^k$ орбит этого действия можно наделять структурой аналитического многообразия, причем так, что каноническая проекция

$$\pi : RBin(n, m)^k \rightarrow ER(n, m)^k$$

будет субмерсией (т.е. π имеет в каждой точке максимальный ранг) и $RBin(n, m)^k$ окажется главным расслоением над $ER(n, m)^k$ со структурной группой GL_n . Тогда существование непрерывной канонической формы F эквивалентно существованию непрерывного сечения этого расслоения, т.е. его тривиальности. В действительности, построенное расслоение оказывается нетривиальным (см. доказательство в [1]), что и приводит к утверждению теоремы.

Инварианты и нуль-формы билинейных систем

Рассмотрим пространство $Bin(n, m)_p^k$ билинейных систем с k начальными стояниями и с p выходами. Нас будут интересовать полиномиальные инварианты таких систем относительно действия подобия. Билинейную управляемую систему $B \in Bin(n, m)_p^k$ можно рассматривать как набор из $m+1$ квадратных $n \times n$ матриц $A_i, 0 \leq i \leq m$, векторов x_1, \dots, x_k размерности n , и p ко-векторов $\lambda_1, \dots, \lambda_p$ размерности n . Тогда рассматриваемое действие группы GL_n на систему есть в точности действие GL_n на указанный набор (матрицы, векторы, ко-векторы), индуцированное преобразованием базисов в n -мерном пространстве состояний

$$T \circ (A_0, \dots, A_m, x_1, \dots, x_k; \lambda_1, \dots, \lambda_p) = (TA_0T^{-1}, \dots, TA_mT^{-1}; Tx_1, \dots, Tx_k; \lambda_1T, \dots, \lambda_pT),$$

$$Tx_1, \dots, Tx_k; \lambda_1T^{-1}, \dots, \lambda_pT^{-1},$$

где $T \in GL_n$. Следовательно, задача свелась к нахождению базиса совместных инвариантов набора $m+1$ квадратных $n \times n$ матриц и семейств k векторов и p ко-векторов размерности n . Основываясь на результатах статьи [4], где рассматривалось аналогичное действие специальной линейной группы SL_n на то же самое пространство и был предъявлен базис соответствующей

алгебры инвариантов $T_{m+1, k, p}$, можно найти элементы, порождающие алгебру $A_{m+1, k, p}$ полиномиальных инвариантов билинейных систем. Далее рассматриваем случай, когда $n=2, m=1, k=p=1$, то есть пространство $Bin(2, 1)_1^1, \dim Bin(2, 1)_1^1 = 12$, соответственно — инварианты из алгебры $A_{2,1,1}$. Так как стабилизатор общей системы состоит только из единичной матрицы, то размерность общей орбиты равна 4 (размерность группы GL_2). Размерность алгебраического фактора будет тогда $12 - 4 = 8$. Пусть $B = (A_0, A_1, x, \lambda) \in Bin(2, 1)_1^1$. В этом случае образующими для алгебры $A_{2,1,1}$ будут, по крайней мере, следующие элементы:

$$TrA_0, \det A_0, TrA_1, \det A_1, Tr(A_0A_1), \lambda x, \lambda A_0x, \lambda A_1x, \lambda A_0A_1x, \lambda A_1A_0x, \lambda A_0A_1A_0x, \lambda A_1A_0A_1x$$

Нуль-формы — это системы $B = (A_0, A_1, x, \lambda)$, для которых эти инварианты равны нулю. Понятие нуль-формы (точки нуль-слоя отображения факторизации), которое впервые ввел Д. Гильберт, является важным элементом в решении проблем классификации [5]. Так как $TrA_0 = \det A_0 = \det A_0 = TrA_1 = \det A_1 = 0$, то матрицы A_0 и A_1 нильпотентны. Составим часть таблицы примеров простейших нуль-форм, в каждой строке которой будет содержаться представитель ровно одной орбиты билинейных систем для группы GL_n .

ЛИТЕРАТУРА

1. Sussmann H. F. Minimal realizations and canonical forms for bilinear systems // J. Franklin Inst. — 1976. — 301, № 6. С. 593–604.
2. Hazewinkel M., Kalman R. E. On invariants, canonical forms and moduli for linear, finite dimensional dynamical systems // Lect. Notes Econ. and Math. Syst. Theory. — 1976. — 131. — С. 48–60.
3. Byrnes C.I., Hurt N. E. On the moduli of linear dynamical systems // Adv. in Math. Studies in Analysis. — 1979. — 4. — С. 83–122.
4. Procesi C. The invariant theory of $n \times n$ matrices // Adv. Math. — 1976. — 19, № 3. — С. 306–381.
5. Крафт Х. Геометрические методы в теории инвариантов. М., 1987. 308 с.

НЕКОТОРЫЕ МОДЕЛИ ИНФОРМАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ СОЦИОТЕХНИЧЕСКИМИ (СОЦИАЛЬНЫМИ) СИСТЕМАМИ

Правиков Дмитрий Игоревич

К.т.н., РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина

dip@gubkin.pro

Чернов Игорь Викторович

К.т.н., Институт проблем управления Российской

академии наук

SOME MODELS OF INFORMATION MANAGEMENT BY SOCIOTECHNICAL (SOCIAL) SYSTEMS

D. Pravikov

I. Chernov

Summary. The article substantiates the relevance of the development of information management strategy in the context of information warfare conducted by complex sociotechnical systems, such as the modern state. The general scheme of strategic information management is presented. It is determined that an effective means of decision support and prediction of their consequences is the use of scenario approach and the apparatus of sign graphs as an adequate means of its implementation. An approach is proposed in which the information formalization of the target group (factors associated with collective consciousness) is used as an object of management. The security property of a complex social engineering system is determined through the ability to counter the threats of destabilization or reprogramming of the system. As a means of counteraction the algorithm of strengthening of argument is offered.

Keywords: sociotechnical system, information management, information warfare, tree of arguments, algorithm of strengthening the argument.

Аннотация. В статье обоснована актуальность выработки стратегии информационного управления в условиях информационного противоборства, ведущегося сложными социотехническими системами, такими, как современное государство. Представлена общая схема стратегического информационного управления. Определено, что эффективным средством поддержки принимаемых решений и прогноза их последствий является использование сценарного подхода и аппарата знаковых графов, как адекватного средства его реализации. Предложен подход, в котором в качестве объекта управления используется информационная формализация целевой группы (факторы, связанные с коллективным сознанием). Свойство безопасности сложной социотехнической системы определено через способность противодействия угрозам дестабилизации или перепрограммирования системы. Как средство противодействия предложен алгоритм укрепления аргументации.

Ключевые слова: социотехническая система, информационное управление, информационное противоборство, дерево аргументаций, алгоритм укрепления аргументации.

В современных условиях, которые характеризуются стремительным развитием процессов глобализации и формированием информационного общества, решение комплекса проблем обеспечения социальной стабильности, устойчивого развития страны и защиты национальных интересов России не может успешно осуществляться без опоры на единую методологическую базу, основой которой является целенаправленное, комплексное, ориентированное на конкретные объекты информационное воздействие, которое в широком смысле можно определить как информационное управление. В настоящий момент вопросы стратегического информационного управления сложными социотехническими системами в условиях ведущегося информационного противоборства, в отличие от уровней тактического или среднесрочного управления, остаются практически не проработанными.

Одним из основных практических аспектов информационного управления является консолидация современного российского общества в рамках конструк-

тивной деятельности, ориентированной на поддержку усилий государства, направленных на устойчивое инновационное, политическое, социально-экономическое и культурное развитие нашей страны в условиях активного информационного противоборства. Для реализации поставленной цели необходимо:

- ◆ предложить набор целей или проектов, который позволит сплотить наибольшее количество социальных групп в современном российском обществе;
- ◆ разработать методы анализа целей государства с точки зрения восприятия их различными социальными группами населения;
- ◆ разработать методику экспресс-диагностики текущего набора идеологических целей в социальных группах;
- ◆ разработать методы и инструменты информационной поддержки реализации целей государства в различных социальных группах;
- ◆ разработать методы формирования пошагового сценария, приводящего общество из состояния множества групп с несовместимыми (разнона-

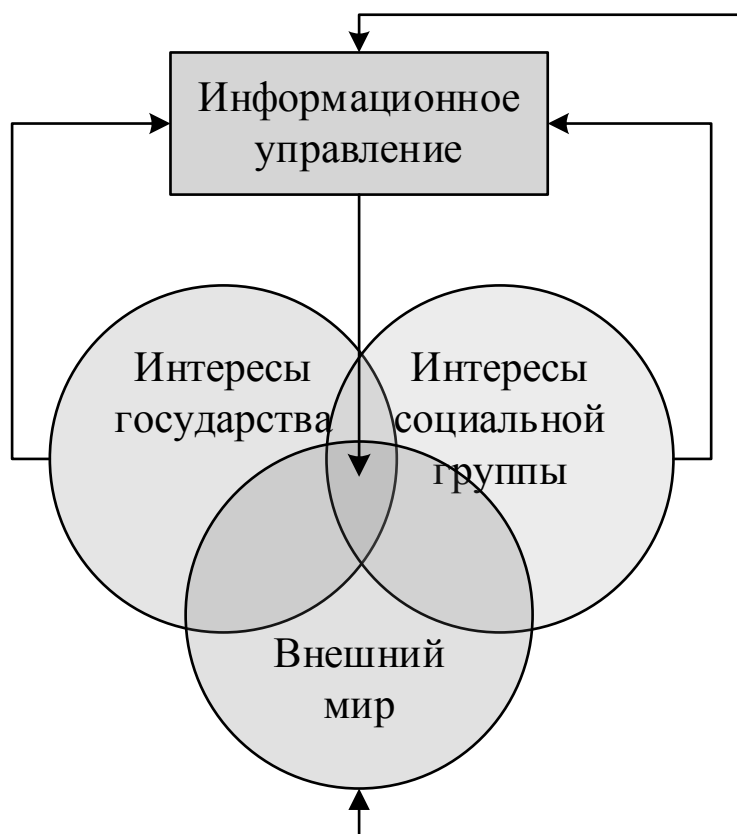


Рис. 1. Общая схема стратегического информационного управления

правленными) наборами целей к состоянию, когда эти цели для большинства групп укладываются в рамки общих национальных проектов.

Рассмотрим одно из направлений реализации информационного управления, которое заключается в информационной поддержке государственной политики. При реализации информационного управления предполагается формирование и использование системы, которая включает следующие компоненты:

- ◆ информационная модель, отражающая интересы государства.
- ◆ информационная модель, отражающая интересы социальной группы.
- ◆ информационная модель внешнего мира, включающая страты макросистемы, затрагивающие или влияющие на интересы членов социальной группы, например: экономика, политика, религия и т.д.);
- ◆ инструменты информационного управления (методы и средства, распространяемая информация; информационная поддержка).

Общая схема стратегического информационного управления представлена на рис. 1

С точки зрения стратегии, информационное управление направлено на расширение области пересечения трех моделей, т.е.:

- ◆ максимальное сближение политики государства и целей социальной группы (релевантность интересов государства интересам социальной группы);
- ◆ максимальное соответствие обеспечения интересов государства реалиям внешнего мира (адекватность управленческих решений руководства страны текущей или прогнозируемой ситуации);
- ◆ максимальное соответствие интересов социальной группы реалиям внешнего мира (адекватность поведения группы текущей или прогнозируемой ситуации).

В условиях активного информационного противоборства предложенная схема может быть расширена моделями других сторон.

Информационное управление реализуется на основе знания текущей и прогнозируемой обстановки, интересов государства и интересов социальной группы. Следует также отметить, что поскольку государство обладает мощными информационными средствами воздействия,

информационное управление во многом формирует информационный образ внешнего мира у социума. В условиях информационного противоборства одним из важнейших стратегических направлений является противодействие информационных образов внешнего мира, создаваемых конкурирующими сторонами. Кроме того, усилия противоборствующей стороны могут быть направлены на отрыв целей руководства страны от интересов социума. Таким образом, стратегия информационного противодействия направлена на:

- ◆ минимизацию области пересечения указанных выше моделей, т.е. изоляцию модели интересов государства от социума (нерелевантность управленческих решений руководства страны интересам народа);
- ◆ создание у социума устойчивого мнения о неумении руководства страны эффективно принимать решения в конкретной обстановке (неадекватность руководства условия внешнего мира);
- ◆ навязывание социуму своего информационного образа происходящим событиям внешнего мира с целью ориентации людей на поведение, ведущее к дестабилизации общества.

Анализ особенностей динамических процессов, возникающих под действием возмущений различной природы, является важным звеном формальных процедур для решения широкого класса задач управления в социотехнических системах, к которым можно отнести современное государство и социум. Характерные задачи этого типа — задачи, возникающие при исследовании слабоструктурированных и неструктурированных проблем, для которых типичен низкий уровень точности исходных данных и качественный характер описания постулируемых зависимостей. Это обстоятельство делает малоэффективным стремление к получению строгих количественных решений с помощью точных аналитических моделей.

В настоящее время недостаточно развиты формализованные способы выявления и исследования основных факторов, определяющих результативность анализа сложившейся ситуации, а также управления сложными социально-экономическими, политическими и военными системами. Сложность решения этих задач усугубляется наличием в структуре исследуемых систем циклов обратных связей различного типа и длительности. Зачастую решения в сфере информационного управления принимаются, имея ввиду их, практически, непосредственное воздействие на поведение целевого фактора (целевых факторов), однако каждое решение имеет долгосрочные последствия, достижение которых происходит при учете множества путей взаимосвязей факторов в сложной системе различной длины, в том числе путей, образующих циклы. То же самое относится и к проце-

дурам анализа ситуации. Положительный результат, достигнутый в кратковременный период, может превратиться в крайне отрицательный на долговременном временном отрезке, а тем более на стратегическом горизонте. В прикладном отношении наиболее существенным является отсутствие практических критериев, методов и методик оценки эффективности принимаемых решений и методов их реализации, что не позволяет обосновано прогнозировать их возможные последствия и выбирать наиболее эффективные управленческие воздействия.

В этих условиях повышается роль методов анализа, результаты которого позволяют судить о наиболее вероятных и целесообразных направлениях развития динамических процессов, их устойчивости и других желательных и нежелательных свойствах для оперирующей стороны по информации о структурных особенностях исследуемой системы. Эффективным средством поддержки принимаемых решений и прогноза их последствий является использование сценарного подхода и аппарата знаковых графов, как адекватного средства его реализации. Сценарный подход позволяет снижать имеющуюся неопределенность и представить с его помощью несколько вариантов развития обстановки. Кроме того, этот подход позволяет оценить возможности управления при ограничении на виды воздействий, а также определять необходимые управляющие воздействия для реализации желаемого развития обстановки. Сценарием является гипотетическая последовательность событий, показывающая, как из существующего или какой-либо заданного состояния система этап за этапом переходит в другое состояние.

Предложенный в ряде работ ИПУ РАН метод автоматической генерации сценариев развития сложных социотехнических систем (ССС) реализуется в два этапа. На первом этапе формируется модель СССР в виде знакового или функционального графа. На втором этапе с ее использованием на основе выбранных управляющих воздействий автоматически генерируются различные сценарии развития СССР, включая состояние социально-политической ситуации. При реализации первого этапа графовая модель считается адекватной реальной ситуации, если в модельных процессах не нарушается ни одна из продукций базисных знаний, процессов и элементов (факторов).

Функционирование модели описывается в терминах «событие — состояние». Состояние — это текущие значения параметров факторов. Событие — это смена состояния одного или нескольких факторов. Предложенная модель позволяет строить ряд сценариев воздействия и развития сложных систем, при этом план стратегиче-

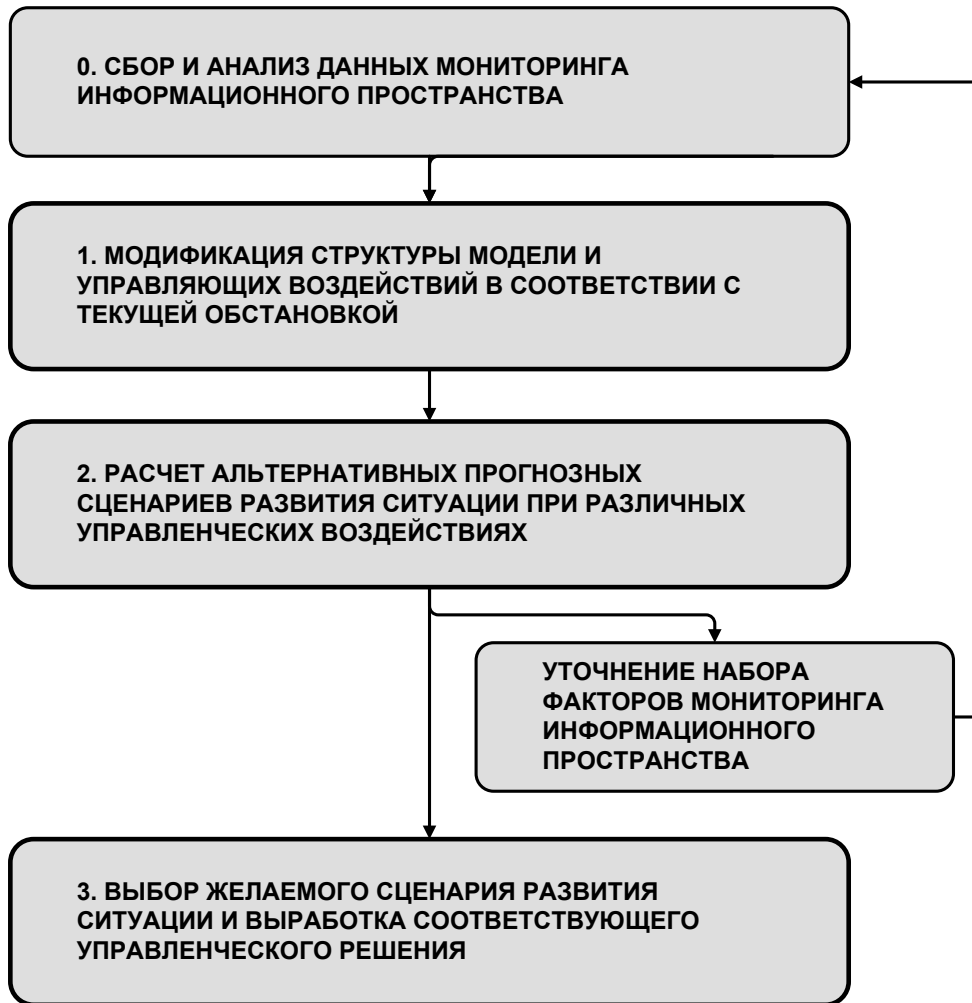


Рис. 2.

ского развития можно представить в виде множества планов отдельных этапов.

Проведенные широким кругом специалистов исследования показывают, что для подобных систем характерными особенностями являются наличие в модели факторов, связанных с коллективным сознанием, например, таких как «межнациональная напряженность» или «уровень жизни». Целью моделирования является ответ на вопрос, возможно ли за счет влияния на выделенный фактор привести целевой объект в состояние, удовлетворяющее целеполаганию. Имея модель объекта в виде объектов и связей между ними, мы можем расписать объект в виде вектора, состоящего из значений элементов. Соответственно, траектория — это набор векторов. Цель — вектор, удовлетворяющий заданным условиям.

Исключительно важное значение при информационном управлении имеет понятие «уязвимость». Уязвимость в данном случае имеет два значения. Прежде всего

это точка проникновения в систему (субъект управления) для того, чтобы через этот вход можно было осуществить необходимое воздействие, например информационное. Кроме этого, уязвимостью является способность субъекта управления откликнуться на это управляющее воздействие реализова цели объекта управления.

Использование в модели структуры взаимосвязей позволяет достигнуть следующих преимуществ:

1. Идентификация структурных уязвимостей моделируемой системы (обстановки), что позволяет:

- ◆ значительно расширить набор методов и направлений управляющих воздействий, позволяя выстраивать необходимую конфигурацию объекта (ситуации), наиболее отвечающим собственным интересам;
- ◆ экономить силы и средства, направляя собственные воздействия, на выявленные структурные уязвимости.







| НАЗВАНИЕ САЙТА | ▼ ПОСЕТИТЕЛИ | ◆ ВИЗИТЫ |
|--|------------------------------|---------------------------------|
| 1.  МОСКОВСКИЙ КОМСОМОЛЕЦ: главные новости и происшествия дня http://www.mk.ru | 6,770,720 <u>-11,221</u> | 24,294,425 <u>+1,118,959</u> |
| 2.  Российская газета http://www.rg.ru | 5,243,583 <u>-433,759</u> | 11,122,040 <u>-531,825</u> |
| 3.  Аргументы и Факты http://www.aif.ru/ | 4,294,771 <u>-666,182</u> | 9,827,383 <u>-1,694,694</u> |
| 4.  Издательский дом "КОММЕРСАНТЪ" http://www.kommersant.ru/ | 3,905,225 <u>+639,946</u> | 13,083,461 <u>+870,515</u> |
| 5.  Известия http://www.iz.ru | 3,607,526 <u>+582,811</u> | 7,229,053 <u>+1,199,453</u> |
| 6.  Свободная пресса http://svpressa.ru/ | 2,232,252 <u>+408,659</u> | 10,223,890 <u>+5,270,089</u> |

Рис. 3. Основа для формирования материалов в СМИ

2. Оценка и прогнозирование поведения моделируемой системы (ситуации) с учетом циклов обратной связи позволяет:

- ◆ прогнозировать не только краткосрочный эффект от собственных управляющих воздействий, но и долгосрочные последствия;
- ◆ решать обратную задачу управления, т.е. определять возможности и способы воздействия на выбранные факторы системы (рычаги управления), чтобы достичь желаемого сценария развития обстановки;

Следует отметить, что структура моделей может перестраиваться в соответствии с изменяющейся обстановкой на основе поступающих данных мониторинга (рис. 2).

Выходными результатами являются сценарии поведения системы или развития обстановки, т.е. последовательность значимых событий и изменений их характеристик во времени, а также оценка этих сценариев с точки зрения достижения целей управления.

В работах С.П.Расторгуева система также рассматривалась как совокупность элементов и связей между ними. Им было определено, что систему можно обучить (перепрограммировать) путем:

- ◆ изменение связей между элементами системы;
- ◆ изменение количества элементов;
- ◆ изменение функциональных возможностей (параметров) элементов.

Рассмотрим подход, в котором в качестве объекта управления предлагается использовать не структуру социальной группы, а те цели, идеи, представления,

аргументацию, которые являются «якорем» для сплочения членов этой группы. Таким образом, в качестве модели объекта управления выбирается не структурная формализация группы, а ее информационная формализация или, говоря в терминах настоящей статьи, факторы, связанные с коллективным сознанием. Само управление переходит в информационную сферу. Этот подход меняет понимание свойств информационной безопасности сложных систем. Представляется, что основным свойством сложной социотехнической системы будет способность противостоять негативным воздействиям, независимо от их природы, сохраняя параметры и качество управления. Как следствие свойство защищенности или безопасности определяется через способность противодействия угрозам дестабилизации или перепрограммирования системы.

В качестве примера рассмотрим одно из направлений реализации информационного управления, при котором публикуется некоторое решение или заявление органа власти. Возможной целью такого управления является положительный отклик на текст этого решения в различных социальных сообществах. При этом возникает следующая проблема. Текст ориентирован на широкий слой населения и безусловно не может соответствовать интересам каждого сообщества. Следовательно, параллельно с распространением текста необходимо проведение специальных информационных мероприятий, ориентированных именно на конкретные сообщества. Назовем эти мероприятия информационно-разъяснительными. Целью разработки и проведения подобных мероприятий является сближение позиций текста и интересов сообщества в целях консолидации общества и недопущения активного противостояния

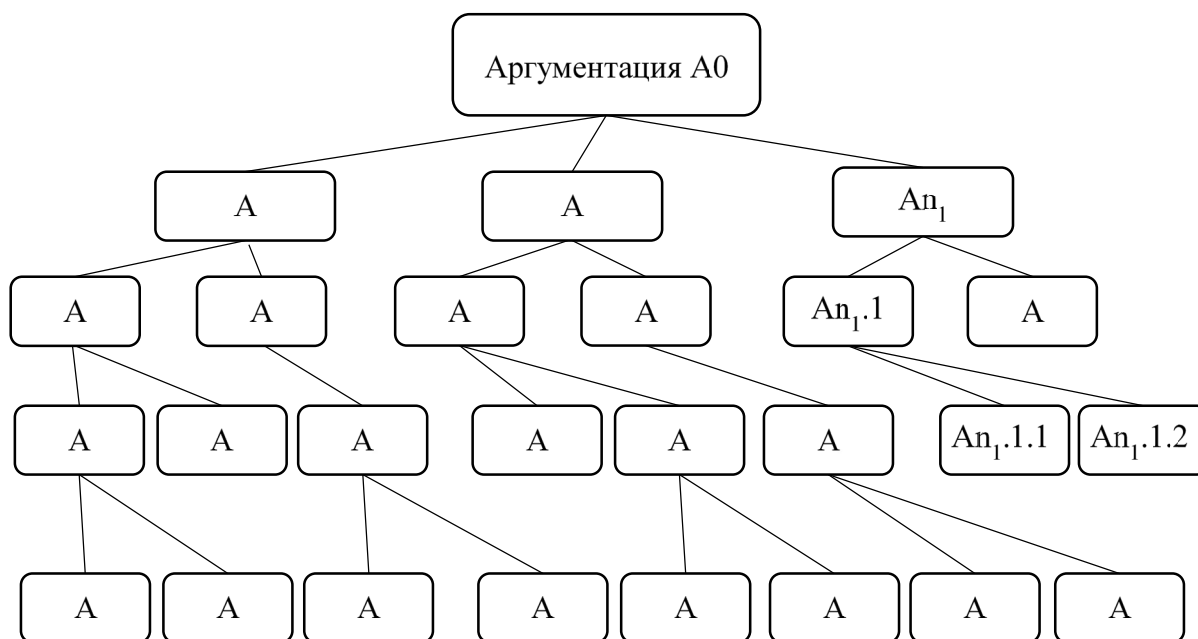


Рис. 4

и актов экстремизма. Таким образом параллельно с самим решением органа власти (а возможно и заранее), осуществляется еще и его информационная поддержка, причем в форме, наиболее отвечающей информационным моделям интересов каждой значимой социальной группы.

Необходимо отметить, что реакция на текст решения, которое рассматривается как значимое с точки зрения стратегического управления, обязательно найдет отражение в средствах массовой информации. При этом обобщенная схема использования источников для формирования результирующего мнения представлена на рис. 3.

Поле отражения факторов в коллективном сознании через различные информационные ресурсы, например сети Интернет, является многослойным. Внизу обычные люди, которые пишут о своих проблемах. Над ними лидеры мнений, которые выделяют и обобщают проблемы обычных людей. Над ними журналисты, которые ставят штамп «Об этом все говорят».

Исходя из предложенного на рис. 3 подхода, имеем двухступенчатую схему формирования и фиксации мнения: сначала мнение вырабатывается в различных социальных группах, находит свое отражение в социальных сетях и у лидеров мнений, а затем оно переходит в СМИ, которые обозначают его как выражение большинства заинтересованных лиц. Фиксация мнения в СМИ, в свою очередь, позволяет добавить для него дополнительных

сторонников за счет колеблющейся или неопределившейся части социума.

Проблема заключается в том, что большинство факторов моделей сложных социотехнических (социально-экономических) систем с понятийной точки зрения являются сложными объектами, практически не используемыми в обыденном сознании. Так, например, понятие «уровень жизни» практически не находит отражение в материалах, опубликованных за месяц и проиндексированных Яндексом.

Проведенные исследования показали, что сложные, близкие к абстрактным понятия, описываются в текстах, размещаемых в социальных сетях, блогах, иных ресурсах, как правило, через более простые понятия, образующие для сложного понятия свое семантическое ядро. Тем не менее, используя общедоступные средства мониторинга сети можно сформировать не только семантическое ядро, но и выделить некоторые устойчивые структуры аргументации, присущие отдельным социальным группам в виде графа, например в форме дерева. Дерево выбрано только для более наглядной иллюстрации подхода, в общем случае это может быть сетевая структура.

Предполагается следующий подход к планированию информационно-разъяснительных действий в социальных группах.

1. Строится общее дерево аргументации (рис. 4).

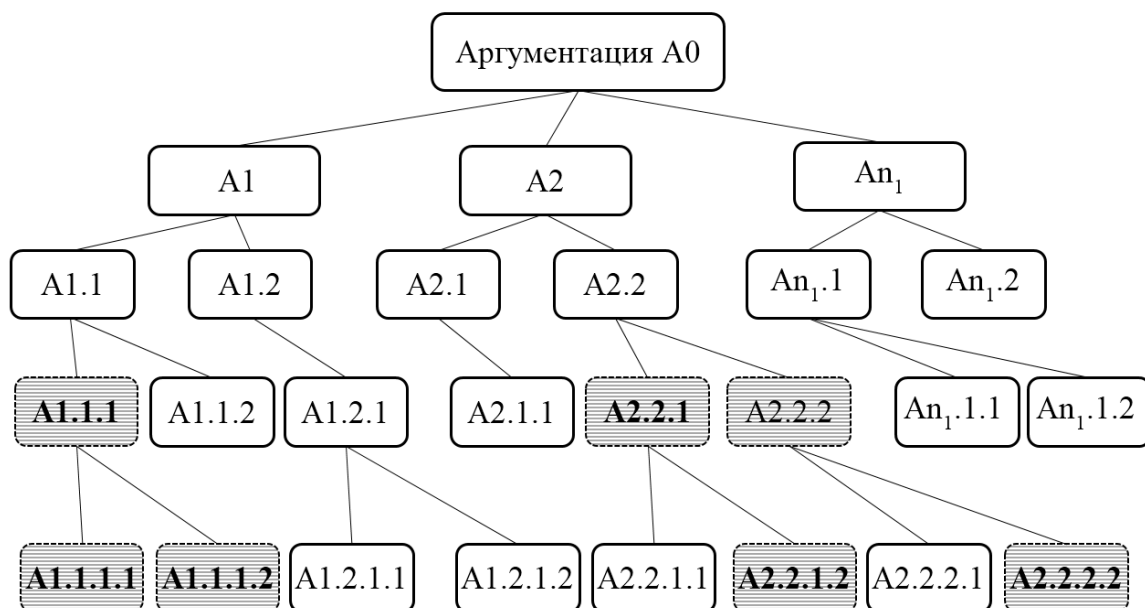


Рис. 5

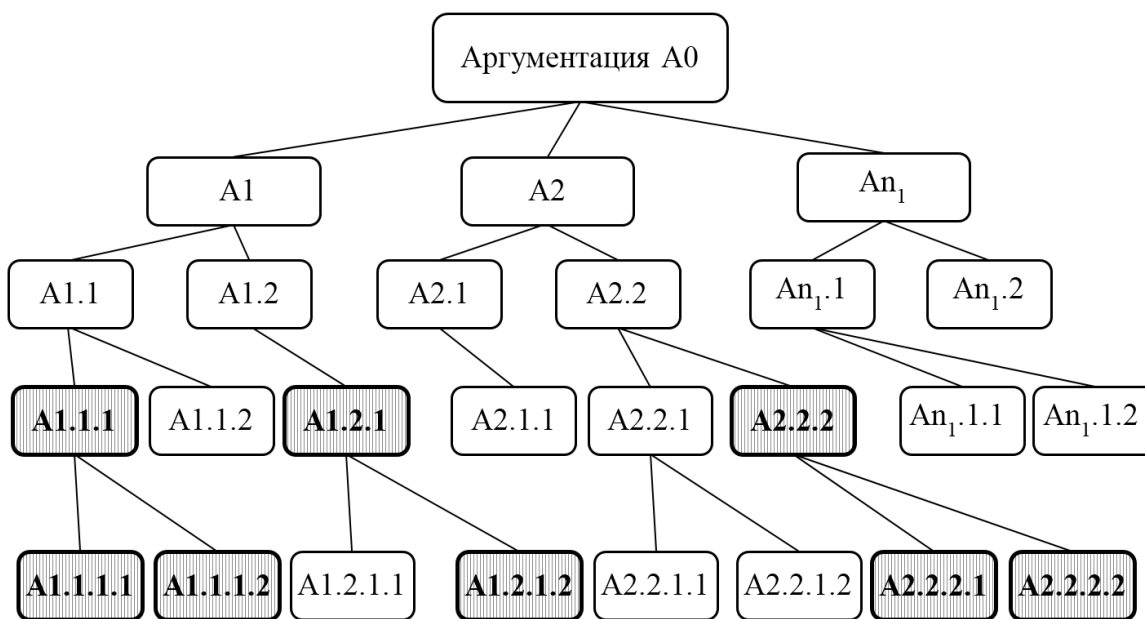


Рис. 6

В общем случае дерево аргументации представляет собой связанные между собой аргументы. Нижние слои аргументов являются предпосылками для верхних слоев (выводы). Аргументы в дереве связаны между собой конструкциями «И», «ИЛИ», «НЕ». Таким образом, если продвигаться от нижних слоев аргументации к верхним, то происходит обобщение аргументов методом последовательных выводов. Т.е. строится доказательная база аргументации того или

иного объекта, в качестве которого может выступать например: действия или указы правительства, тексты законов, устоявшиеся взгляды социальных групп или групп интересов, статьи, речи лидеров и т.д. Т.е. любое информационное событие или объект может быть представлен в виде фрагмента дерева аргументации. В дальнейшем для краткости будем обозначать действия или указы правительства, тексты законов как *текст органа власти*.

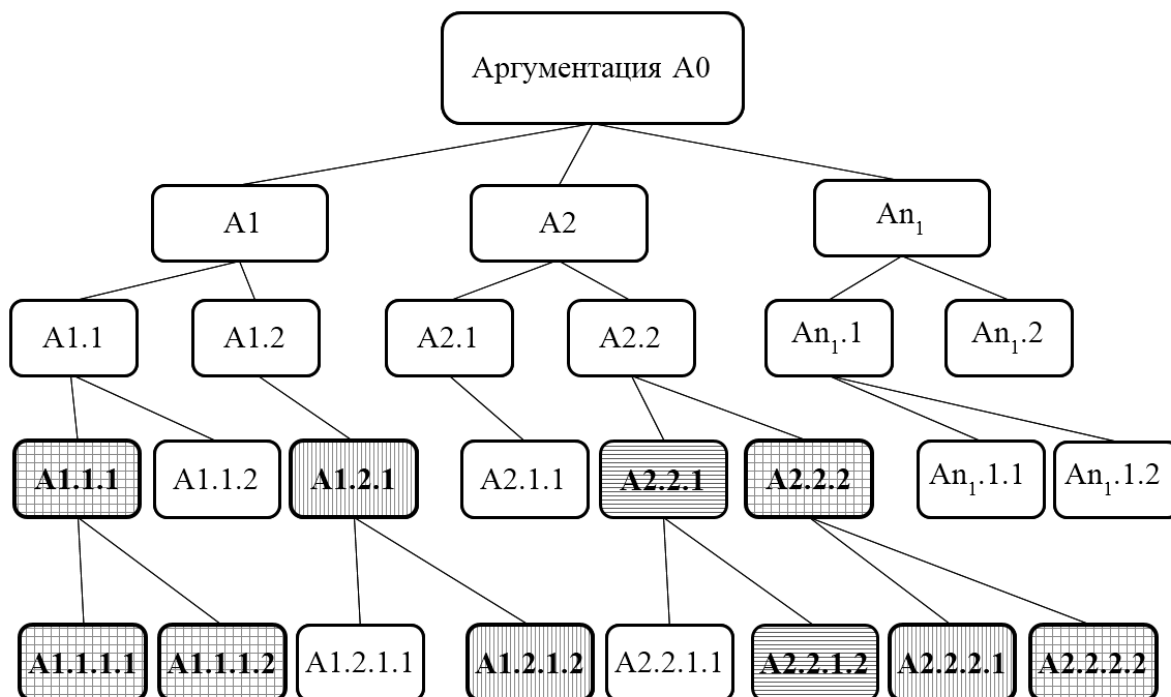


Рис. 7

2. Производятся несколько разметок дерева аргументации, например:

- ◆ Текст органа власти.
- ◆ Устойчивые мнения сообщества (общее знание) — якорь социальной группы.
- ◆ Устойчивые мнения локальной группы внутри сообщества.
- ◆ Лидер мнений.
- ◆ Успешные тексты («бестселлеры», тексты, уже получившие хороший отклик в социальной группе)
- ◆ Специфические социальные нормы социальной группы и т.д.

Например, ниже приведен пример разметки дерева аргументации по тексту органа власти (рис. 5).

На рис. 6. приведен пример разметки дерева аргументации по устойчивому мнению (якорю) социальной группы.

3. Производится совместная разметка нескольких деревьев аргументации.

Для того чтобы выяснить, насколько разные системы аргументации совпадают или далеки друг от друга и в чем именно они различаются, накладываем несколько полученных разметок на одно дерево, получая тем самым совместные разметки дерева аргументации. Самые простые варианты совместных разметок, это двумер-

ные разметки, т.е. совмещение двух разных разметок. На рис. 7. Представлен пример совместной разметки текста органа власти (рис. 5) и якоря социальной группы (рис. 6).

Совпадающие элементы разметок заштрихованы в клетку. Различающиеся элементы сохранили оригинальную разметку.

Результат совместной разметки на рис. 7 показывает, что существуют совпадающие аргументы и даже целые фрагменты дерева: A1.1.1, A1.1.1.1, A1.1.1.2, A2.2.2. В тоже время есть и не совпадения A1.2.1, A1.2.1.2, A1.2.1, A2.2.1, A2.2.1.2, A2.2.2.1.

Анализ такой совместной разметки показал, что все же есть совпадения, но есть и существенные различия в аргументации. Подобный метод может использоваться не только в целях анализа близости аргументаций, но и являться основой для планирования направлений информационного управления.

4. Планирование и управление информационно-разъяснительными мероприятиями. Сближение аргументаций.

На рис. 8 представлена схема сближения аргументаций на основе использования дерева совместных разметок текста и якоря сообщества.

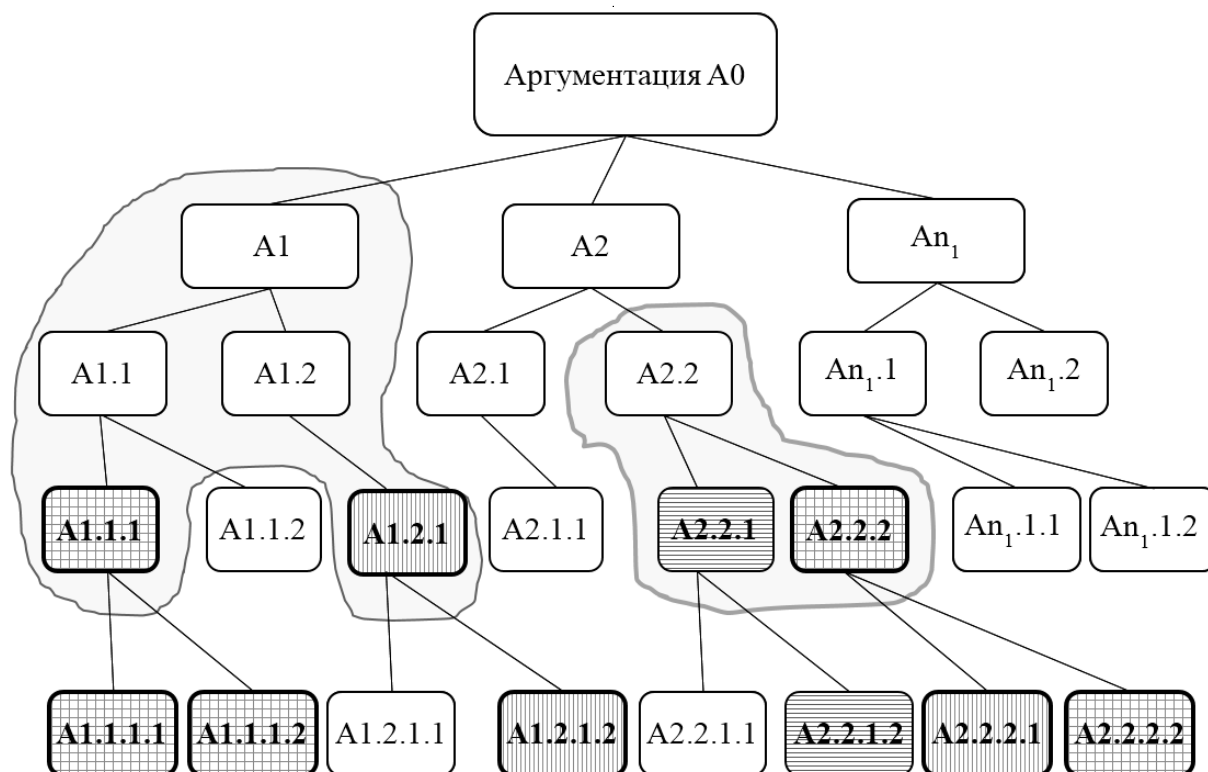


Рис. 8

Данная схема, по сути, является скелетной конструкцией формирования информационно-разъяснительных мероприятий, направленных на сближение мнения (интересов) сообщества с мнением (интересами) органа власти.

Алгоритм «Укрепление аргументации»:

1. Находятся конечные аргументы (выводы) совпадающих и несовпадающих аргументаций. В данном примере это А1.1.1 и А1.2.1
2. Производится поиск всех транзитивных замыкание между найденными аргументами. На представленной схеме (рис. 8.) это всего один такой путь, но их может быть и больше.
3. Для каждого транзитивного замыкания ищется аргумент самого верхнего уровня. Фактически этот аргумент представляет собой наиболее общий случай аргументирования, с которым согласны обе стороны (орган власти и сообщество).
4. Строится первая часть скелетной конструкции сближения аргументов, от конечного совпадающего аргумента текста. Назовем эту часть «восходящей». Фактически это и есть восхождение от частной аргументации текста к общему аргументу, который устраивает обе стороны. Все промежуточные аргументы этой цепочки автоматически выстраиваются в объяснение, что позиция

власти соответствует аргументу самого верхнего уровня (общему аргументу) в этом найденном пути на графе аргументации.

5. Далее строится вторая часть скелетной конструкции сближения аргументов, от общего аргумента найденного пути (транзитивного замыкания) до конечного аргумента сообщества несовпадающего с аргументами текста. Назовем эту часть «нисходящей». Все промежуточные аргументы этой цепочки автоматически выстраиваются в объяснение, как наиболее общие аргументы согласуются с позицией сообщества.
6. Использование найденных скелетных конструкций аргументаций в информационно-разъяснительных.

Возможны также другие варианты совместных разметок дерева аргументации. Приведем краткие характеристики совместных двумерных разметок:

1. **Текст + Устойчивое мнение сообщества (якорь сообщества).** Пример такой разметки описан выше. Применяется для сближения мнений сообщества с действиями органов власти

2. **Текст + Устойчивое мнение локальной группы внутри сообщества (локальный якорь).** Применяется для сближения мнений социальной группы внутри

сообщества с действиями органов власти в тех случаях если работа с сообществом в целом является слишком затратной или в случае неоднородности сообщества, когда необходимо применение несколько стратегий информационно-разъяснительных мероприятий.

3. Текст + Лидер сообщества. Применяется для повторения успеха лидера, имитируя его способы (информационные шаблоны) аргументации, которые положительно воспринимаются сообществом.

4. Текст + Успешный текст. Применяется для повторения успеха ранее существующего текста, который был положительно воспринят членами сообщества («бестселлера»), имитируя его аргументацию, а возможно и стиль.

5. Текст + Специфические социальные нормы сообщества. Применяется для сближения изложенный в тексте аргументов и существующих социальных норм, и правил сообщества, с которыми он может не совпадать или даже противоречить.

6. Устойчивое мнение сообщества (якорь сообщества) + Устойчивое мнение локальной группы внутри сообщества (локальный якорь). Применяется при планировании информационно-разъяснительных мероприятий, которые направлены на консолидацию социального сообщества или, напротив, на его развал путем отделения от него локальных социальных групп.

7. Устойчивое мнение сообщества (якорь сообщества) + Лидер сообщества. Применяется при планировании информационно-разъяснительных мероприятий, которые направлены на укрепление роли лидера социального сообщества или, напротив, на его дискредитацию внутри сообщества.

8. Устойчивое мнение локальной группы внутри сообщества (локальный якорь) + Лидер мнений. Применяется при планировании информационно-разъяснительных мероприятий, которые направлены на укрепление роли лидера социального сообщества в локальной группе (укрепление сплочения сообщества вокруг лидера) или, напротив, на его дискредитацию внутри локальной группы (ослабление влияния лидера, возможное появление нескольких лидеров, что вносит уязвимость в сообщество и расширяет ассортимент внешних управляющих воздействий).

9. Устойчивое мнение локальной группы внутри сообщества (локальный якорь) + Успешный текст. Применяется для повторения успеха ранее существующего текста, который был положительно воспринят членами локальной группы сообщества («бестселлера»),

имитируя его аргументацию, а возможно и стиль. Если затруднительно положительное (или отрицательное в зависимости от цели информационного управления) восприятие текста всем сообществом, например, при длинных цепочках сближения аргументаций, то возможно существуют более короткие такие цепочки для отдельной локальной группы. В этом случае, локальная группа играет роль информационно уязвимой подструктуры сообщества, являясь проводником информационно-разъяснительных мероприятий внутри сообщества.

10. Устойчивое мнение локальной группы внутри сообщества (локальный якорь) + Специфические социальные нормы сообщества. Применяется при планировании информационно-разъяснительных мероприятий, которые направлены на консолидацию социального сообщества или, напротив, на его развал путем отделения от него локальных социальных групп, которые различаются некоторыми взглядами на общие социальные нормы.

11. Лидер мнений + Успешный текст. Применяется для повторения лидером успеха ранее существующего текста, который был положительно воспринят членами сообщества («бестселлера»), имитируя его аргументацию, а возможно и стиль. Если решается противоположная задача по дискредитации лидера или снижение его роли, то целью планировании информационно-разъяснительных мероприятий будет являться поиск противоречий аргументации лидера и успешно воспринятой информации членами сообщества.

12. Лидер мнений + Специфические социальные нормы сообщества. Применяется при планировании информационно-разъяснительных мероприятий, которые направлены на усиление или ослабление роли лидера социального сообщества.

Как уже было замечено ранее, лидеров, локальных групп и успешных текстов может быть несколько. В таком случае, могут появляться принципиально новые двумерные разметки между однородными элементами матрицы, например:

13. Лидер N + Лидер M. Применяется при планировании информационно-разъяснительных мероприятий, которые направлены на ослабление или усиление конкуренции лидеров N и M, сближения или ослабления их взглядов, что в конечном итоге приводит или к сглаживанию, или усилению уязвимостей социального сообщества.

14. Устойчивое мнение локальной группы N + Устойчивое мнение локальной группы M. Применяет-

ся при планировании информационно-разъяснительных мероприятий, которые направлены на консолидацию социального сообщества или, напротив, на его развал путем отдаления локальных социальных групп N и M.

15. Успешный текст N + Успешный текст M. Применяется для выявления новых цепочек аргументаций, основанных на пересечении или объединении двух «бестселлеров». Также подобная разметка может применяться для поиска противоречий бестселлеров, что может послужить основой для планирования информационно-разъяснительных мероприятий, которые направлены на консолидацию сообщества путем усиления общего якоря или напротив, для появления новых локальных якорей внутри сообщества, что может привести к появлению соответствующих информационных уязвимостей, которые при их активации могут развалить сообщество.

Возможно также расширение матрицы, путем включения в нее событий внешнего мира (политические, экономические и т.п.), которые нашли значимый отклик внутри сообщества. Для этого, стоит разработать классификацию событий внешнего (относительно рассматриваемого сообщества) мира, например, по сферам, участникам, последствиям и т.п. Дальнейшим шагом в работе является прогнозирование появления подобных событий, например на основе сценарного подхода, описанного выше, с целью раннего информационного предупреждения реакции выбранных социальных сообществ и предварительного планирования проведения информационно-разъяснительных мероприятий в соответствии с поставленной целью. Предлагается решение подобной задачи прогнозирования на основе методики сценарного анализа и поддержки принятия управленческих решений.

Следующим может быть формирование и использования многомерных совместных разметок дерева аргументации. В качестве примера трехмерной разметки можно привести такую:

Текст + Устойчивое мнение сообщества (якорь сообщества) + Событие внешнего мира. Применяется для сближения мнений сообщества с действиями органов власти при возникновении определенного события. Например, содержимое текста (указа президента страны) о снижении анонимности в сети Internet может вызвать резко негативную реакцию некоего социального сообщества, сильной ветвь которого в дереве аргументации якоря является требование максимальной информационной свободы. Пути сближения аргументаций могут быть слишком длинные и выходить на слишком высокие общие вершины в дереве, что чревато потерей конкретики (чем выше уровень общего аргумента в дереве, тем более общие рассуждения). Появление новой событийной разметки, связанной, например, с террористическим актом, который затрагивает все общество, способно усилить аргументацию власти либо с помощью новых путей, либо, что более действенно, сокращением пути сближения аргументов. Таким образом, пример этой трехмерной разметки дерева аргументаций позволяет усилить релевантность текста интересам сообщества, за счет усиления общечеловеческих интересов и адекватности текста текущим событиям.

В заключении следует отметить, что данная статья является только началом серьезной работы авторов в сфере информационного управления социальными сообществами, продолжение которой может развиваться в разных направлениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шульц В.Л., Кульба В. В., Шелков А. Б., Чернов И. В. Информационное управление в условиях глобализации. М.: ИПУ РАН, 2017. — 130 с.
2. Шульц В.Л., Кульба В. В., Шелков А. Б., Чернов И. В. Сценарный анализ в управлении геополитическим информационным противоборством. М.: Наука, 2015. — 542 с.
3. Расторгуев С. П. Математические модели в информационном противоборстве. Экзистенциальная математика. — М.: АНО ЦСОиП, 2014.
4. Гриняев С.Н., Правиков Д. И. Основы общей теории киберпространства. Теория боя в киберпространстве. — М.: АНО ЦСОиП, 2018. — 124 с.
5. Гриняев С.Н., Правиков Д. И. Об одном подходе к описанию сложных социотехнических систем. // Информационные войны. 2018. № 2 (46), стр. 34–37.

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГОТОВНОСТИ ЕДИНИЦ ПРОТИВОПОЖАРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ АСУТП НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ТЭК

FORECASTING TECHNIQUE OF READINESS OF UNITS OF FIRE-FIGHTING EQUIPMENT OF APCS AT ENTERPRISES OF FUEL AND ENERGY COMPLEX USING STRATEGIC PLANNING

Yu. Prus
A. Kryuchkov
I. Samarin
A. Strogonov

Summary. The method of assessment of forecasting of readiness of fire forces and means at the enterprise of fuel and energy complex (FEC) using strategic planning is considered. This method can be applied in the process of control support in monitoring the readiness of pieces of fire-fighting equipment of automated process control systems (APCS) to the occurrence of dangerous situations associated with fires and explosions. The aim of this monitoring is identifying vulnerabilities of fire safety at FEC facilities using the graph of strategic planning. The construction of the forecasting model is based on the analysis of the functioning of the system of fire forces and means of FEC facility. The system makes direct and reverse transitions between individual states. The process of forecasting and monitoring is going in such system. To simplify the analysis of the system operation the simulated transition process was adopted by Markov process. Taking into account the described function of the intensity of the flow of adverse events detected during monitoring for separate units of equipment, as well as the intensity of the flow of recovery events for the lower level of aggregated units of fire-fighting equipment, the equations of readiness of fire forces and means of some facility of FEC are determined in the form of Kolmogorov equations. The proposed technique can be used in the control part of the APCS. This part is called automated system of fire and explosion protection. It ensures the implementation of fire safety. An integral part of this system is an automated fire and explosion prevention system, for which the application of the described method is actual.

Keywords: readiness of fire forces, degree of readiness, readiness assessment, readiness indicator, automated process control system, automated system of fire and explosion protection, fuel and energy complex, management support, fire safety, fire equipment, piece of equipment, fire automatic, strategic planning, monitoring, hierarchy, plan.

Прус Юрий Витальевич

*Д.ф.-м.н., профессор, Российский государственный
социальный университет*

Крючков Алексей Вячеславович

*К.т.н., доцент, РГУ нефти и газа (НИУ) имени
И. М. Губкина*
kruchkov.a@gubkin.ru

Самарин Илья Вадимович

*К.т.н., доцент, РГУ нефти и газа (НИУ) имени
И. М. Губкина*
ivs@gubkin.ru

Строгонов Андрей Юрьевич

Аспирант, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина

Аннотация. Рассмотрен способ оценки прогнозирования готовности пожарных сил и средств на предприятии топливно-энергетического комплекса (ТЭК) с использованием методов стратегического планирования. Метод может быть применён в процессе поддержки управления при проведении мониторинга готовности единиц противопожарного оборудования автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) к возникновению опасных ситуаций, связанных с пожарами и взрывами. Целью данного мониторинга является выявление уязвимостей обеспечения пожарной безопасности на объектах ТЭК с помощью графа стратегического планирования. Построение модели прогнозирования основано на анализе функционирования системы пожарных сил и средств объекта ТЭК. Система, в которой проходят мероприятия прогнозирования и осуществляется мониторинг, совершает прямые и обратные переходы между отдельными состояниями. Для упрощения анализа работы системы моделируемый процесс переходов принят Марковским. С учётом описанной функции интенсивности потока неблагоприятных событий, выявляемых в ходе мониторинга для отдельных единиц оборудования, а также интенсивности потока событий восстановления для нижнего уровня агрегированных единиц противопожарного оборудования уравнения готовности пожарных сил и средств некоторого объекта ТЭК определены в виде уравнений Колмогорова. Предложенная методика может использоваться в управляющей части АСУТП, называемой автоматизированной системой пожаровзрывобезопасности, обеспечивающей выполнение мероприятий пожарной безопасности. Составной частью такой системы является автоматизированная система предотвращения пожаров и взрывов, для которой применение описанного метода является актуальным.

Ключевые слова: готовность пожарных сил, степень готовности, оценка готовности, показатель готовности, автоматизированная система управления технологическими процессами, автоматизированная система пожаровзрывобезопасности, топливно-энергетический комплекс, поддержка управления, пожарная безопасность, пожарное оборудование, единица оборудования, пожарная автоматика, стратегическое планирование, мониторинг, иерархия, план.

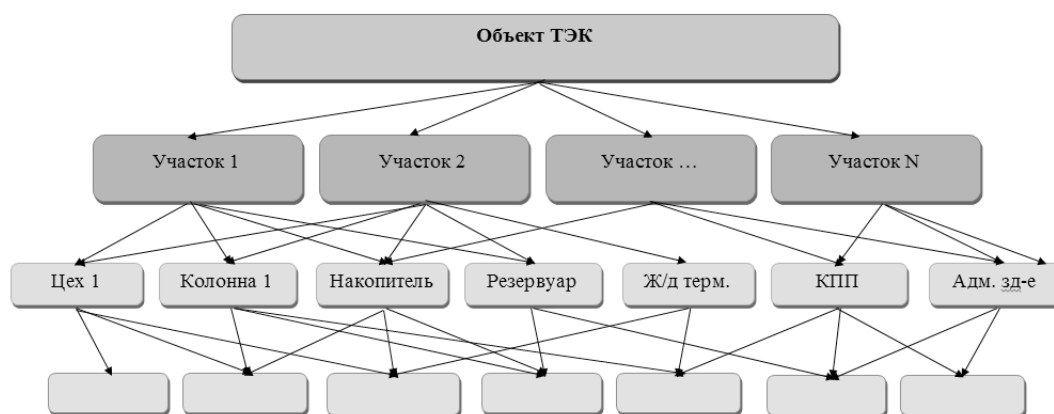


Рис. 1. Пример графа стратегического планирования в иерархии мониторинга готовности пожарных сил и средств на объекте ТЭК

Введение

Проведение мероприятий по интенсификации производства на объектах топливно-энергетического комплекса (ТЭК) существенно повышает требования к пожарной безопасности (ПБ) на таких объектах. Готовность пожарной автоматики в автоматизированных системах управления технологическими процессами (АСУТП), а также планирование мероприятий по приведению соответствующего оборудования в состояние необходимой готовности становятся приоритетными направлениями в предотвращении возникновения пожаров и взрывов на объектах ТЭК. Немаловажным является контроль за выполнением требований стандартизации в области управления безопасностью [1].

Реализацию планов по предотвращению чрезвычайных и опасных ситуаций на объектах ТЭК принято вести в плановом порядке. Одним из способов реализации таких планов является план проведения профилактических работ, в рамках которого выполняются действия по осмотру ремонтными необходимыми для регистрации параметров среды на объекте ТЭК оборудования АСУТП. В [2] представлено обоснование необходимости непрерывной диагностики оборудования АСУТП, а также перечень мероприятий по предотвращению пожаров и взрывов. Учитывая разнородность направлений деятельности и возможное неполное проведение запланированных мероприятий, целесообразно использовать для его разработки и оценки прогнозирования рисков ПБ, а также готовности соответствующих пожарных сил и средств набор методов стратегического планирования.

Наиболее проработанным с научной точки зрения для такого прогнозирования является математический

аппарат подсистемы предотвращения пожаров и взрывов автоматизированных систем пожаровзрывобезопасности (АСПВБ) объектов ТЭК. Функционирование АСПВБ нефтеперерабатывающих производств [3] проходит в условиях непрерывного оборота пожароопасных веществ, используемых в качестве сырья, продуктов переработки и побочных продуктов производства. В связи со спецификой протекающих на подобных объектах производственных процессов время реагирования на нештатную ситуацию лицом, принимающим решение (ЛПР), крайне ограничено. Для принятия единственного верного решения в короткий промежуток времени ЛПР необходима максимально полная, подтвержденная информация об объекте управления [4]. Такую информацию ЛПР могут получать благодаря функциональным программным модулям АСПВБ. Автоматизированная система предупреждения пожаров и взрывов предназначена «для автоматизированного управления профилактическими противопожарными работами, автоматизированного решения задач по предотвращению предпожарных и взрывоопасных режимов, включая автоматизированное управление экологическим мониторингом» ([3], с. 130). В рамках работы данной подсистемы АСПВБ необходимо тщательное планирование. Следует постоянно учитывать текущий уровень готовности пожарных сил и средств на объектах ТЭК, исходя из времени их работы, актуальности выдаваемой ими информации, финансирования мероприятий по поверкам и т.п.

Для этих оценок текущего уровня готовности пожарных сил и средств, а также возможных затрат на обеспечение необходимого уровня их готовности в случае передачи ряда функций по их обслуживанию и ремонту сторонней организации, следует подготовить предложения по автоматизированной поддержке управления. Применение методов стратегического планирования для этого представляется целесообразным и полезным.

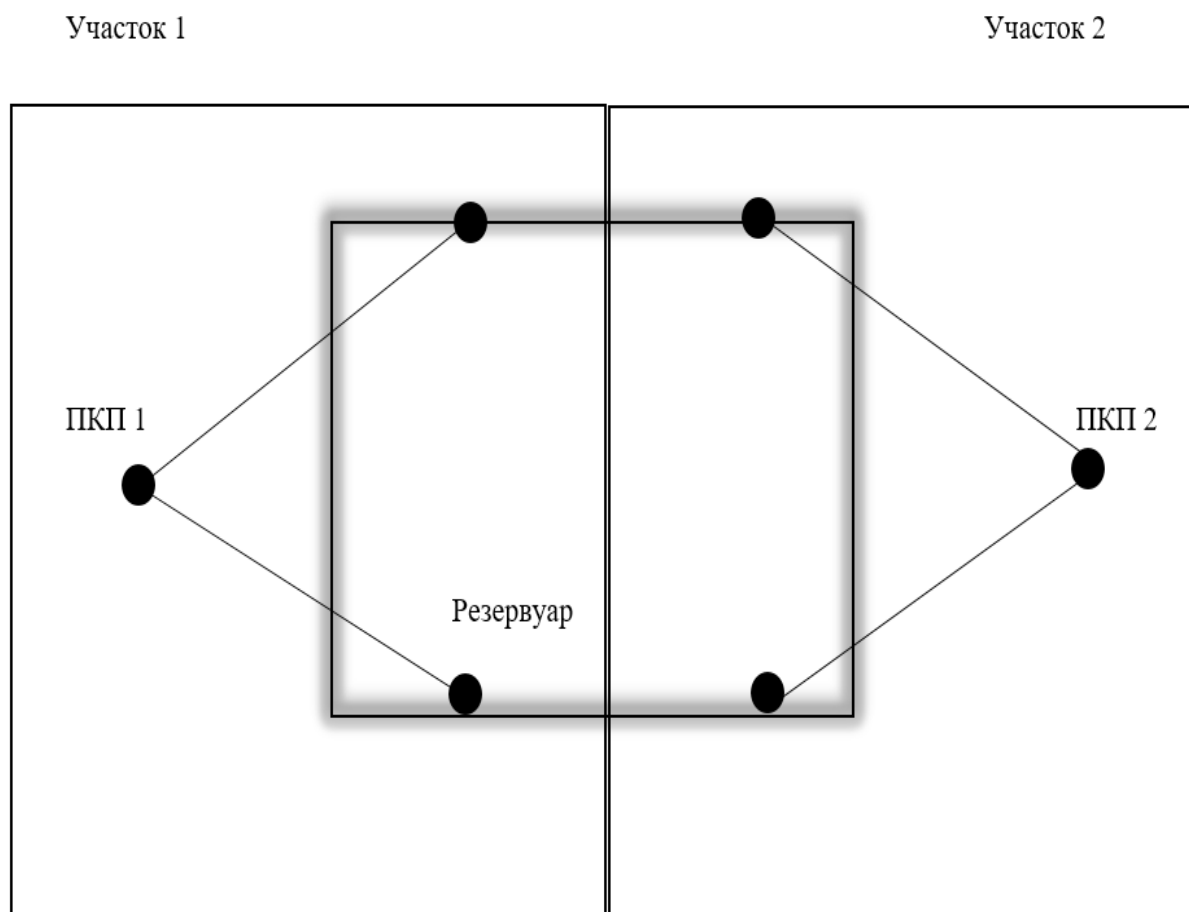


Рис. 2. Пример размещения пожарных сил и средств на подобъекте ТЭК

Методы исследования

Основу таких методов составляет применение математических моделей, позволяющих вырабатывать обоснованные организационные и управленческие решения в заданном направлении, основываясь на учете вклада в общий показатель эффективности отдельных проводимых мероприятий. Мероприятия прогнозирования готовности пожарных сил и средств на объектах ТЭК распределены по уровням значимости относительно главной выбранной цели.

[5]. Поэтому модели, описывающие динамику изменений их готовности заданного объекта ТЭК, следует выстраивать не только на основе рассмотрения переходов между различными состояниями моделируемой системы, но и с учетом вклада каждого из переходов в общий уровень готовности. Для этого следует прежде всего рассматривать возможные состояния готовности пожарных сил и средств объектов ТЭК, исходя из различий по степени их готовности, устанавливаемых в результате проведения их мониторинга [5]. Будем здесь и далее

под словом «система» понимать систему пожарных сил и средств объекта ТЭК.

Известно, что при функционировании в заданных условиях оцениваемая система (система, в которой проходят мероприятия и осуществляется мониторинг) совершает переходы между отдельными состояниями, которые можно охарактеризовать как прямые и обратные.

При этом «прямые» переходы вызваны возникновением и выявлением неисправностей в системе пожарных сил и средств объекта ТЭК в ходе их эксплуатации [6]. А «обратные» являются следствием проведенных восстановительных мероприятий. Определение алгоритма расстановки приоритетов в очередности таких мероприятий при существующих ограничениях человеческих и финансовых ресурсов является одним из элементов выстраиваемого средства поддержки управления. Его применение будет основано также на учете интенсивности восстановления пожарных сил и средств при условии их нахождения в заданном состоянии готовности и учете интенсивности событий выявления не-

готовых их единиц, которые могут впоследствии привести к пожарам и взрывам.

Для количественного описания в системе переходов следует использовать различные факторы оценки, связанные факторами эксплуатации (типа сил и средств, срок эксплуатации, климатические и иные условия применения, агрессивность среды и т.п.). Примем во внимание особенности применения математического аппарата теории случайных процессов Марковского типа с дискретными состояниями при моделировании пожарных рисков в социотехнической системе [7]. Учитывая, что отдельные возможные состояния рассматриваемой системы поддаются перечислению, а переходы между ними происходят мгновенно, моделируемый процесс переходов можно рассматривать, как случайный процесс с дискретными состояниями. А так как моменты переходов из одного состояния в другое случайны, то динамику изменения готовности пожарных сил и средств на объекте ТЭК с применением стратегического планирования удобно проводить еще и с непрерывным временем.

Если принять, что данный процесс является Марковским, то анализ работы системы можно существенно упростить. При этом известно, что такие процессы являются случайными без последствий. Иными словами, для любого момента времени вероятностные характеристики процесса в системе в заданный момент времени зависят только от состояния этого процесса в данный момент, и не зависят от времени, когда система оказалась в этом состоянии.

Обычно вероятность искомой степени готовности пожарных сил и средств объекта ТЭК в любой рассматриваемый промежуток времени не зависит от степени их готовности в прошлом. Следовательно, вероятностное моделирование такой системы можно вести с использованием аппарата Марковских моделей.

Дискретные состояния рассматриваемой системы определяются рядом критериев, отражающих события, связанные с потенциальным выявленным в результате мониторинга отказом единицы пожарного оборудования или его восстановлением ремонтной бригадой. Для простоты на первом этапе можно пренебречь вероятностью одновременного выявления и ремонта двух и более единиц оборудования. Тогда переход в новое состояние при функционировании модели будет связан с условным «отказом» и безусловным восстановлением данной единицы. А определение наличия того или иного состояния системы будет возможно по заданным величинам выбранных критериев оценки.

Рассчитаем количественные оценки, учитывая, что нам важен не только сам факт возникновения события,

ведущего к восстановлению единицы пожарных сил и средств, но и порядок этого восстановления. Тогда число возможных состояний для одной единицы оборудования, имеющей n состояний, системы может определяться как число размещений для n его исправных состояний и k выявленных

$$A_n^k = \frac{n!}{(n-k)!}, \quad (1)$$

$$\tilde{N}_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}.$$

А общее число состояний будет определяться исходя из количества N_s единиц оборудования

$$N_s = \sum_{k=1}^n \frac{n!}{(n-k)!}. \quad (2)$$

В тех случаях, когда порядок восстановления не имеет принципиального значения, вместо размещений можно использовать сочетания. В этих случаях количество состояний оборудования при обнаружении его состояний, которые могут привести к опасным последствиям, будет определяться так

$$\tilde{N}_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}. \quad (3)$$

А общее число этих состояний для заданной i -той единицы оборудования

$$N_s^i = \sum_{k=1}^n \frac{n!}{k!(n-k)!}. \quad (4)$$

При подобном упрощении число состояний для i -той единицы оборудования в графе динамики готовности

пожарных сил и средств будет определяться как $k!$, исходя из количества возможных угроз при выявленных нарушениях обслуживания или восстановления.

Теперь еще раз проясним ситуацию с пожарными силами и средствами. Каждый объект ТЭК включает в себя большое количество территориально разнесенных объектов, которые имеют свои средства оповещения о пожаре — датчики АСПВБ первого уровня информирования, замыкаемые на концентраторы и контроллеры пожарной автоматики [8]. Эти подобъекты (участки территории, здания, сооружения и их группы, цеха, колонны, резервуары, хранилища и т.п.) имеют свою иерархию. Соответственно можно считать, что за единицу оборудования пожарных сил и средств можно принять все датчики и контроллеры в заданной зоне, считая, что их состояния (исправен — не исправен, проверен — не проверен, и т.п.) будут различными состояниями более крупной единицы (подобъекта ТЭК).

При проведении мониторинга в соответствии с методами стратегического планирования проводится определение итогового заключения о готовности тех или иных частей объекта ТЭК (в соответствии с его иерархией). Результатом данного процесса будет выявление в графе стратегического планирования [9] уязвимостей обеспечения ПБ. Изначально они и будут являться теми состояниями, которые следует учитывать в (4) для каждого из них. В этом случае мы будем иметь укрупненные состояния, которые необходимо будет учитывать при расчёте агрегатного показателя готовности пожарных сил и средств объекта ТЭК.

В случае применения указанной схемы поддержки управления общее число состояний в графе моделирования динамики готовности пожарных сил и средств всего объекта ТЭК необходимо сложить данные из (4) для всех единиц оборудования

$$Z_s = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{n^i} \frac{n^i!}{k!(n^i - k)!} \quad (5)$$

где Z_s — общее число состояний единиц оборудования на объекте ТЭК при определении их готовности;
 n^i — число состояний готовности для i -той единицы оборудования;
 N — общее число единиц оборудования.

Но, так как в реальных условиях число подобных состояний в графе динамики готовности слишком велико, удобно рассматривать построение такого графа в соответствии с иерархией объекта ТЭК для отдельных его частей. Так, например, в цехе, где используется 6 условных единиц оборудования (2 колонны, 2 резервуара с сырьем и 2 накопителя продукции) степень их готовности может определяться исходя из количества выбранных для данного подобъекта выявляемых состояний. Если принять, что каждый из перечисленных составных частей имеет агрегированный показатель готовности, заданный булевой функцией, причем каждый тип оборудования имеет совмещенный контроллер второго уровня АСУТП, то мы имеем для них 12 условных состояний, которые могут быть выявлены в ходе мониторинга. Блок оборудования каждой единицы оборудования (колонн, резервуаров или накопителей) может быть неисправным или исправным.

Если же рассматривать случай, когда неисправны три единицы данного оборудования из шести заданных, то можно говорить для данного подобъекта о 20 возможных состояниях в графе динамики готовности пожарных сил и средств (3). В этом случае расчет числа состояний и переходов между ними следует вести также, как выполнено в [6], только по-другому интерпретируя объекты, для которых ведется расчет (рис. 1).

Пример графа стратегического планирования по аналогии с [9] показывает, каким образом возможна декомпозиция задач мониторинга готовности пожарных сил и средств на объектах ТЭК. Вершины приводимого графа на третьем уровне намеренно показаны связанными с вершинами второго уровня так, что ряд вершин третьего уровня связан с несколькими вершинами второго уровня. Это очевидно объясняется тем, что отдельные звенья пожарных сил и средств, которые применяются в реальных условиях на объектах ТЭК, могут иметь связанные органы управления или информирования второго уровня АСПВБ на различных подобъектах объекта ТЭК. Например, отдельные элементы (наборы датчиков), установленные на накопитель продукции, замыкаются на коммутаторы первого и второго участков. На рис. 2 показано, как это можно осуществить. Черными точками показаны датчики (газовые пожарные извещатели первого уровня АСУТП [10]) и приборы пожарно-контрольные (ПКП). При этом установленные на различных участках ПКП контролируют отдельные части резервуара.

Учитывая, что факты выявления неготовности или иных причин, которые могут привести к опасным ситуациям или пожарам, при эксплуатации установленных на объекте ТЭК сил и средств не всегда имеют такие последствия, будем далее называть их неблагоприятными событиями. Для описания характера динамики устранения возможных последствий таких событий потребуется зафиксировать определенный уровень агрегации для выбранных к обработке в системе поддержки управления АСПВБ пожарных сил и средств. При этом примем все задействованные для данного подобъекта ТЭК пожарные силы и средства за агрегированную единицу оборудования соответствующего уровня.

Тогда, применяя на каждом из уровней к каждому из подобъектов объекта ТЭК граф стратегического планирования (рис. 1) можно получить агрегированный показатель готовности пожарных сил и средств на объекте ТЭК для каждого подобъекта (i -той агрегированной единицы оборудования: цеха, колонны, накопителя и т.п.). Для этого необходимо ввести функцию γ_i интенсивности потока неблагоприятных событий, выявляемых в ходе мониторинга для i -той единицы агрегированной оборудования

$$\gamma_i = (R_i, T_i, W_i, C_i), \quad (6)$$

где R_i — тип используемых ПКП или иных единиц оборудования;

T_i — срок реальной эксплуатации агрегированной единицы оборудования (помимо этого в сроках могут отдельно отмечаться сроки до наступления даты оче-

редной проверки, срок до окончания срока эксплуатации и т.п.);

W_i — производственные условия эксплуатации (актуально для участков объекта ТЭК с агрессивной средой, сокращающей сроки службы агрегированных единиц оборудования);

C_i — климатические условия в районе эксплуатации.

Так как мониторинг пожарных сил и средств на объекте ТЭК представляет собой поток дискретных во времени событий, то будем считать функцию γ_i дискретной случайной величиной со своей функцией распределения [11]. При этом каждое выявленное неблагоприятное событие становится для графа динамики готовности пожарных сил и средств прямым переводом его в новое состояние. А работа ремонтных бригад объекта ТЭК по устранению этих событий в соответствии с иерархическим планом, определенным графом стратегического планирования, обратным переходом. Интенсивность потока событий восстановления готовности определяется состоянием ремонтных бригад или соглашениями об уровне сервиса (в случае использования услуг сторонних организаций).

Если говорить об общем количестве пожарных сил и средств на объекте ТЭК, требующих ремонта, то следует также определить приоритеты, в соответствии с которыми он будет проходить. Будем при этом основываться на агрегированных единицах оборудования при их постановке.

Тогда для i -той агрегированной единицы пожарного оборудования необходима проверка наличия в очереди на ремонт другой сходной единицы, которую следует восстановить ускоренными темпами. Попарное их сравнение даст возможность установить бригаде приоритет очередности при их обслуживании или ремонте. После каждой такой операции следует проверить условие учёта всех агрегированных единиц пожарных сил и средств, которым необходимы обслуживание или ремонт. Только после этого следует выполнить расчеты для следующей единицы.

Когда будут обработаны все единицы, то следует выбрать агрегированную единицу пожарного оборудования с максимальным приоритетом. Это будет приоритет равный 1. Для данной i -й единицы оборудования будут выполнены восстановительные действия, при этом производительность персонала можно принять равным μ_i .

В этом случае интенсивность потока событий восстановления для каждой из агрегированных единиц пожарного оборудования на заданном уровне иерархии можно задать так [12]:

$$\begin{cases} \mu_{i/ij} = \mu_i * \check{I}_j^i \\ \mu_{i/ijk} = \mu_i * \check{I}_{jk}^i \\ \mu_{i/ijkl} = \mu_i * \check{I}_{jkl}^i \\ \dots \\ \mu_{i/i\dots z} = \mu_i * \check{I}_{j\dots z}^i \end{cases} \quad (7)$$

где под \check{I}_{jkl}^i понимается приоритет ремонта i -й агрегированной единицы пожарного оборудования в приоритете перед j -й, k -й, l -й единицами.

Предполагается, что всего на заданном уровне рассматривается ($z-i$) агрегированных единиц. Поэтому последнее уравнение написано для случая, когда на рассматриваемом уровне имеются от i до z агрегированных единиц оборудования, подлежащих восстановлению. Конкретное состояние, определяющее готовность агрегированных единиц пожарных сил и средств объекта ТЭК на заданном уровне иерархии, заданной графом стратегического планирования, можно записать как вектор состояния. При этом его размерность следует определить исходя из числа всех дискретных состояний, в которых может находиться система на рассматриваемом уровне иерархии (числом строк в системе уравнений (7) плюс 1).

На третьем уровне иерархии в методике прогнозирования готовности пожарных сил и средств на объекте ТЭК в целом (рис. 1) можно использовать формулы, которые затем можно задействовать многократно. Например, в соответствии с планами восстановления готовности пожарных единиц как при их агрегировании (укрупнении), так и при их детализации (движении вниз по уровням). Вероятность пребывания в каждом из рассматриваемых состояний даст, например, для уровня 3 такую формулу

$$P_i^3 = (P_0^3, P_i^3, P_{ij}^3, P_{ijk}^3, \dots, P_{ij\dots z}^3), \quad (8)$$

где P_0^3 — состояние 3-го уровня, при котором все агрегированные единицы исправны;

P_l^3 — вероятности того, что от 1 до z агрегированных единиц на данном уровне будут требовать восстановительных действий.

Если учитывать зависимость всех составляющих (8) от времени, то

$$P_i^3(t) = (P_0^3(t), P_i^3(t), P_{ij}^3(t), P_{ijk}^3(t), \dots, P_{ij\dots z}^3(t)). \quad (9)$$

Соответственно начальное состояние определяется как

$$\begin{cases}
 \frac{dP_0^3}{dt} = -P_0^3 \sum_{i=1}^z \gamma_i^3 + \sum_{i=1}^z P_i^3 * \mu_i, \\
 \frac{dP_i^3}{dt} = -P_i^3 \gamma_i^3 + \sum_{j=1, i \neq j}^z P_{ij}^3 * \mu_{j/ij} - P_i^3 (\mu_i + \sum_{j=1, i \neq j}^z \gamma_j^3), \\
 \frac{dP_{ij}^3}{dt} = P_i^3 \gamma_j^3 + P_j^3 \gamma_i^3 + \sum_{\substack{k=1, \\ k \neq i, j}}^z P_{ijk}^3 * \mu_{k/ijk} - P_{ij}^3 (\mu_{i/ij} + \mu_{j/ij} + \sum_{\substack{k=1, \\ k \neq i, j}}^z \gamma_k^3) \\
 \dots \\
 \frac{dP_{ij\dots z}^3}{dt} = P_{j\dots z}^3 \gamma_i^3 + P_{i\dots z}^3 \gamma_j^3 + \dots + P_{i\dots z-1}^3 \gamma_z^3 - P_{i\dots z-1}^3 * (\mu_{i/i\dots z} + \mu_{j/i\dots z} + \dots + \mu_{z/i\dots z} + \sum_{\substack{k=1, \\ k \neq i, j, \dots, z}}^z \gamma_k^3), \\
 P_0^3 + \sum_{i=1}^z P_i^3 + \sum_{i=1}^z \sum_{j=1, i \neq j}^z P_{ij}^3 + \dots + \sum_{i=1}^z \dots \sum_{\substack{k=1, \\ k \neq i, j, \dots, z}}^z P_{i\dots z}^3 + P_{1\dots z}^3 = 1
 \end{cases} \tag{11}$$

Рис. 3

$$\begin{aligned}
 P_i^3(0) &= \\
 &= (P_0^3(0), P_i^3(0), P_{ij}^3(0), P_{ijk}^3(0), \dots, P_{ij\dots z}^3(0)). \tag{10}
 \end{aligned}$$

Тогда для 3-го уровня агрегированных единиц пожарного оборудования уравнения готовности пожарных сил и средств соответствующего подобъекта ТЭК могут задаваться уравнениями Колмогорова [11](см. рис. 3):

Анализ результатов

Так как последнее уравнение в приводимой выше системе уравнений (11) отражает тот факт, что рассматриваемая система всегда находится в каком-либо из рассматриваемых состояний, косвенно его можно использовать также и для определения вклада каждого из предполагаемых мероприятий восстановления в общий агрегатный показатель готовности пожарных единиц третьего уровня. Последнее удобно использовать для прогноза готовности пожарных сил и средств при управлении в АСУТП.

Учитывая, что при управлении мероприятиями ПБ на объекте ТЭК динамика определяется дискретными во времени проверками в ходе мониторинга готовности агрегатных единиц и их составляющих, в интересах упрощения расчета производные в левых частях урав-

нений можно приравнять нулю. В этом случае расчет будет вестись для мгновенных значений вероятностей событий, зафиксированных мониторингом. А вместо зависящих от времени вероятностей в правой их части использовать предельные значения последних. Это даст верхнюю оценку готовности.

Заключение

Приводимая модель прогнозирования готовности пожарных сил и средств может быть перенесена не только на любой из уровней объекта ТЭК, но и на более крупные объекты. С этой целью ее целесообразно применять в иерархических системах поддержки принятия решений, декомпозируемых с помощью графов стратегического планирования. Автоматизированное применение таких расчетов в АСПВБ существенно улучшит качество управления мероприятиями ПБ.

Практическая реализация мониторинга пожарных сил и средств с учётом методов стратегического планирования в виде программного модуля-инструмента для ЛПР обеспечит наиболее быстрое получение информации о необходимости ремонта единицы противопожарного оборудования на различных участках и, как следствие, повысит уровень ПБ на объектах и подобъектах ТЭК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Antonsen S., Skarholt K., Ringstad A. J. The role of standardization in safety management — A case study of a major oil & gas company // Safety Science.— 2012.— Vol. 50.— No.10.— P. 2001–2009. DOI: 10.1016/j.ssci.2011.11.001.
2. Топольский Н. Г., Самарин И. В., Строгонов А. Ю. Модель оценки обеспечения комплексной безопасности в АСУТП с применением диагностики пожарных извещателей для построения автоматизированной системы поддержки управления пожаровзрывобезопасностью // Пожаровзрывобезопасность.— 2018.— Т. 27.— №. 11.— С. 15–22.

3. Абросимов А. А., Топольский Н. Г., Федоров А. В. Автоматизированные системы пожаровзрывобезопасности нефтеперерабатывающих производств. — М.: МИПБ МВД России, 1999. — 239 с.
4. Hammond J. S., Keeney R. L., Raiffa H. Smart choices: A practical guide to making better decisions. — Boston: Harvard Business School Press, 1999. — 272 p.
5. Самарин И. В., Фомин А. Н. Стратегическое планирование на предприятии: применение метода анализа иерархий для стратегического мониторинга деятельности // Экономика, статистика и информатика. Вестник УМО. — 2014. — № 5. — С. 84–89. DOI: 10.21686/2500–3925–2014–5–84–89.
6. Сатин А. П., Ле Тхань Бинь, Прус Ю. В. Прогнозирование готовности пожарной техники на основе марковской модели поломок и восстановления // Технологии техносферной безопасности. — 2012. — № 5(45). — С. 17.
7. Прус Ю. В., Колесникова А. Р., Клепко Е. А., Шаповалов В. М., Моделирование структуры и динамики техногенных и пожарных рисков в социотехнических системах // Технологии техносферной безопасности. — 2014. — № 4(56). — С. 16.
8. Vogue R. Sensors for fire detection // Sensor Review. — 2013. — Vol. 33, No. 2. — P. 99–103. DOI: 10.1108/02602281311299635.
9. Самарин И. В., Строгонов А. Ю. Модель оценки пожарной безопасности на объектах топливно-энергетического комплекса с помощью их временных характеристик на графах стратегического планирования в составе автоматизированной системы поддержки управления // Труды Российского государственного университета нефти и газа им. И. М. Губкина. — 2018. — № 4 (293). — С. 143–154.
10. Aleixandre M., Gerboles M. Review of small commercial sensors for indicative monitoring of ambient gas // Chemical Engineering Transactions. — 2012. — Vol. 30. — P. 169–174. DOI: 10.3303/CET1230029.
11. Вентцель А. Д., Курс теории случайных процессов. — М.: Наука, 1996. — 400 с.
12. Гельфанд И. М. Лекции по линейной алгебре // М.: Добросвет: Издательство «КДУ». — 2006. — 320 с.

© Прус Юрий Витальевич, Крючков Алексей Вячеславович (kruchkov.a@gubkin.ru),
Самарин Илья Вадимович (ivs@gubkin.ru), Строгонов Андрей Юрьевич.
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛОГНОРМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛЯ ВЕРОЯТНОСТНОЙ ОЦЕНКИ ЗАПАСОВ

SYSTEM ANALYSIS USING LOGNORMAL DISTRIBUTIONS FOR THE PROBABILISTIC ASSESSMENT OF RESERVES

S. Pryadko

Summary. In the article the problem of evaluation of reserves is considered with the help of volume method. The probabilistic nature of parameters from the formula is pointed out. The algorithm of reserves evaluation with the help of Monte-Carlo method is offered. It is shown that besides Monte-Carlo method it is possible to use lognormal distribution for reserves evaluation. Results of numerical calculations are given.

Keywords: oil and gas in place, triangular distribution, lognormal distribution, porosity, gas-saturation, mean power of a reservoir, gas-bearing area, distribution parameters..

Прядко Сергей Александрович

К.т.н., доцент, РГУ нефти и газа (НИУ) имени

И. М. Губкина

sergeypryadko@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается задача оценки запасов с помощью объемного метода. Делается акцент на вероятностную природу параметров из формулы. Предлагается алгоритм оценки запасов с помощью метода Монте-Карло. Показывается, что помимо метода Монте-Карло можно использовать логнормальное распределение для оценки запасов. Приводятся результаты численных расчетов.

Ключевые слова: геологические запасы нефти и газа, треугольное распределение, логнормальное распределение, пористость, газонасыщенность, средняя мощность пласта, площадь газоносности параметры распределения.

Оценка запасов является центральным моментом планирования и проведения геолого-разведочных работ (ГРП). Существуют различные формулы для подсчета запасов углеводородов. Процесс поисков и разведки месторождений нефти и газа является вероятностным и возникает необходимость построения вероятностных оценок параметров, определяемых в ходе ГРП и, соответственно, для запасов нефти и газа. На различных стадиях ГРП существует высокая степень неопределенности изучаемых параметров. Эта неопределенность увеличивается с уменьшением категории запасов. Чем меньше категория — тем меньше достоверных данных известно и приходится больше использовать мнения экспертов-геологов по различным данным геофизических исследований, также используя оценки параметров физико-емкостных свойств (ФЭС) объектов-аналогов.

Главная задача для любой залежи — количественное определение объема углеводородов в ней. Несмотря на быстрый прогресс в программном обеспечении планирования ГРП, методическим вопросам подсчета запасов ресурсов и точности их оценки должного внимания не уделяется. В отечественной литературе описаны несколько способов подсчета разведанных запасов нефти и свободного газа, из которых наиболее популярен объемный способ. Его использование на практике предполагает знание геологических условий формирования запасов нефти и газа, физико-емкостных параметров залежи и физических свойств углеводородов.

При проектировании освоения газового месторождения важно точно знать его запасы и такие геолого-промысловые характеристики, как пористость, проницаемость, газонасыщенность, объем порового пространства пласта-коллектора и др. Эти же характеристики необходимы для построения математической модели разработки залежи, по результатам исследования которой принимаются все технологические решения. Последние оказывают решающее влияние на оценки показателей затрат в разработку месторождения, на динамику добычи газа, а значит, и на показатели рентабельности освоения объекта.

Точный подсчет начальных геологических запасов природного газа требует вычисления интеграла [1] (формула 1), где обозначено:

V — начальные запасы газа (м^3), приведенные к нормальным условиям при стандартных значениях давления $p_0 = 0,1$ МПа, температуры $T_0 = 293^\circ\text{K}$, м^3 ,

Ω — геометрический объем порового пространства коллектора, м^3 ,

$\alpha(x, y, z)$ — поле коэффициента газонасыщенности как функция пространственных координат x, y, z , доли ед.,

$m(x, y, z)$ — поле коэффициента пористости («пористость»), доли ед.,

$p(x, y, z), T(x, y, z)$ — поля пластового давления, Па, и температуры, $^\circ\text{K}$,

$$V = \frac{T_0 Z_0}{p_0} \iiint_{\Omega} \dot{a}(x, y, z) m(x, y, z) \frac{\rho(x, y, z)}{T(x, y, z) Z(p, T)} dx dy dz \quad (1)$$

$$V_i = \iiint_{\Omega_i} \dot{a}_i(x, y, z) m(x, y, z) \frac{\rho(x, y, z)}{b(x, y, z)} dx dy dz \quad (2)$$

$$V \approx C Z_0 \alpha m h S \cos \varphi \frac{p T_0}{p_0 T Z}; V_{ni} \approx C Z_0 \alpha m h S \cos \varphi \frac{p T_0}{p_0 T Z} \eta \quad (3)$$

$$V_n \approx C_1 \alpha_n m h S \cos \varphi \frac{\rho}{b}; V_{nii} \approx C_1 \alpha_n m h S \cos \varphi \frac{\rho}{b} \eta_n \quad (4)$$

$Z = Z(p, T)$ — поле коэффициента сжимаемости газа,
 $Z_0 = Z(p_0, T_0)$.

Аналогично, точное значение начальных запасов нефти определяется интегралом (формула 2), где:

V_n — объем начальных геологических запасов нефти, т;

Ω_n — объем пористого пространства пласта-коллектора, м³;

$\alpha_n(x, y, z)$ — коэффициент нефтенасыщенности, доли единицы;

$\rho(x, y, z)$ — плотность разгазированной (товарной) нефти, т/м³;

$b(x, y, z)$ — объемный коэффициент, указывающий, какой объем 1 м³ товарной нефти занимает в пластовых условиях.

Геометрическая форма газонасыщенного порового пространства Ω и параметры α, m, p, T (как функции пространственных координат x, y, z) неизвестны и могут задаваться лишь предположительно на основе данных геофизических исследований и информации, которую вырабатывают геологи, реконструируя генезис литологических слоев, слагающих коллектор, а также процессы формирования, миграции, аккумуляции и диссипации углеводородов.

Непосредственное применение вероятностного подхода к зависимостям (1) практически исключено следующим важным обстоятельством. Параметры $\alpha, \alpha_n, m, p, T, \rho_n$ как случайные функции координат x, y, z представляют собой случайные поля, а не случайные величины или случайные процессы (случайные функции одной переменной), для которых имеется развитый аппарат теории вероятностей и математической статистики. Математический аппарат теории случайных полей является значительно более громоздким, ибо требует

описания стохастических связей во всех парах точек пространства.

Для перехода от случайных полей к случайным величинам принято заменять рассматриваемый пласт произвольной геометрической формы эквивалентным по геометрическому объему однородным и изотропным («нуль-мерным») модельным объектом. В качестве такого объекта удобнее всего взять пласт в форме кругового цилиндра с горизонтально расположенной подошвой и положить $\Omega = h S \cos \varphi$, где h — средняя мощность пласта, м, S — площадь газоносности, м², φ — угол падения пластов коллектора.

Тогда вместо формулы (1) для оценки объема начальных (балансовых) V и извлекаемых V_{ni} запасов газа получим следующие приближенные соотношения (формула 3), где α, m, p, T — постоянные величины, которые указывают: α — средний (по исходному поровому пространству) коэффициент газонасыщенности, m — средний коэффициент пористости, а η — средний коэффициент извлечения газа. Произведение площади газоносности и мощности коллектора определяет объем пород залежи. Умножение объема пород на среднюю пористость дает объем пустот, умножение на коэффициент газонасыщенности дает объем газа в пустотном объеме пород залежи в пластовых условиях. Дробь в (3) указывает какой товарный объем газа содержится в единичном объеме газа в пластовых условиях.

Аналогичным образом преобразуется зависимость (2) для подсчета начальных V_n и извлекаемых V_{nii} запасов нефти (формула 4).

Рассмотрим компоненты формулы (3) подсчета запасов. Относительные ошибки, связанные с температурой обычно пренебрежимо малы: $|\Delta T| < 10^\circ$ и значит $|\Delta T|/$

$T < 0,03$. Следовательно, температуру можно практически считать детерминированной величиной, задаваемой геологами без существенной ошибки. Угол падения пластов коллектора достаточно точно вычисляется по картам разрезов и также может считаться детерминированной величиной.

Некоторые сомнения возникают относительно учета Z — коэффициента сжимаемости газа, который зависит от давления, температуры и компонентного состава газа. Существует несколько методов вычисления этого параметра, такие как: модифицированный метод $NX19$; модифицированное уравнение состояния $GERG-91$ и $AGA8-92DC$ (могут быть использованы при неизвестном полном компонентном составе природного газа); и уравнения состояния ВНИЦСМВ. Для расчета Z ошибки в давлении могут быть значительно более существенными. Однако, зная глубину, мы можем задать давление приблизительно равным нормальному горному давлению и ошибемся тоже не слишком сильно. В области давлений 5–30 МПа (50–300 ат) и температуры 270–340 °K (10–70 °C) погрешности расчета для методов без использования полного компонентного состава составляют 3,0% и 0,5%. Таким образом, можно утверждать, что индетерминированными величинами следует считать лишь α, m, h, S, p и η . В дальнейшем для общности температуру будем также относить к индетерминированным величинам.

Так как между случайными параметрами, входящими в (3), не существует обоснованных взаимосвязей, то их можно считать независимыми. Остается решить вопрос о выборе распределения каждого параметра. Выбор не может быть осуществлен стандартными методами статистической проверки гипотез из-за отсутствия достаточных данных. Например, для месторождений категории C_2 , не выявленных успешным бурением поисковых скважин, значения геолого-промысловых параметров принимают по данным о залежах аналогичного строения в пределах рассматриваемого нефтегазоносного региона. При оценке ресурсов более низких категорий этот подход является практически единственно возможным.

Попробуем понять, какую информацию о значениях того или иного случайного множителя в формулах (3) может предоставить эксперт-геолог благодаря различным методам, применяемым при ГРП, в частности, по объектам-аналогам. По-видимому, геологи способны относительно достоверно задавать три значения каждого параметра: минимальное, максимальное и «наиболее вероятное» (моду). Все эти три значения задаются с ошибками, величины которых зависят от квалификации геолога и его интуиции, а также от имеющихся данных геофизики. По этим точкам объективно (то есть

сколько-нибудь достоверно) построить модельное распределение невозможно. Очевидно, что существует бесконечное множество распределений, удовлетворительно описывающих ситуацию.

Рассмотрим два наиболее простых из них — треугольное и логнормальное. Первое удобно для геологов (которым достаточно просто понять его смысл), второе — для формального расчета оценок запасов и ресурсов (произведение логнормальных распределений подчиняется логнормальному закону). Следует сказать, что, во-первых, ни одно из этих распределений нельзя считать более предпочтительным и, во-вторых, при независимости параметров ФЕС формула для запасов приводит согласно центральной предельной теореме к логнормальному распределению, правда формально лишь при неограниченном увеличении числа сомножителей. Возможен также подход с трапецидальным распределением, как обобщением треугольного [2].

Плотность логнормального распределения случайной величины (с.в.) X_i задается следующим образом:

$$f_{\log i}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi x\sigma_i}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right).$$

Функция распределения с.в. X_i выражается через известный интеграл вероятности:

$$F_{i\log}(x) = P\{X_i < x\} = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma\sqrt{2}}\right) \right], \operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt.$$

Математическое ожидание с.в. X_i лежит правее медианы, а мода левее.

Отметим еще некоторые особенности логнормального распределения. Если с.в. X имеет логнормальное распределение с параметрами μ и σ^2 , то с.в. $\ln X$ будет иметь нормальное распределение с параметрами μ и σ^2 . Из свойства нормального распределения: (сумма независимых нормально распределенных случайных величин подчиняется нормальному распределению) следует свойство для логнормального распределения: если X_1, X_2, \dots, X_n — независимые логнормальные случайные величины, $X \sim \operatorname{LogN}(\mu, \sigma^2)$, то их произведение также распределено логнормально. Для любой случайной величины X с параметрами μ и σ^2 выполняется $E[Y = aX] = a\mu$ (a — константа) и $D[Y] = a^2\sigma^2$. Поэтому для логнормального распределения: если $X \sim \operatorname{LogN}(\mu, \sigma^2)$, то $(X)^a \sim \operatorname{LogN}(a\mu, (a\sigma)^2)$.

$$Y = \frac{V_u}{V_{uMo}} = \frac{\alpha m h S p^{1-a_1} \eta T^{-1-a_2}}{\alpha_{Mo} m_{Mo} h_{Mo} S_{Mo} P_{Mo}^{1-a_1} \eta_{Mo} T_{Mo}^{-1-a_2}} = X_1 X_2 X_3 X_4 X_5^{1-a_1} X_6 X_7^{-1-a_2} \quad (5)$$

$$V_{uMo} = C a_0 Z_0 T_0 p_0^{-1} \cos \varphi \alpha_{Mo} m_{Mo} h_{Mo} S_{Mo} (p_{Mo})^{1-a_1} \eta_{Mo} (T_{Mo})^{-1-a_2}. \quad (6)$$

Плотность треугольного распределения с.в. X задается формулой:

$$f_{\Delta}(x) = \begin{cases} \frac{2(x-x_1)}{(x_2-x_1)(x_{Mo}-x_1)}, & x_1 \leq x \leq x_{Mo} \\ \frac{2(x_2-x)}{(x_2-x_1)(x_2-x_{Mo})}, & x_{Mo} \leq x \leq x_2 \end{cases}.$$

Распределение характеризуется следующими параметрами: x_1 и x_2 — минимальное и максимальное значения, мода равна x_{Mo} .

Для простоты, наряду с формулой (3) будем рассматривать случайную величину Y , которая есть произведение безразмерных случайных величин и их степеней (модель для коэффициента сжимаемости $Z(p, T) \approx a_0 p^{a_1} T^{a_2}$) (формулы 5, 6):

Таким образом, искомая оценка извлекаемых запасов вычисляется по формуле $V_u = V_{uMo} Y$, где V_{uMo} — числовая оценка извлекаемых запасов, подсчитанная в предположении, что все параметры принимают наиболее вероятные значения, (α_{Mo} , m_{Mo} , h_{Mo} , S_{Mo} , p_{Mo} , T_{Mo} , η_{Mo} — моды соответствующих величин).

Если распределения с.в. α , m , h , S , p , T , η заданы, то для решения задачи вероятностной оценки запасов обычно используют следующую «прямую» схему метода стохастических испытаний (Монте-Карло) [3]:

- ♦ определяют число N реализаций, необходимых для построения функции распределения (ф.р.) объема запасов $F_V(x) = P\{V < x\}$;
- ♦ вырабатывают случайные реализации $V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{iN}$, формирующие выборку, «разыгрывая» значения параметров $\alpha_i, m_i, h_i, S_i, p_i, T_i, \eta_i$ и вычисляя значения $V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{iN}$ по формулам (3);
- ♦ обрабатывают полученную выборку стандартными методами математической статистики, то есть строят гистограммы частот попадания с.в. V , V_u в заданные интервалы и по этим гистограммам (или по сглаживающим их эмпирическим функциям распределения $F_V^*(x)$ и $F_{V_u}^*(x)$) находят выборочные оценки квантилей P_{10} , P_{50} и P_{90} .

Многие исследователи игнорируют первый этап процедуры Монте-Карло, задаваясь, как им кажется, заведомо большим числом реализаций, например, полагают $N=1000$. Между тем в некоторых случаях этого «большого» числа реализаций может оказаться недостаточно для надежной оценки указанных квантилей: например, минимальное число необходимых испытаний для доверительной вероятности 0,995 и точности приближения 0,02 равно 7490, а для 0,995 и 0,001–2995733.

Используем процедуру Монте-Карло, чтобы эмпирически подтвердить следующий тезис: при широких предположениях относительно законов распределения факторов («подсчетных параметров») α , m , p , T , η распределение оценок извлекаемых запасов, рассчитанных по формулам (3) удовлетворительно приближается логнормальным законом распределения.

Вычислим с помощью процедуры Монте-Карло представительную выборку оценок извлекаемых запасов в предположении, что каждый фактор α , m , p , T , η подчиняется треугольному распределению. Построим гистограмму оценок и приблизим ее логнормальным распределением, параметры которого вычислим по методу моментов через средние и дисперсии исходных треугольных распределений. Хорошее совпадение результатов будет служить эмпирическим подтверждением выдвинутого тезиса. Это, по существу, означает, что в данном случае реализуется утверждение центральной предельной теоремы и что при выдвинутых предположениях итоговое распределение оценок запасов является логнормальным независимо от исходных (гипотетических) распределений подсчетных параметров.

Для каждой комбинации подсчетных параметров в генерированных случайных выборках из треугольных распределений параметров перемножением ($y_{rk} = x_{1k} x_{2k} x_{3k} x_{4k} x_{5k}^{1-a_1} x_{6k} (x_{7k})^{-1-a_2}$, $k=1..N$, где y_k — значение k -го члена выборки Y , x_{ik} — значение k -го члена выборки для с.в. X_i , N — размер выборки) получаем выборку для распределения запасов и находим ее параметры: эмпирический первый момент $m_1[Y]$, эмпирическую дисперсию $S^2[Y]$, эмпирическую функцию распределения и строим гистограмму.

$$\begin{cases} \frac{x_{1i} + x_{Moi} + x_{2i}}{3} = \exp(\mu_i + 0,5\sigma_i^2) \\ \frac{x_{1i}^2 + x_{Moi}^2 + x_{2i}^2 - x_{1i}x_{2i} - x_{1i}x_{Moi} - x_{2i}x_{Moi}}{18} = (\exp(\sigma_i^2) - 1)\exp(2\mu_i + \sigma_i^2) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \mu_i = \ln\left(\frac{x_{1i} + x_{Moi} + x_{2i}}{3}\right) - \frac{1}{2} \ln\left(1 + \frac{x_{1i}^2 + x_{Moi}^2 + x_{2i}^2 - x_{1i}x_{2i} - x_{1i}x_{Moi} - x_{2i}x_{Moi}}{2(x_{1i} + x_{Moi} + x_{2i})^2}\right) \\ \sigma_i^2 = \ln\left(1 + \frac{x_{1i}^2 + x_{Moi}^2 + x_{2i}^2 - x_{1i}x_{2i} - x_{1i}x_{Moi} - x_{2i}x_{Moi}}{2(x_{1i} + x_{Moi} + x_{2i})^2}\right) \end{cases} \quad (8)$$

Постараемся приблизить исходное треугольное распределение каждого параметра пласта логнормальным.

Приравнивая, согласно методу моментов, математическое ожидание и дисперсию треугольного и логнормального распределения, находим значения параметров μ_i и σ_i^2 (формула 7).

Решая эту систему, получим следующее (формула 8).

В предложенном методе геолог задает (на основе своей интуиции, то есть субъективным образом) три точки для построения плотности распределения каждого параметра: левую и правую доверительные границы и моду («наиболее вероятное» с его точки зрения значение параметра), а какие вероятности (тоже субъективные) следует приписывать вероятностям попадания в интервалы возможных значений (то есть как устроены субъективно задаваемые гистограммы распределений) он понятия не имеет. Вот только эти данные (x_1, x_2, Mo), а также, возможно, доверительные вероятности границ (α_1 и α_2) и составляют всю исходную базу данных.

С другой стороны, математически неизбежным является тот факт, что если все параметры имеют логнормальное распределение, то и величина запасов подчиняется этому же закону распределения вероятностей. При этом параметры распределения относительной величины запасов Y вычисляются по простым формулам.

Как будет показано ниже, низкая точность приближения исходных (субъективно задаваемых) треугольных распределений параметров логнормальными распределениями практически не сказывается на вероятностной модели оценки запасов. Поэтому не следует придавать слишком большого значения стандартным процедурам проверки гипотез о распределениях.

Возьмем следующие значения параметров пласта-коллектора (минимум; мода; максимум): α — (0,0;0,3;0,6), m — (0,02;0,13;0,45), h — (10;65;100), S — (20;50;100), p — (10;20;30), T — (275;280;300), η — (0,3;0,4;0,5).

Целью расчетов является построение распределений запасов при исходных гипотезах (о треугольном распределении параметров) и логнормальной оценки запасов. В результате генерирования случайных значений параметров пласта-коллектора по методу Монте-Карло получились следующие значения параметров выборочных распределений ($M[X_i]$; выборочное среднее; $D[X_i]$): X_1 — (1,0000;0,9914; 0,1667), X_2 — (1,5385; 1,5383; 0,4921), X_3 — (0,8974; 0,8913; 0,0812), X_4 — (1,1333; 1,1375; 0,1089), X_5 — (1,0000; 1,0008; 0,0417), X_6 — (1,0179; 1,0179; 0,0004), X_7 — (1,0000; 1,0016; 0,0104) (размер выборки выбран равным 4000).

Все сгенерированные выборки не противоречат критерию Пирсона с 27 степенями свободы и уровнем значимости 0,01 (при проверке количество интервалов разбиения бралось равным 30). Отметим, что высокая точность соответствия модельных распределений выборочным здесь не требуется, поскольку выборки генерируются в предположении треугольности распределения, не основанном ни на каких установленных свойствах параметров пласта. Поэтому слишком высокие требования к значениям, например, χ^2 -критерия Пирсона (традиционно используемого для проверки гипотез о распределении) здесь совершенно неуместны. Ведь параметры исходных распределений были заданы экспертами-геологами на основании данных геофизических исследований (до бурения скважин) лишь приблизительно, по интуиции. Рассматриваемым примером мы просто пытаемся показать, что использование различных «удобных» распределений (исходных треугольных и приближающих их логнормальных) приводит

практически к одним и тем же вероятностным оценкам запасов.

Получив выборку Y_r , находим ее параметры: Среднее выборочное значение — 1,5310; Выборочная дисперсия — 1,7009; Выборочный коэффициент вариации — 0,8518.

На основе значения математических ожиданий, дисперсий и мод, коэффициентов вариации, вероятности $P\{x_{1i} \leq X_i \leq x_{2i}\}$ попадания с.в. в интервал (x_{1i}, x_{2i}) , а также меры ошибок приближения в виде интегрального отклонения

$$\int_0^{\infty} |f_{\Delta i}(x) - f_{\log i}(x)| dx \text{ и } \max_x |f_{\Delta i}(x) - f_{\log i}(x)|$$

были сделаны следующие выводы:

1. Приведенная газонасыщенность X_1 . Ошибки замены треугольного распределения газонасыщенности логнормальным довольно значительны (мода 1,0000 и 0,7936 (-21%), отклонения — 0,3495 и 0,4296).
2. Приведенная пористость X_2 . Ошибки замены треугольного распределения логнормальным довольно значительны (мода 1,0000 и 1,1589), отклонения — 0,2622 и 0,0855).
3. Приведенная средняя мощность пласта X_3 . Приближение весьма грубое. Большие отклонения по моде и по правому «хвосту» (мода 1,0000 и 0,7770 (-22%), отклонения — 0,3739 и 0,0855).
4. Приведенная площадь газоносности X_4 . Приближение приемлемо. Моды практически совпадают (мода 1,0000 и 1,0031 (+0,3%), отклонения — 0,1845 и 0,2052).
5. Приведенное пластовое давление X_5 . Интегральная ошибка приближения относительно приемлема, максимум расхождения по плотностям слишком велик (мода 1,0000 и 0,9406 (-6%), отклонения — 0,1904 и 0,4293).
6. Приведенное значение температуры X_6 . Качество приближения низкое, интегральное расхождение и максимум расхождения по плотностям слишком велики (мода 1,0000 и 1,0173(+2%), отклонения — 0,2706 и 4,6296).
7. Приведенный коэффициент извлечения газа X_7 . Практически приемлемое качество приближения (мода 1,0000 и 0,9846 (-2%), отклонения — 0,1259 и 4,5316).

Важно тот факт, что вероятность «хвостов» логнормального распределения для всех рассматриваемых параметров не превосходит 0,03, то есть:

$$P\{X_{\log i} < x_{1i}\} + P\{X_{\log i} > x_{2i}\} = 1 - P\{x_{1i} \leq X_{\log i} \leq x_{2i}\} \leq 0,03 \text{ для любого } i.$$

Используя формулы для произведения логнормальных величин, находим параметры приближающего логнормального распределения $Y_{\Delta \log i}$, которым мы хотим приблизить с.в. Y : $\mu = 0,1296$; $\sigma^2 = 0,6236$; математическое ожидание — 1,5549; дисперсия — 2,0928; мода — 0,6102; медиана — 1,1384; коэффициент вариации — 0,9304.

Возьмем в формуле (25) $C=1$; $\varphi=\pi/20$, получим $V_{uMo}=450789,2252$ млн.м³. Получаем итоговое логнормальное распределение V_u с параметрами $M[V_u]=V_{uMo}M[Y_{\Delta \log}]$ и $D[V_u]=V_{uMo}^2D[Y_{\Delta \log}]$. Сравним параметры с параметрами распределения, полученного с процедуры Монте-Карло: математическое ожидание — 694857 и 700945 (+0,9%); дисперсия — 406662667900 и 425278366500 (+4,4%); стандартное отклонение — 637701 и 652134 (+2,2%); коэффициент вариации — 0,9177 и 0,9304 (+1,4%); мода — 268830 и 275084 (+2,3%); медиана — 520218 и 513180 (-1,4%).

Аналогичные расчеты проводились при смещении мод распределений параметров влево и вправо.

По проведенным расчетом можно сделать вывод: не обязательно считать распределения вероятностей запасов по Монте-Карло (тем более, что допускаются ошибки в определении числа испытаний, так как требуемое число испытаний должно быть достаточно велико и не всегда число испытаний выбирается верное), а можно использовать предложенный в метод, который заключается в приближении распределений параметров ФЭС логнормальными распределениями. Несмотря на то, что первый момент и дисперсия итогового логнормального распределения немного превышают соответствующие характеристики, полученный по методу Монте-Карло, приближение является достаточно приемлемым. Таким образом, при вероятностной оценке запасов углеводородов на ранних стадиях разведки месторождений отпадает необходимость проведения громоздких вычислений по методу стохастических испытаний и появляется возможность проследить аналитически влияние параметров исходных распределений подсчетных параметров на результаты вероятностной оценки запасов. Это позволяет более обоснованно ориентировать планирование геологоразведочных работ на объектах с целью уточнения оценки запасов.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.И. Петерсилье, В.И. Пороксуна, Г.Г. Яценко. Методические рекомендации по подсчету геологических запасов нефти и газа объемным методом. — Москва-Тверь: ВНИГНИ, НПЦ «Тверьгеофизика». — 2003. — 259 с.
2. Б. В. Гнеденко. Курс теории вероятностей. — М.: Едиториал УРСС, 2005 г., 448 с.
3. А. И. Орлов. Прикладная статистика. — М.: «Экзамен», 2004. — 656 с.
4. Методическое руководство по количественной и экономической оценке ресурсов нефти, газа и конденсата России. — М.: ВНИГНИ, 2000. — 189 с.
5. Я.И. Хургин. Проблемы неопределенности в задачах нефти и газа. — Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. — 320 с.

© Прядко Сергей Александрович (sergeypryadko@gmail.com).
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ЧИСЛЕННОСТИ НАСЕЛЕНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МИРОВЫХ ПОТРЕБНОСТЕЙ В ЭНЕРГОРЕСУРСАХ И СТРАТЕГИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА

MATHEMATICAL MODELS OF DYNAMICS OF POPULATION OF EARTH FOR LONG-TERM FORECASTING OF WORLD NEEDS FOR ENERGY RESOURCES AND STRATEGIC PLANNING OF DEVELOPMENT OF AN OIL AND GAS COMPLEX

**I. Samarin
A. Fomin**

Summary. The known mathematical models of dynamics of total number of the population on Earth are considered and critically analysed. For accounting of the new significant factors shown in the last decades on the basis of several consecutive stages of generalization the new mathematical model is offered. It is based on the differential equation of dynamics of population. Parameters of this model are determined from the solution of a problem of mathematical programming on minimization of a mean square relative mismatch between model and real values by the number of the people living on Earth. High precision of modeling at the level of 0,33% is as a result provided. Use of mathematical model for forecasting shows that there is a limit of growth of population approximately in 12 billion people. His existence is caused by application of the effective state measures for restriction of growth rate of the population operating within several decades in many countries. In the offered mathematical model global demographic transition contacts concrete measures for restriction of birth rate, allowed to reduce average growth rate more, than by 3 times.

Keywords: hyperbolic law, demographic transition, dynamic, differential equation, life-saving technologies, mathematical model, method, minimization, parameter, growth limit, statistical series, rate, formalization, population, numerical methods, objective function..

Самарин Илья Вадимович

*К.т.н., доцент, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина
ivs@gubkin.ru*

Фомин Александр Николаевич

*Д.т.н., н.с., Военная Академия РВСН им. Петра Великого (Москва)
sad116@mail.ru*

Аннотация. Рассмотрены и критически проанализированы известные математические модели динамики общей численности населения на Земле. Для учёта новых значимых факторов, проявившихся в последние десятилетия, на основе нескольких последовательных этапов обобщения предложена новая математическая модель. Она основана на дифференциальном уравнении динамики численности населения. Параметры этой модели определяются из решения задачи математического программирования по минимизации среднеквадратического относительного рассогласования между модельными и реальными значениями по количеству живущих на Земле людей. В результате обеспечена высокая точность моделирования на уровне 0,33%. Использование математической модели для прогнозирования показывает, что имеется предел роста численности населения примерно в 12 млрд. человек. Его существование обусловлено применением эффективных государственных мер по ограничению скорости роста населения, действующих в течение нескольких десятков лет во многих странах. В предлагаемой математической модели глобальный демографический переход связывается с конкретными мерами по ограничению рождаемости, позволившими снизить средний темп роста более чем в 3 раза.

Ключевые слова: гиперболический закон, демографический переход, динамика, дифференциальное уравнение, жизнеспасающие технологии, математическая модель, методика, минимизация, параметр, предел роста, статистический ряд, темп, формализация, численность населения, численные методы, целевая функция.

Введение

Количество проживающих на Земле людей является одним из главных системообразующих факторов, во многом определяющих будущее развитие человечества. Если ещё 100 лет назад увеличение чис-

ленности населения в большинстве стран представляло основной драйвер их экономического и политического развития, то в последние десятилетия оно изменило свой «знак», трансформировавшись из достоинства в большую проблему. Если не принять неотложных и глобальных мер по её решению, она может не только

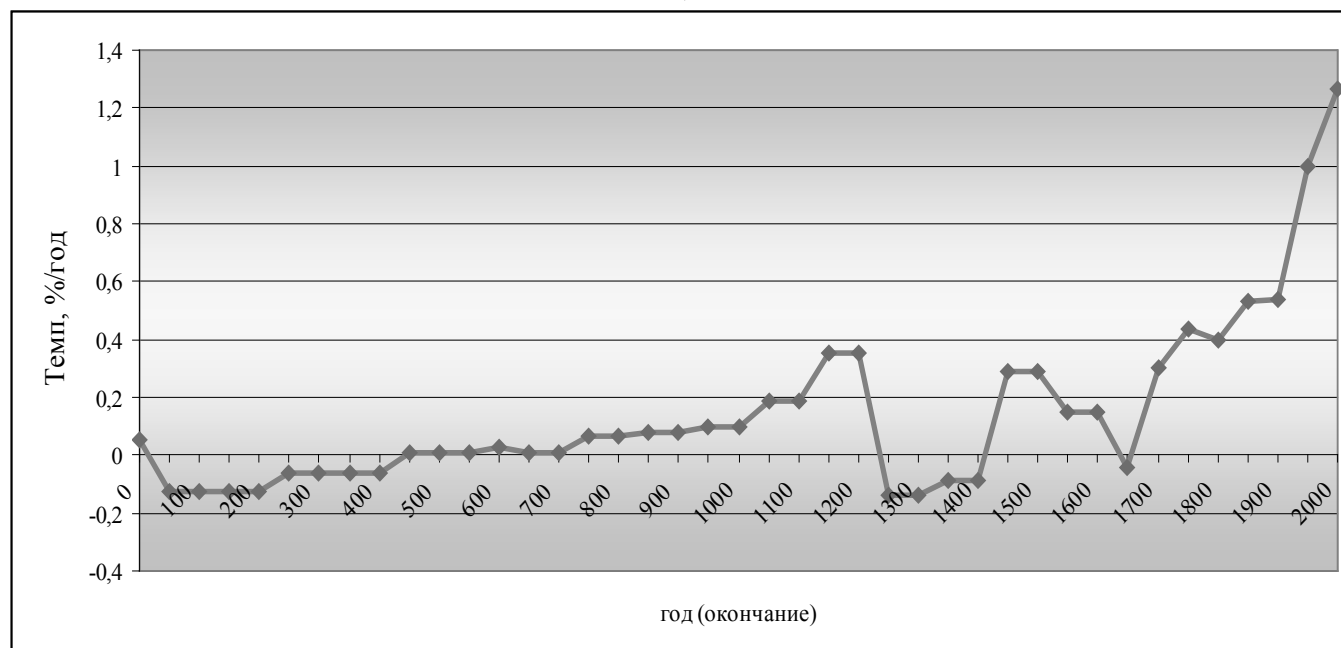


Рис. 1. Темп изменения численности населения на Земле в 0–2000 гг.,%/год

существенно деформировать многие аспекты жизнедеятельности людей во все мире, но и обострить другие фундаментальные проблемы по схеме «идеального шторма».

Конечно, при анализе будущих вызовов необходимо учитывать не только общую численность населения во всём мире, но и распределение количества людей по разным странам и регионам. Но при этом общая численность населения представляет главный тренд, который модулируется специфическими региональными особенностями.

Большое количество людей в мире провоцирует возникновение войн, в т.ч. мировых, военных конфликтов на экономической, национальной и религиозной почвах, способствует обострению экологических проблем.

Особую значимость рост численности проживающих на Земле людей представляет для сырьёвого сектора мировой экономики. Такие проблемы, как обеспечение продовольствием, необходимым количеством пресной воды, энергоресурсами, металлами вступают во всё усиливающее противоречие с высоким темпом роста численности населения. Несмотря на совершенствование технологий извлечения и получения сырья, в ближайшее время они уже могут не успевать за ростом населения в мире. В первую очередь это относится к нефтегазовому сектору, который уже фактически презентует надвигающийся кризис адаптационными планами освоения дорогостоящих и труднодоступных месторождений с соот-

ветствующим увеличением цен на нефть и газ. Коротко говоря, от хорошей жизни в Арктику не пойдёшь.

Поэтому для формирования обоснованных долгосрочных прогнозов и стратегических планов развития необходимо постоянно совершенствовать методический аппарат научного прогнозирования глобальных и фундаментальных факторов роста на основе новой информации последних десятилетий, в частности — по увеличению населения в мире.

Модели динамики численности населения в мире базируются на известных данных по количеству проживающих на Земле людей. По данным работ [1–3] они представлены в табл. 1. Мы ограничились временным периодом длительностью 2017 лет, т.е. новой эрой, оставляя историкам исследование этого интересной темы в период от нескольких миллионов — сотен тысяч лет до новой эры.

На основе данных табл. 1 определяются темпы роста численности населения на Земле — рис. 1.

Видно, что до 1150 г. темпы роста были относительно низкими, а в некоторые периоды известных национальных войн в Европе и Азии — даже отрицательными. Затем, примерно с 1700 г., скорость роста увеличилось, и к 1900 г. численность превысила 1,6 млрд. человек.

А после окончания Первой мировой войны скорость роста населения выросла ещё в 2–4 раза (рис. 2),

Таблица 1. Исходные данные по динамике численности населения в мире

| № п.п. | Год (окончание) | Численность населения, млрд. человек |
|--------|-----------------|--------------------------------------|
| 1 | 0 | 0.285 |
| 2 | 200 | 0.223 |
| 3 | 400 | 0.198 |
| 4 | 500 | 0.2 |
| 5 | 600 | 0.206 |
| 6 | 700 | 0.208 |
| 7 | 800 | 0.222 |
| 8 | 900 | 0.24 |
| 9 | 1000 | 0.265 |
| 10 | 1110 | 0.32 |
| 11 | 1200 | 0.455 |
| 12 | 1300 | 0.396 |
| 13 | 1400 | 0.362 |
| 14 | 1500 | 0.483 |
| 15 | 1600 | 0.562 |
| 16 | 1650 | 0.55 |
| 17 | 1700 | 0.64 |
| 18 | 1750 | 0.795 |
| 19 | 1800 | 0.969 |
| 20 | 1850 | 1.265 |
| 21 | 1900 | 1.656 |
| 22 | 1910 | 1.75 |
| 23 | 1920 | 1.87 |
| 24 | 1930 | 2.07 |
| 25 | 1940 | 2.3 |
| 26 | 1950 | 2.540807495 |
| 27 | 1951 | 2.586957085 |
| 28 | 1952 | 2.632787502 |
| 29 | 1953 | 2.678896551 |
| 30 | 1954 | 2.725766615 |
| 31 | 1955 | 2.773762631 |
| 32 | 1956 | 2.823131978 |
| 33 | 1957 | 2.874013095 |
| 34 | 1958 | 2.926452535 |
| 35 | 1959 | 2.981394663 |
| 36 | 1960 | 3.036978803 |
| 37 | 1961 | 3.094237385 |
| 38 | 1962 | 3.153380494 |
| 39 | 1963 | 3.214727506 |
| 40 | 1964 | 3.278555015 |
| 41 | 1965 | 3.345008017 |
| 42 | 1966 | 3.414025267 |
| 43 | 1967 | 3.485254803 |
| 44 | 1968 | 3.558117546 |
| 45 | 1969 | 3.632007495 |
| 46 | 1970 | 3.706609481 |
| 47 | 1971 | 3.781872344 |
| 48 | 1972 | 3.857602433 |

Продолжение таблицы. 1. Исходные данные по динамике численности населения в мире

| № п.п. | Год (окончание) | Численность населения, млрд. человек |
|--------|-----------------|--------------------------------------|
| 49 | 1973 | 3.933417605 |
| 50 | 1974 | 4.008989361 |
| 51 | 1975 | 4.084105387 |
| 52 | 1976 | 4.158756254 |
| 53 | 1977 | 4.233302166 |
| 54 | 1978 | 4.308410980 |
| 55 | 1979 | 4.384771573 |
| 56 | 1980 | 4.462682114 |
| 57 | 1981 | 4.542088143 |
| 58 | 1982 | 4.62313168 |
| 59 | 1983 | 4.706216901 |
| 60 | 1984 | 4.791660298 |
| 61 | 1985 | 4.898970836 |
| 62 | 1986 | 4.98961623 |
| 63 | 1987 | 5.081956782 |
| 64 | 1988 | 5.174616988 |
| 65 | 1989 | 5.266183401 |
| 66 | 1990 | 5.355950662 |
| 67 | 1991 | 5.443722939 |
| 68 | 1992 | 5.529621549 |
| 69 | 1993 | 5.613760957 |
| 70 | 1994 | 5.696335791 |
| 71 | 1995 | 5.777414187 |
| 72 | 1996 | 5.856964684 |
| 73 | 1997 | 5.935153167 |
| 74 | 1998 | 6.012508224 |
| 75 | 1999 | 6.089825349 |
| 76 | 2000 | 6.167406568 |
| 77 | 2001 | 6.245218155 |
| 78 | 2002 | 6.323402931 |
| 79 | 2003 | 6.402104428 |
| 80 | 2004 | 6.481482361 |
| 81 | 2005 | 6.561634842 |
| 82 | 2006 | 6.642621707 |
| 83 | 2007 | 6.724367437 |
| 84 | 2008 | 6.806802897 |
| 85 | 2009 | 6.889811477 |
| 86 | 2010 | 6.973271757 |
| 87 | 2011 | 7.057184484 |
| 88 | 2012 | 7.141539483 |
| 89 | 2013 | 7.22615473 |
| 90 | 2014 | 7.310679524 |
| 91 | 2015 | 7.397776362 |
| 92 | 2016 | 7.486520598 |
| 93 | 2017 | 7,577 (оценка) |

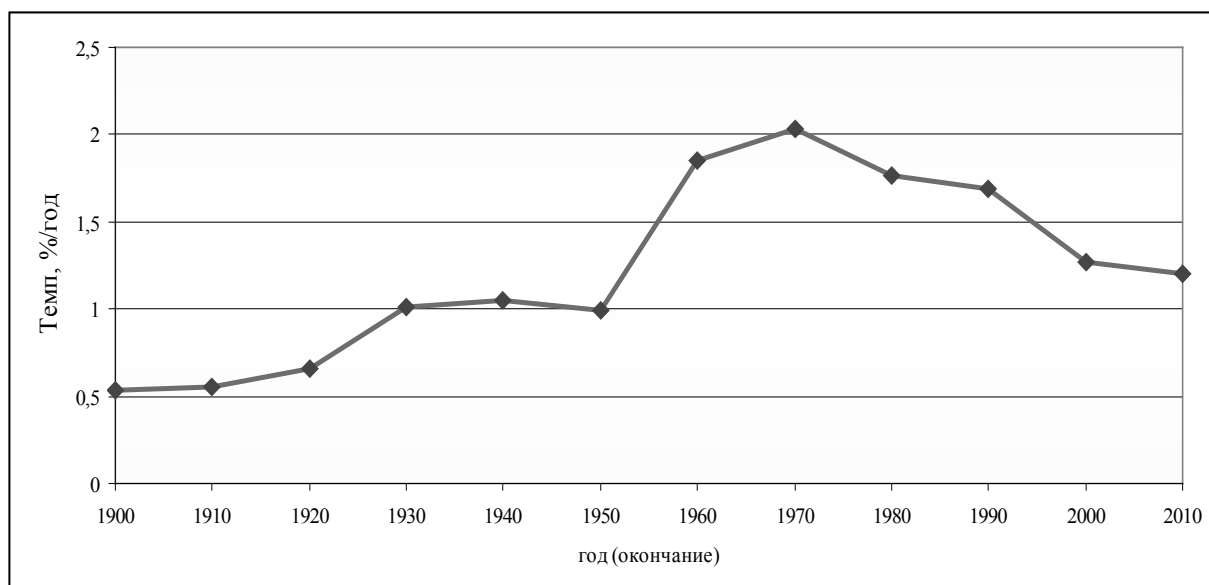


Рис. 2. Темп изменения численности населения на Земле в 1900–2010 гг.,%/год

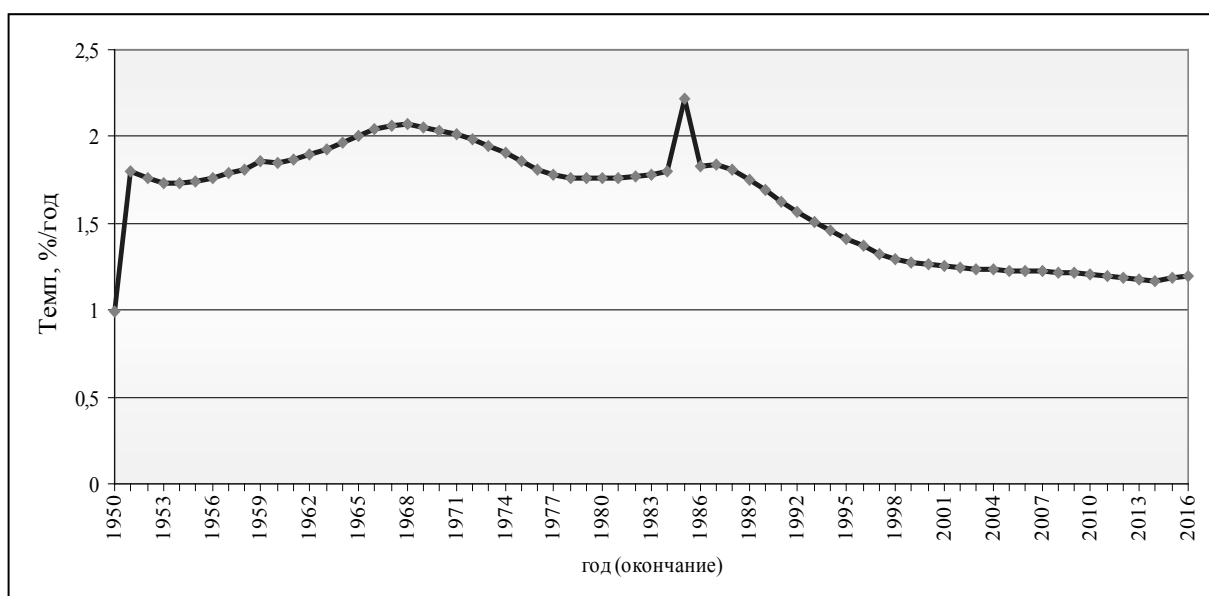


Рис. 3. Темп изменения численности населения на Земле в 1950–2016 гг.,%/год

а к окончанию 2017 г. ожидается что число людей на Земле может достигнуть около 7,6 млрд. (табл. 1).

Но существуют и некоторые позитивные тенденции изменения глобальной демографической ситуации: после 1968 г. темпы стали замедляться (рис. 3).

Мы пока не станем акцентировать внимание на странном поведении темпа роста около 1986 г. Возможно, оно

обусловлено каким-то изменением порядка формирования статистических данных. Но может быть, это знак проявления неких важных закономерностей: достаточно вспомнить, что происходило в мире в 1985–1986 гг., и предположить, как это могло стимулировать рост рождаемости.

Важно другое: после 1968 г. наблюдается снижение темпов роста общей численности населения в мире,

Таблица. 2. Модель 1 (до 1960 г.)

| Параметр | Год t_0 начала данных | | | | | | | |
|--|-------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|
| | 0 | 500 | 1000 | 1500 | 1600 | 1700 | 1800 | 1900 |
| Среднее относительное рассогласование Δ_0 , % | 14,23 | 9,67 | 9,56 | 4,25 | 3,37 | 2,62 | 2,4 | 1,73 |
| C , млрд. чел. × лет | 281,73 | 267,45 | 255,54 | 230,3 | 224,44 | 222,77 | 226,3 | 210,1 |
| T_1 , годы | 2061,15 | 2054,52 | 2049,22 | 2038,56 | 2036,19 | 2035,52 | 2036,9 | 2030,74 |

хотя они остаются положительными. Т.е. количество людей на Земле продолжает увеличиваться, хотя и меньшими темпами.

Таким образом, если за 1900 лет с начала новой эры количество людей выросло примерно в 5,8 раз, то за следующие 117 лет оно увеличилось в 4,6 раза. Т.е. за указанные периоды темпы роста возросли примерно в 13 раз.

Ситуация приобретает взрывной характер. Аналогия с взрывом ещё больше усиливается, если рассмотреть математические модели динамики общей численности населения в мире.

Существующие математические модели и их критический анализ

Наиболее известной математической моделью, описывающей динамику численности N населения в мире, является модель гиперболического закона эволюции [4–6], полученная Мором, Форстером и Эмиотом на основе обработки известных им статистических данных до 1960 г.:

$$N = C / (T_1 - t), \quad (1)$$

где t — время в годах, отсчитываемое от начала новой эры (т.е. привычный нам номер года);

C — константа, величина которой зависит от того, в каких единицах измеряется N : если — в млрд. человек, то C оценивалась авторами модели в 200 млрд. человек [5,6];

T_1 — другая константа, имеющая размерность «год» и равная 2026,8685 лет.

Эта гиперболическая математическая модель (будем её обозначать как «Модель 1»), в которой присутствуют только 2 постоянные C и T_1 , является очень простой,

но при этом удивительно точной для описания динамики численности населения на протяжении не только веков, но и тысячелетий.

Если ограничиться только новой эрой, то можно определить величины C и T_1 из условия минимизации суммы квадратов *относительных* значений рассогласований между модельными и фактическими значениями численности населения.

Эти данные представлены в табл. 2 для различных значений начала статистического ряда.

Например, если год t_0 начала статистического ряда данных равен 1500, то это означает, что C и T_1 были определены за период 1500–1960 гг.

Из табл. 2 видно, что среднеквадратические относительные величины рассогласования составляют несколько процентов. И только, если начало статистики выбрать в нулевом году (начало новой эры), то получается около 14%.

Кроме этого, можно считать, что полученные указанным способом величины C и T_1 близки к тем, которые предложили авторы Модели 1.

Временная зависимость $N(t)$ для интервала 1500–2100 гг. представлена на рис. 4. При этом для наглядности в период 1950–2017 гг. маркеры, соответствующие реальным значениям численности населения, обозначены не для каждого года, а только для тех, номера которых делятся нацело на 5: 1950, 1955, 1960, 1965 и т.д. Это сделано для того, чтобы на рисунке маркеры не слились друг с другом. Аналогично — для других подобных рисунков, соответствующих другим моделям.

Теперь начинается самое интересное.

Дело в том, что Модель 1 имеет особую точку $T_1 = 2026,8685$, которая, по оценкам авторов модели, соот-

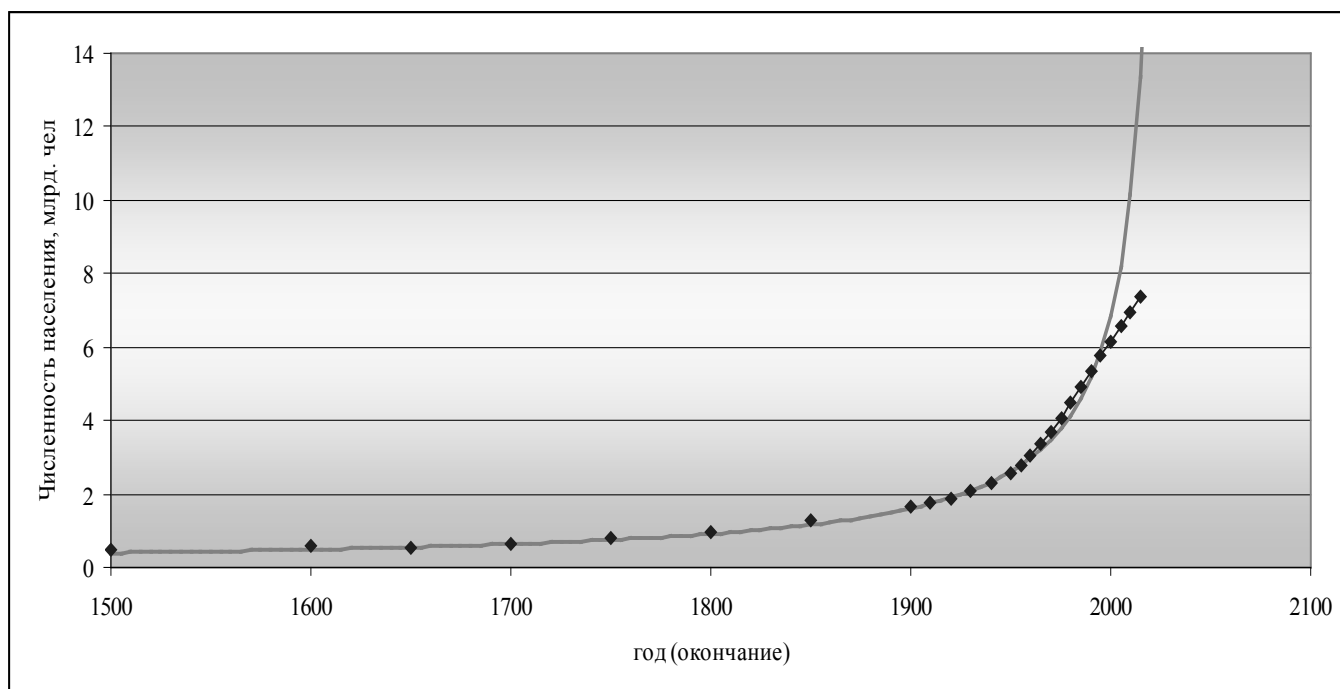


Рис. 4. Динамика численности населения на Земле (модель 1)

ветствует 13 ноября 2026 г. Согласно формуле (1), в этот день численность населения на Земле должна стать бесконечной.

Данные табл. 2 этой особенности принципиально не изменяют: если ориентироваться на цифры с 1900 г. (правый столбец табл. 4), то вместо 13 ноября 2026 г. получается 27 сентября 2030 г.

Напрашивается аналогия с вышедшем из-под контроля ядерным реактором, который скоро должен пойти в разнос. Поэтому наличие особой точки является самым серьезным недостатком Модели 1.

С.П. Капица считал, что существенным фактором, который не был учтен в Модели 1, являются времена жизни и наступления репродуктивной способности человека. Эти два фактора он смоделировал при помощи одного параметра τ следующим образом.

Сначала записал (1) в дифференциальной форме:

$$dN/dt = C/(T_1 - t)^2 \tag{2}$$

А затем в знаменателе заменил $(T_1 - t)^2$ на

$$(T_2 - t)^2 + \tau^2$$

Получилось дифференциальное уравнение

$$dN/dt = C/((T_2 - t)^2 + \tau^2), \tag{3}$$

решая которое при условии:

$$(T_2 - T)/\tau \rightarrow \infty \text{ (т.е. в далёком прошлом) } N \rightarrow 0,$$

можно получить простое аналитическое выражении для $N(t)$:

$$N = (C/\tau) \arcsctg\{(T_2 - T)/\tau\} \tag{4}$$

В (4) константы C , T_2 и τ должны определяться также из условия минимизации суммы квадратов относительных рассогласований между модельными и реальными значениями. Для этого приходится решать численным методом задачу оптимизации функции 3-х переменных. Впрочем, для любителей математики можно специально отметить: эту задачу можно свести к минимизации функции 2-х переменных, что несколько упрощает процедуру решения и повышает точность.

С.П. Капица предложил следующие значения параметров своей модели, которую далее будем называться «Модель 2» (N измеряется в млрд. человек):

$$C = 186 \text{ млрд. чел.}\cdot\text{лет}; T_2 = 2007; \tau = 42 \text{ года.}$$

В более поздней своей работе [6] он уточнил этот набор параметров:

Таблица 3. Модель 2 (до 2000 г.)

| Параметр | Год t_0 начала данных | | | | | | | | |
|--|-------------------------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|---------|------|
| | 0 | 500 | 1000 | 1500 | 1600 | 1700 | 1800 | 1900 | 1900 |
| Среднее относительное рассогласование $\Delta_0, \%$ | 11,758 | 8,395 | 7,67 | 4,432 | 3,944 | 3,594 | 3,448 | 2,411 | |
| $C,$ млрд. чел.×лет | 258,332 | 248,476 | 238,476 | 215,266 | 208,08 | 200,32 | 189,94 | 161,676 | |
| $T_1,$ годы | 2041,07 | 2038,63 | 2032,38 | 2026,52 | 2023,11 | 2019,5 | 2014,8 | 2002,67 | |
| $\tau,$ годы | 0 | 0 | 0 | 23,86 | 27,694 | 30,871 | 33,913 | 38,125 | |
| $N_{max},$ млрд. чел. | - | - | - | 28,344 | 23,605 | 20,386 | 17,6 | 13,322 | |

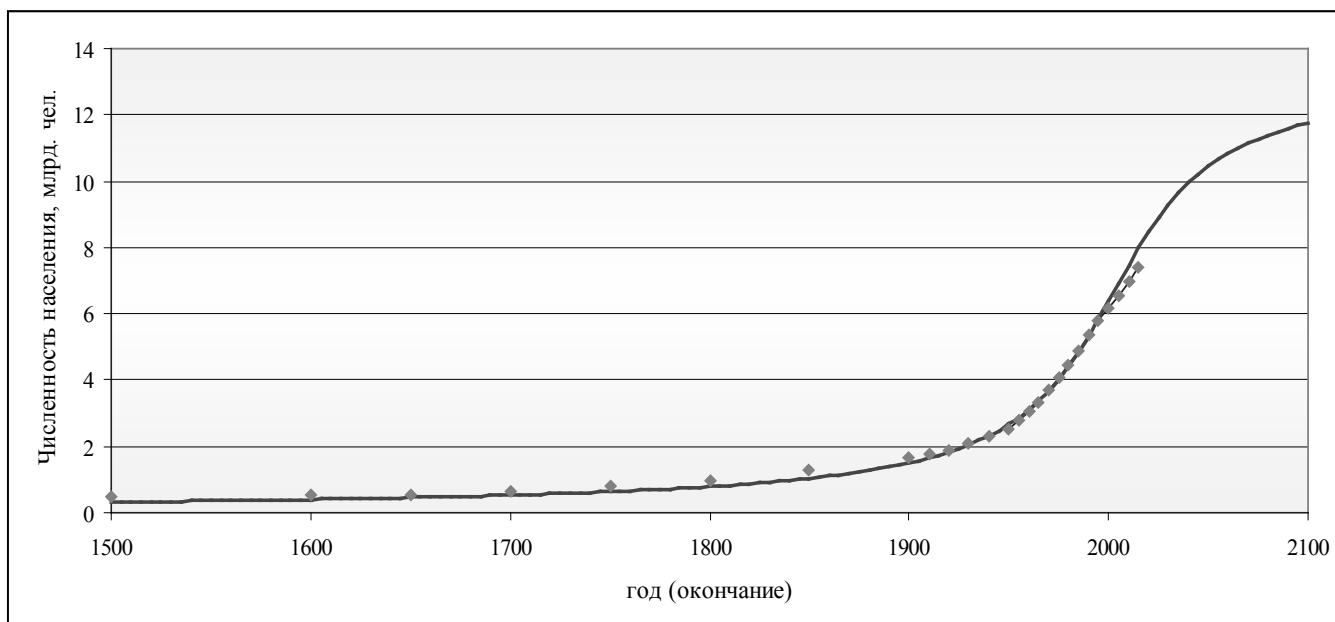


Рис. 5. Динамика численности населения на Земле (модель 2)

$C = 172$ млрд. чел.×лет; $T_2 = 2000$; $\tau = 45$ года.

Если с указанным в табл. 1 набором данных проделать операцию, как для Модели 1, то получится таблица 3.

Эти цифры близки к оценкам С.П. Капицы. Рассогласования Модели 2 с имеющимися фактическими данными также весьма малы.

Данные по динамике численности населения, рассчитанной по Модели 2, представлены на рис. 5.

Модель 2, которая при малых t переходит в Модель 1, по сравнению с ней имеет 2 существенных достоинства.

Во-первых, в ней отсутствует критическая точка, что соответствует реальности.

Во-вторых, из Модели 2 следует существование предела N_{max} , к которой будет асимптотически стремиться численность человечества:

$$N_{max} = \pi \times C / \tau$$

По оценкам [6] автора Модели 2, этот предел равен 12 млрд. человек, по данным табл. 3 – 13,322 млрд. человек.

Для указанного изменения характера роста численности населения придумали специальное словосочета-

ние — *глобальный демографический переход*. Что-то вроде фазового перехода 2-го рода в физике.

Основной недостаток Модели 2 заключается в неясности физического смысла параметра τ : если он определяет среднее время жизни, то 42–45 лет — мало, а если темп смены поколений — то много; для этого больше подходит цифра 15–25 лет.

Но главное даже не в этом. Если τ рассматривать, как некую задержку по времени, то логично записать дифференциальное уравнение динамики численности населения не в виде (3), а в виде

$$dN/dt = C/(T_2 + \tau - t)^2,$$

из которого достаточно очевидно получается (1), в котором $T_1 = T_2 + \tau$, и критическая точка никуда не исчезает. Более того, она остаётся на прежнем месте. Поэтому проблема устранения сингулярности не решается.

Параметр τ можно рассматривать, как время задержки только при $t \approx T_2$. Действительно, т.к.

$$(T_2 + \tau - t)^2 = (T_2 - t)^2 + 2 \times (T_2 - t) \times \tau + \tau^2,$$

то $(T_2 + \tau - t)^2 \approx (T_2 - t)^2 + \tau^2$ только когда мало отличается от T_2 .

Во всех остальных случаях τ не может считаться временной задержкой. В лучшем случае — это некоторый моделирующий параметр, имеющий размерность времени, но не имеющий чёткого физического смысла.

И поэтому логически зависает, превращаясь в математическую абстракцию, важное для Модели 2 понятие глобального демографического перехода — не ясны его движущие факторы.

Как видно из выражений (1–4) для рассмотренных Моделей 1,2, они предполагают, что рост численности N населения Земли на протяжении тысячелетий зависит только от самой численности населения N и не связан с другими внешними факторами: параметрами окружающей среды, технологиями, ресурсными ограничениями и т.д. Это достаточно смелое предположение получило название «*демографический императив*».

Название, конечно, красивое, но мало, что объясняет; поэтому оно недостаточно конструктивно.

В работе [4] рассмотрены другие возможные модели роста населения Земли. Основная задача этих подходов, многие из которых весьма остроумны, заключается в по-

пытках объяснения феномена последних десятилетий — замедления темпов роста численности населения после 1967–1968 гг.

Действительно, всё довольно странно: больших войн и эпидемий не было, большие астероиды на Землю не падали, а темпы роста вдруг стали падать. С точки зрения демографического императива это — необъяснимо, и поэтому неприятно для его последователей.

Из рассматриваемых в [4] подходов можно выделить модели М. Кремера, А.В. Подлазова, модель самих авторов работы [4]. Любопытны также попытки связать снижение рождаемости с уровнем грамотности населения. Правда, где здесь причина, а где следствие — тоже не очень понятно: если в семье 10 негритят или семеро по лавкам, то это как-то не стимулирует получение хорошего образования.

Для объяснения снижения темпов роста большинство авторов предполагают создание вспомогательных моделей 2-го и 3-го уровней. По их мнению, это поможет решить исходную задачу.

А по нашему мнению, эти исследователи попадают в логическую ловушку. Дело в том, что математические модели более низких системных уровней для своей калибровки требуют наличия больших объёмов исходных данных. А их как раз и недостаточно. Это известная эконометрическая дилемма — выбор рациональной сложности математической модели, чтобы она соответствовала располагаемым фактическим данным: часто приходится упрощать математическую модель, поскольку для более адекватных и более сложных моделей недостаточно количества и качества исходных данных.

Поэтому ниже сделана попытка таких модификаций первичных Моделей 1 и 2 для того, чтобы учесть новые факторы, но при этом не сильно усложнить сами модели. С тем, чтобы они были совместимы с имеющимися исходными данными.

Математические модели на основе модификаций исходного уравнения динамики численности населения

Зададимся простым вопросом: почему Модель 1 правильно описывала динамику численности населения на протяжении тысячелетий, а потом вдруг в последние 50 лет стала давать сбои? Почему такое произошло, что изменилось за последние полвека?

Попытаемся ответить на первую часть вопроса: почему Модель 1 очень хорошо описывала динамику общего количества людей в предыдущие годы?

Получение формул, обеспечивающих малые ошибки интерполирования — дело нехитрое: например, студенты первых курсов знакомятся с интерполяционной формулой Лагранжа, которая вообще обнуляет величины всех рассогласований между фактическими значениями и величинами интерполяционного полинома. Правда для целей прогнозирования (т.е. для значений независимой переменной вне интервала интерполирования) такой полином применять нельзя — он для этого не годится из-за больших ошибок. Причём, чем выше степень полинома, тем больше ошибки прогнозирования.

Может быть, и здесь — то же самое: внутри интервала наблюдения ошибки малы, а при выходе за него — резко нарастают?

Нет, не похоже: в интерполяционном полиноме много коэффициентов, а в Модели 1 — только 2. С двумя степенями свободы малые рассогласования можно получить только, если аппроксимирующая функция соответствует основным закономерностям рассматриваемого процесса. Поэтому, следует признать, что Модель 1 объективно описывает динамику численности, по крайней мере, до 1960 г.

Теперь попробуем ответить на поставленный вопрос с позиций демографического императива, у которого имеются много приверженцев. В соответствии с этим подходом, причину следует искать только в одном — в численности N населения.

Она резко возросла за последние 50 лет. Иначе говоря, изменились закономерности, связывающие темпы роста dN/dt и его численности при $N > 3,5$ млрд. человек. Причём они модифицировались таким образом, что при малых N работает старая, проверенная на тысячелетиях схема, а в последние десятилетия из-за роста N она трансформировалась в другую, более общую. Которая при малых N имеет своим предельным случаем старую схему.

Теперь изложим вышесказанное на более конкретном языке математических формул. Возьмём за основу выражения (1) и (2) для определения N .

Легко видеть, что их можно записать не в виде дифференциального соотношения, а в виде дифференциального уравнения:

$$dN/dt = N^2/C \tag{5}$$

Обычно темп роста численности живых организмов пропорционален N , а не N^2 . Почему у людей всё не так?

А. В. Подлазов предлагает объяснение с точки зрения развития жизнесберегающих технологий. Причём, в этот

термин он вкладывает очень широкий смысл. Жизнесберегающие технологии — это технологии продления жизни и предотвращения смерти безотносительно к тому, каким образом это достигается: от производства продовольствия до религиозных норм морали.

Следующий этап — считается, что развитие и обновление жизнесберегающих технологий осуществляется посредством значимых социальных изобретений, количество которых пропорционально количеству N живущих людей: чем больше людей, тем больше среди них потенциальных изобретателей, тем больше изобретений. И результаты этих изобретений затем начинают тиражироваться и использоваться всем человечеством.

Другими словами, в этом предположении выражение (5) может быть переписано в виде:

$$dN/dt = (N/\alpha) \times (N/\beta) = (N/\alpha) \times (N\alpha/C), \tag{6}$$

где для обеспечения соответствия (5) и (6) следует положить $\alpha\beta = C$.

В (6) первый сомножитель определяет динамику количества живущих на Земле людей, как биологического вида, а второй — как динамику совершенствования жизнесберегающих технологий.

Но понятно, что жизнесберегающие технологии, скорее всего, не могут развиваться бесконечно с ростом N , как это записано в (6) Для их эффективности W существуют физические и биологические пределы.

Обычно динамика параметра W определяется из дифференциального уравнения:

$$dW = (1 - W) \times \eta \times dN \tag{7}$$

Уравнение (7) указывает, что:

- ◆ предельная эффективность некоторых действий (в данном случае — жизнесберегающих технологий) равна 100% или в безразмерном выражении — 1;
- ◆ в каждый момент времени изменение эффективности пропорционально изменению определяющего фактора, в данном случае — N ;
- ◆ кроме этого, в каждый момент времени изменение эффективности пропорционально потенциальным возможностям $(1 - W)$ по её дальнейшему изменению: чем меньше этот, пока нереализованный, остаток, тем труднее добиться изменения.

Почти очевидно, что уравнение (7) имеет решение

Среднеквадратическое относительное рассогласование
 Δ модельных и фактических значений по численности населения

$$\Delta(\alpha, C, \gamma) = \{j(t_k) - j(t_0) + 1\}^{-1} \times \sum_{j(t_0)}^{j(t_k)} \{N(\text{ML}[j(t), 1], \alpha, C, \gamma) / \text{ML}[j(t), 2] - 1\}^2 \quad (10)$$

$$W = 1 - \exp(-\eta \times N), \quad (8)$$

которое удовлетворяет также очевидному условию:
 при $N = 0$ также $W = 0$.

При малых N

$$W = 1 - \exp(-\eta \times N) \approx \eta \times N$$

Теперь становится понятным, как следует модифицировать (5) и (6), чтобы учесть изменение закономерности, определяющей темп роста численности населения: вместо (6) нужно записать

$$dN/dt = (N/\alpha) \times \{1 - \exp(-N \times \alpha / C)\} \quad (9)$$

Это дифференциальное уравнение при малых N переходит в уравнение (5). Но при больших N , когда экспонента проявляет свои нелинейные свойства, в решении (9) отсутствует сингулярная точка. При этом с увеличением t продолжается неограниченный рост N , но уже не по гиперболическому, а по экспоненциальному закону.

Это — очень важная методическая особенность (9).

В отличие от предыдущих уравнений, дифференциальное уравнение (9) не может быть решено аналитически. Для этого потребуются численные методы, например, метод Эйлера с малым шагом по времени. Величину шага выберем равной 1-му месяцу, т.е. 1/12 года.

Потребуется также задать начальное условие. Его естественно записать в виде:

$$N(t_0) = \gamma \times \text{ML}[j(t_0), 2],$$

где $j(t_0)$ — где номер строки в массиве ML , соответствующей году t_0 начала статистических данных по численности населения;

γ — корректирующий безразмерный параметр.

В результате численного решения (9) для заданного значения t_0 устанавливается следующая функциональная зависимость

$$N(t) = N(t, \alpha, C, \gamma)$$

Далее в интервале наблюдения определяется среднеквадратическое относительное рассогласование Δ модельных и фактических значений по численности населения (см. формулу выше).

Следующим этапом является определение такого набора параметров α_0, C_0, γ_0 , который минимизирует $\Delta(\alpha, C, \gamma)$, лучше всего соответствуя совокупности фактических данных по численности населения в мире в рассматриваемом временном периоде:

$$(\alpha_0, C_0, \gamma_0) = \text{Arg} \{ \Delta_0 = \min \Delta(\alpha, C, \gamma) \} \quad (11)$$

В этой оптимизационной задаче $\Delta(\alpha, C, \gamma)$ играет роль минимизируемой целевой функции.

Наконец, на последнем этапе для любого t рассчитываются значения $N(t) = N(t, \alpha_0, C_0, \gamma_0)$.

Посмотрим, как математическая модель на основе дифференциального уравнения (9), которую далее назовём «Модель 3», соответствует реальности, т.е. имеем исходным данным.

Результаты соответствующих расчётов представлены в табл. 4 по примерно такой же форме, как при иллюстрациях Модели 1 и Модели 2.

То, что полученные значения C_0 оказались очень близки к соответствующим значениям табл. 2 — не удивительно: Модель 1 и Модель 3 имеют одну основу.

Также понятно, почему Модель 3 приводит к несколько меньшим ошибкам среднеквадратического рассогласования — в ней не 2, а 3 свободных параметра. Поэтому её способность адаптироваться к набору исходных данных выше, чем у Модели 1, т.е. с точностью до погрешностей численного интегрирования дифференциального уравнения средняя величина рассогласования должна быть ниже.

Но главное достоинство Модели 3 состоит в том, что в ней нет сингулярной точки, в которой $N \rightarrow \infty$.

Прежде, чем переходить к описанию следующих математических моделей, нужно сделать одно пояснение.

Таблица 4. Модель 3 (до 1960 г.)

| Параметр | Год t_0 начала данных | | | | | | | |
|--|-------------------------|---------|---------|--------|---------|--------|--------|--------|
| | 0 | 500 | 1000 | 1500 | 1600 | 1700 | 1800 | 1900 |
| Среднее относительное рассогласование $\Delta_0, \%$ | 14,289 | 9,601 | 9,483 | 3,955 | 3,059 | 2,243 | 2,13 | 1,499 |
| α_0 , год | 2,745 | 1,635 | 0,9 | 0,975 | 2,1 | 3,0625 | 2,6125 | 3,35 |
| β_0 , млрд. чел. | 103,962 | 163,303 | 283,417 | 234,77 | 106,12 | 71,938 | 85,67 | 61,567 |
| γ_0 | 0,48625 | 0,8601 | 0,9184 | 0,8826 | 0,91425 | 1,0358 | 0,9848 | 0,97 |
| C_0 , млрд. чел.-лет | 285,375 | 267 | 255,08 | 228,9 | 222,85 | 220,31 | 223,81 | 206,25 |

Оптимизационная задача (11) представляет собой не очень хорошо определённую задачу. Дело в том, что параметры γ_0 и C_0 устанавливаются довольно однозначно, а вот насчёт параметров α_0 и $\beta_0 = C_0/\alpha_0$ это сказать сложно: достаточно точно устанавливается лишь их произведение, т.е. C_0 . Поэтому, как это видно из табл. 4, оптимальные значения α_0 и β_0 сильно волатильны. И поэтому нужно отдельно рассмотреть вопрос о реальных значениях какого-либо одного из этих параметров, например, параметра α_0 .

По своему физическому смыслу α_0 представляет собой темп роста численности населения Земли в комфортных условиях, когда

$$W = 1 - \exp(-\eta \times N) = 1,$$

т.е. когда жизнеспасающие технологии отработаны по максимуму, по крайней мере, на обозримый период до 2100 г.

Для определённости положим, что это соответствует средней продолжительности жизни людей 80 лет и тому, что они могут видеть не только своих внуков, но правнуков.

Кроме этого, проблем жильём, детскими садами, школами, пенсионным обеспечением и т.д. не существует. Доходы семьи также вполне достаточны. Поэтому каждая семья может завести и воспитывать столько детей, сколько ей будет не в тягость для своей комфортной жизни.

Но понятие «комфортная жизнь» у каждого своё.

Пусть родители считают, что им достаточно k детей, а оставшееся от их воспитания личное время должно пойти на работу, отдых, самосовершенствование. Пусть такого же мнения придерживаются их дети и внуки. Тогда степень участия родителей 1-го поколения в росте

численности населения может быть оценена следующим образом:

$$k + k^2/2 + k^3/4 = k \times \{1 + (k/2) + (k/2)^2\}$$

Деление на 2 и на 4 производится потому, что в рождении потомства опосредованно принимают участие родители из других аналогичных семей.

После того, как родители 1-го поколения после 80 лет жизни умрут, количество людей, рождённых при их участии, составит

$$k \times \{1 + (k/2) + (k/2)^2\} - 2$$

или в расчёте на 1-го родителя 1-го поколения:

$$(k/2) + (k/2)^2 + (k/2)^3 - 1$$

Тогда оценкой для минимального значения величины α будет

$$\alpha \approx 80 / \{(k/2) + (k/2)^2 + (k/2)^3 - 1\}$$

При $k = 3$ минимальное значение параметра α оценивается в 13,06 лет. Учитывая приближённый характер этой оценки, задачи минимизации Δ , типа (11) далее будут решаться при ограничении $\alpha \geq 13 \text{ год}^{-1}$ — так соответствие реальности будет точнее.

В табл. 5. представлены результаты такого решения.

Из сопоставления данных табл. 4 и 5 видно, что минимальное значение целевой функции изменилось очень незначительно, что было ожидаемо.

На рис. 6 представлен график временной зависимости $N(t)$ для случая, когда статистический ряд начинается с 1500 г., т.е. при $t_0 = 1500$.

Таблица. 5. Модель 3 (до 1960 г.; $\alpha \geq 13$ год⁻¹)

| Параметр | Год t_0 начала данных | | | | | | | |
|--|-------------------------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|
| | 0 | 500 | 1000 | 1500 | 1600 | 1700 | 1800 | 1900 |
| Среднее относительное рассогласование, % | 14,589 | 9,988 | 9,794 | 4,159 | 3,173 | 2,328 | 2,282 | 1,565 |
| α_0 , год | 14,5 | 13,9 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 |
| β_0 , млрд. чел. | 19,155 | 18,808 | 19,132 | 17,052 | 16,574 | 16,352 | 16,487 | 15,006 |
| γ_0 | 0,478 | 0,8525 | 0,9103 | 0,8773 | 0,9088 | 1,03 | 0,9808 | 0,9684 |
| C_0 , млрд. чел.-лет | 277,75 | 261,438 | 248,713 | 221,675 | 215,46 | 212,58 | 214,33 | 195,08 |

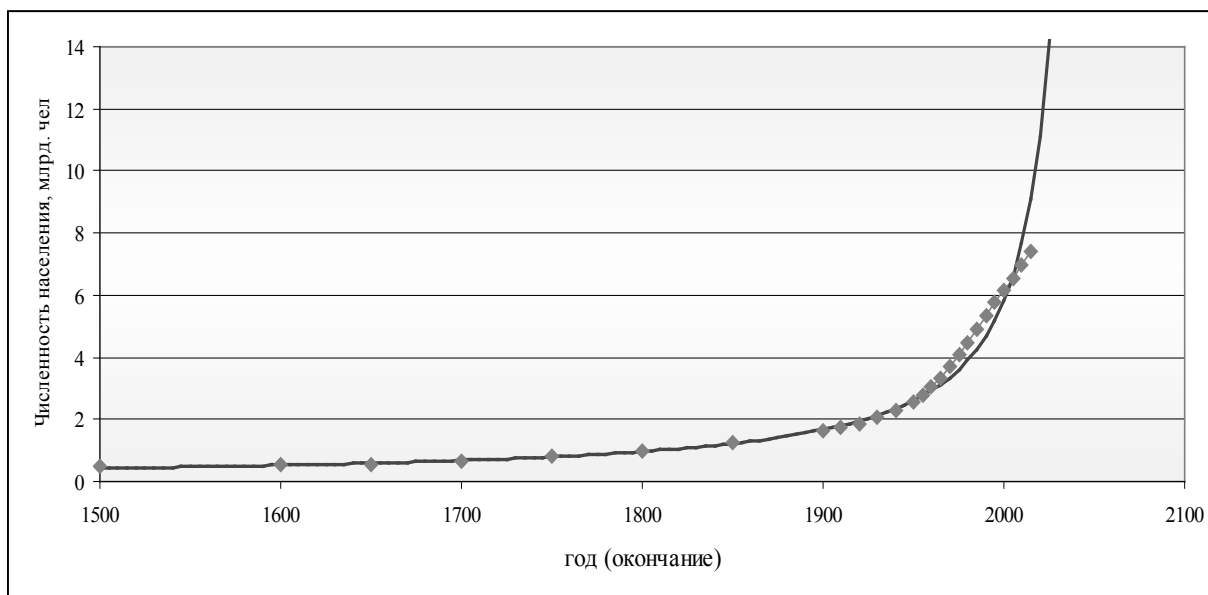


Рис. 6. Динамика численности населения на Земле (модель 3)

В целом этот график напоминает рис. 4, но он не имеет особой точки, в которой $N(t)$ обращается в бесконечность.

Хотя и не указывает на снижение темпов роста при $t > 1960$ г. Поэтому Модель 3 нуждается в доработке.

Например, в правую часть (9) можно ввести запаздывание τ — у людей рождаются дети, и начинается изобретение жизнесберегающих технологий не с момента рождения, а начиная с некоторого возраста τ .

Назовём такую модификацию Модель 4.

Уравнение динамики численности населения в Модели 4 будет выглядеть следующим образом:

$$dN(t)/dt = \{N(t-\tau)/\alpha\} \times \{1 - \exp(-N(t-\tau) \times \alpha/C)\} \quad (12)$$

Решения такого уравнения усложняется, поскольку нужно учитывать не текущие, а запаздывающие значения N . Для этого в вычислительной программе формируются дополнительный массив, в который записывается история процесса.

Теперь целевая функция $\Delta(\alpha, C, \gamma, \tau)$ в задаче минимизации зависит от 4-х переменных.

$$(\alpha_0, C_0, \gamma_0, \tau_0) = \text{Arg} \{ \Delta_0 = \min \Delta(\alpha, C, \gamma, \tau) \} \quad (13)$$

при ограничении

$$\alpha \geq 13$$

Таблица 6. Модель 4 (от 1900 г.; $\alpha \geq 13$ год-1)

| Параметр | Год t_k окончания данных | | |
|--|----------------------------|--------|--------|
| | 1967 | 2000 | 2017 |
| Среднее относительное рассогласование Δ_0 , % | 2,111 | 2,895 | 3,997 |
| α_0 , год | 13 | 41,13 | 57,65 |
| β_0 , млрд. чел. | 13,845 | 3,0582 | 1,53 |
| γ_0 | 0,9515 | 0,9062 | 0,8796 |
| C_0 , млрд. чел.×лет | 179,99 | 125,78 | 88,2 |
| t_0 , годы | 0 | 0 | 0 |

Решая оптимизационную задачу (13) при $t_0 = 1900$ и различных временах t_k окончания статистического ряда, получим значения, представленные в табл. 6.

Значения времени t_0 оказываются равными нулю, что делает нецелесообразным применение более сложной Модели 4. А величины α_0 и C_0 существенно разнятся при различных значениях t_k . В действительности такого быть не должно, эти величины должны быть примерно одинаковыми для разных t_k .

Поэтому объяснить снижение темпов роста численности населения после 1967–1968 г.г. только учётом запаздывания τ не получается. Опять нужно рассматривать какой-то механизм изменения тенденции роста.

Фактические данные по ограничению численности населения в мире

Дальнейший анализ будет основываться на предположении, что основным движущим фактором снижения темпов роста населения в период 1967–2017 гг. являются меры, предпринимаемые рядом стран по ограничению скорости роста его численности [7,8].

Такие меры в разных странах имеют свои национальные особенности.

В Индии обсуждение вопросов роста населения и демографической политики началось ещё до завоевания страной независимости, когда в 1938 г. Переходное правительство образовало при Национальном плановом комитете подкомитет по населению.

С 1952 г. государство начало реализацию политики снижения рождаемости. Проводилась массовая, финансируемая государством, стерилизация женщин и избирательные аборты. Правительство Индиры Ганди ввело денежные поощрения стерилизации, а затем приняло решение о насильственной стерилизации двухдетных

мужчин. Кампания проводилась на протяжении нескольких лет в условиях особого положения.

Начиная с конца 1960-х годов, одна развивающаяся страна за другой принимали программы планирования семьи, адаптируя чужой опыт к своим национальным условиям.

В Китае в период 1978–2016 гг. существовала программа «Одна семья — один ребёнок», которая, согласно официальной статистике, предотвратила более 400 млн. рождений. Правда, после 2016 г. эта программа была отменена, и введено разрешение иметь 2-х детей, что по существу также является ограничением.

Политика одного ребёнка включала меры контроля, поощрения и наказания. Если брачная пара уже имела 2-х детей, женщина (или, реже, мужчина) должна была подвергнуться стерилизации. Любая беременность без предварительного официального разрешения должна была прекращаться абортom. Принудительные кампании достигли кульминации в 1983 г., когда было проведено 21 млн. стерилизаций, 14 млн. абортов.

Превышение разрешенного числа детей влекло карательные санкции, включая крупные штрафы, вычеты из зарплаты или лишение работы, конфискацию или разрушение семейного дома или имущества, политические преследования.

Поощрительный пакет включал регулярные пособия на единственного ребёнка, приоритетный доступ к услугам здравоохранения и образования, преимущества родителям в получении хорошей работы.

В итоге в городах суммарная рождаемость снизилась до 1,4 ребёнка на женщину. С 1984 г. правительство начало видоизменять политику одного ребёнка в сельской местности. В 18 провинциях женщинам было разрешено рожать 2-го ребёнка, если первой родилась девоч-

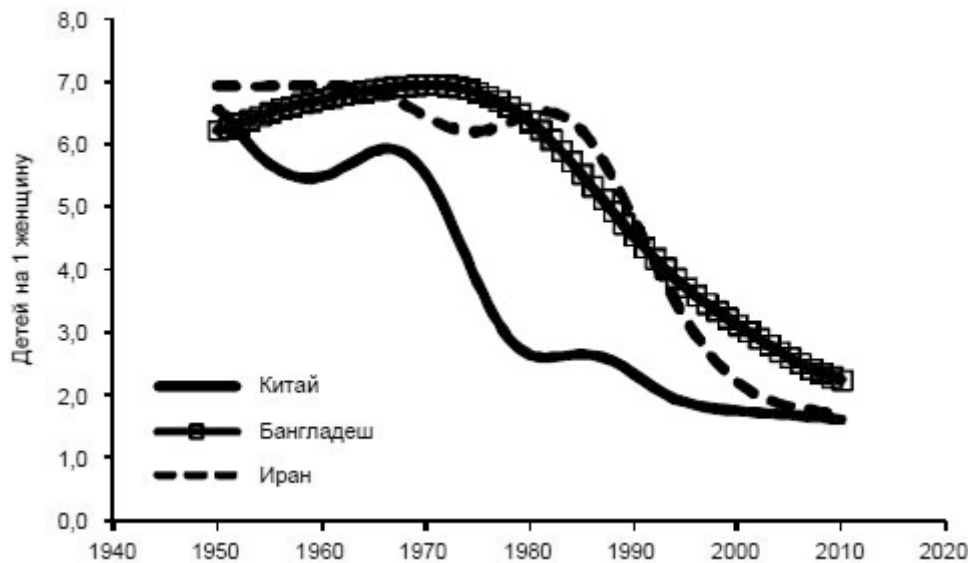


Рис. 7. Коэффициент суммарной рождаемости в Китае, Бангладеш и Иране в 1950–2010 гг. ([8])

ка. В 5 провинциях всем сельским супружеским парам было разрешено иметь 2-х детей. В других 5 провинциях с преобладанием этнических меньшинств был установлен 3-детный предел. В 2-х провинциях и 4-х районах со статусом провинции оставлена 1-детная норма. Точное значение коэффициента суммарной рождаемости в сельской местности неизвестно, но по оценкам он составляет 2 ребёнка на женщину.

Пример успешной программы планирования семьи в экстремально плохих экономических условиях реализован в Бангладеш. В 1970-х годах в сельском районе Матлаб был начат эксперимент по комплексному предоставлению услуг планирования семьи и репродуктивного здоровья. Женщинам предлагался широкий выбор методов, консультации высококвалифицированных специалистов и современная акушерская и гинекологическая помощь. В зоне действия эксперимента использование контрацепции резко возросло, а рождаемость снизилась, чего не наблюдалось в контрольной зоне. Правительство страны приняло решение распространить матлабский эксперимент на всю страну и добилось немалых успехов.

В Иране провозглашённая в 1979 г. Исламская Республика сначала свернула начатые при монархическом строе программы планирования семьи на том основании, что исламу и стране нужно большое население. Минимальный возраст вступления в брак был снижен до 9 лет для мальчиков и 12 лет для девочек. Рождаемость выросла на одного ребенка на женщину.

После смерти аятоллы Хомейни в 1989 г. правительство Хаменеи-Рафсаджани круто изменило курс на огра-

ничения рождаемости, осознав, что стремительный рост населения быстро исчерпает возможности обеспечения его продовольствием, образованием, жильём и рабочими местами. Было провозглашено, что ислам благословляет только 2-детные семьи. Министерство здравоохранения развернуло общенациональную программу планирования семьи, предлагавшую широкий выбор контрацептивных методов. В 1993 г. парламент принял законы, лишившие третьих детей и детей более высоких порядков рождения продовольственных талонов и социальных субсидий, а их матерей — декретных отпусков. Прохождение учебного курса планирования семьи стало условием заключения брака. В результате уровень использования современной контрацепции поднялся с 26% в 1975 г. до 59% в 2002 г., а суммарная рождаемость снизилась с 6,2–6,5 ребёнка на женщину в начале 1970-х годов до 2 детей на женщину в 2002 г. (рис. 7).

В настоящее время в Китае, Индии, Бангладеш и Иране проживает более 40% населения Земли. Поэтому меры, принимаемые этими странами, являются очень значимыми.

К 2009 г. только 9 из 136 развивающихся государств не оказывали прямой государственной поддержки программам планирования семьи.

В целом эти программы зарекомендовали себя как эффективный инструмент гашения демографического взрыва и средство улучшения здоровья женщин, младенцев и маленьких детей. По оценкам, реализация программ в 1985–2010 гг. обеспечили снижение рожда-

емости в развивающихся странах с 6 детей на женщину в 1960–1965 гг. до 2–3-х детей, т.е. в 2,5–3 раза.

Формализация процесса ограничения численности населения в мире

Как формализовать процесс ограничения численности населения в мире и учесть его в математических моделях динамики?

Можно по общей схеме (8) ввести показатель W^* эффективности проводимых мероприятий по снижению скорости роста численности населения в мире с 1967 г.:

$$W^* = 1 - \exp\{-\omega \times (t - 1967)\} \quad (14)$$

Обоснование вида соотношения (14) — такое же, как для соотношения (8). Здесь фактор, определяющий эффективность — время t . В качестве точки отсчёта принят 1967 г., как год, предшествующий году максимума темпов увеличения численности. Поскольку понятно, что должна быть небольшая задержка, чтобы проявилась эффективность проводимых мероприятий.

Тогда скорость V роста численности населения в условиях новых ограничений будет иметь вид

$$V = V_0 \times (1 - W^*) = V_0 \times \exp\{-\omega \times (t - 1967)\},$$

где ω — темп снижения скорости роста, величина которого далее будет установлена.

Таким образом, основное уравнение динамики численности населения записывается в виде:

$$dN(t)/dt = U(t) \times \{N(t-\tau)/a\} \times \{1 - \exp(-N(t-\tau) \times \alpha/C)\}, \quad (15)$$

где

$$U(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } t \leq 1967 \\ \exp\{-\omega \times (t - 1967)\} & \text{при } t > 1967 \end{cases}$$

Дифференциальное уравнение (15) должно интегрироваться при начальном условии

$$N(t_0) = \gamma \times ML[j(t_0), 2],$$

где t_0 — год начала статистического ряда.

Назовём эту расчётную схему «Модель 5».

Полагая $t_0 = 1950$, можно получить зависимость численности населения в виде $N(t) = N(t, \alpha, C, \gamma, \tau, \omega)$.

Для определения совокупности параметров $\alpha, C, \gamma, \tau, \omega$, наилучшим образом соответствующих статистическому ряду при $t = t_0 - 2017$, опять составляем функцию Δ , определяющую среднеквадратическое относительное рассогласование между модельными и реальными значениями численности населения в обозначенном интервале.

Запишем это подробно:

$$\Delta(\alpha, C, \gamma, \tau, \omega) = \{j(t_k) - j(t_0) + 1\}^{-1} \times \sum_{j(t_0)}^{j(t_k)} \{N(ML[j(t), 1])\},$$

$$\alpha, C, \gamma, \tau, \omega / ML[j(t), 2] - 1 \}^2 \quad (16)$$

Целевая функция $\Delta(\alpha, C, \gamma, \tau, \omega)$ — функция 5 переменных.

Набор параметров $\alpha_0, C_0, \gamma_0, \tau_0, \omega_0$, наилучшим образом соответствующих статистическому ряду, определяется в результате численного решения оптимизационной задачи

$$(\alpha_0, C_0, \gamma_0, \tau_0, \omega_0) = \text{Arg} \{ \Delta_0 = \min \Delta(\alpha, C, \gamma, \tau, \omega) \} \quad (17)$$

при ограничении $\alpha \geq 13$

В результате получаем следующие значения: $\alpha_0 = 20,5278$ год, $C_0 = 113,287$ млрд. чел.хлет, $\gamma_0 = 1,001$, $\tau_0 = 2,8468$ лет, $\omega_0 = 0,025$ год⁻¹.

При этом для 68 опорных точек минимальное значение Δ_0 составляет только 0,328%. Т.е. Модель 5 верно отражает реальность, по крайней мере, до 2017 г. Количество параметров Модели 5, равное 5, относительно невелико, что усиливает предположение об её адекватности.

Результаты моделирования графически представлены на рис. 8, 9 из которых видно уже упомянутое хорошее совпадение реальных и расчётных данных. И которые показывают, что существует предел роста численности населения на Земле — 11–12 млрд. человек.

Последнее требует уточнения: полученный результат, наилучшим образом соответствующий современным статистически данным по количеству живущих на Земле людей.

Кроме этого, он позволяет в глобальном масштабе оценить эффективность мер по ограничению рождаемости, предпринятыми странами к настоящему времени. Она равна

$$1 - \exp\{-\omega_0 \times (2017 - 1967)\} = 1 - e^{-1,25}$$

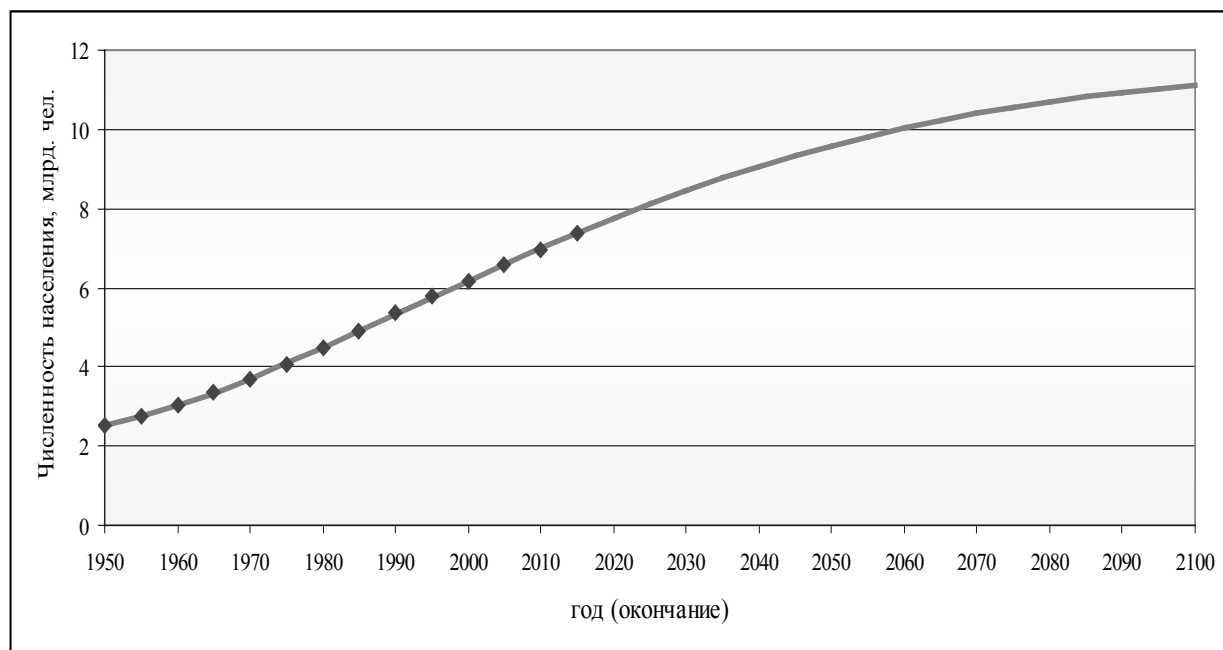


Рис. 8. Динамика численности населения на Земле (модель 5)

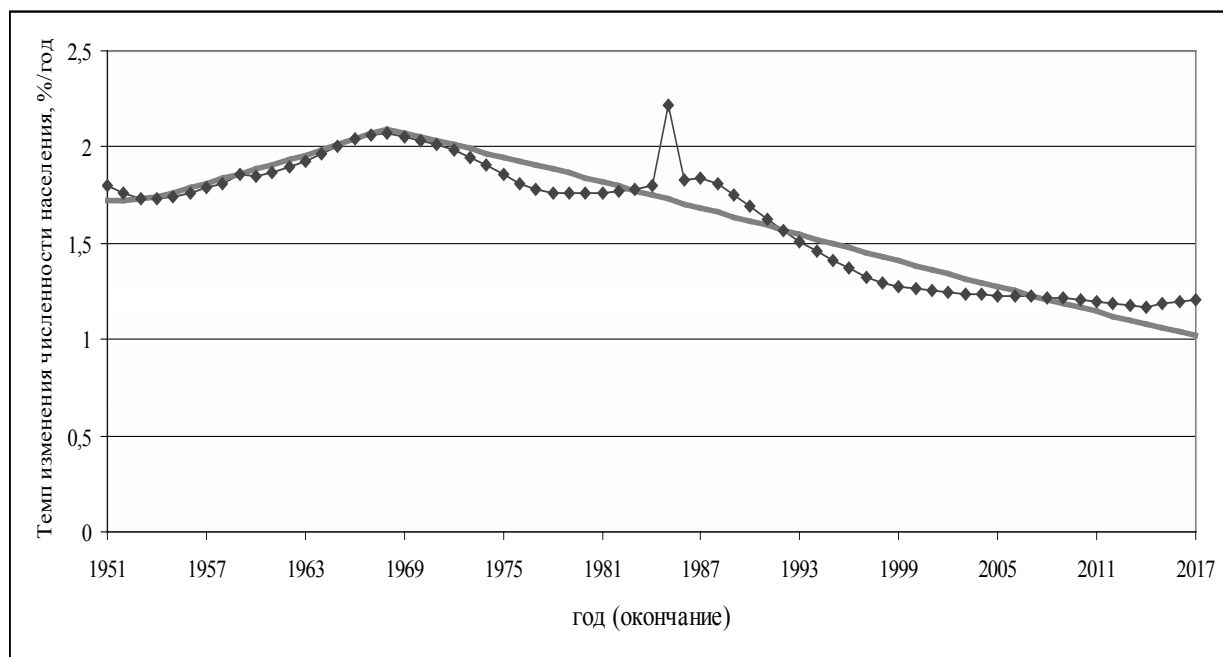


Рис. 9. Темп роста численности населения Земли (модель 5)

Иначе говоря, ограничение рождаемости позволило снизить темп роста численности населения в $e^{1.25} = 3,49$ раз.

На всякий случай, для ясности: указанная величина определяет снижение скорости роста численности

не по отношению к 1967–1968 гг., а к той величине, которая была бы в 2017 г. при отсутствии ограничительных мер.

Это соответствует другим независимым оценкам эффективности реализации политики ограничения рождаемости.

Заключение

Проведённый анализ динамики численности населения Земли был основан на последовательности обобщений ранее разработанных математических моделей.

Результатом явилось формирование достаточно точной модели, адекватно отражающей существующую динамику.

Новая математическая модель позволяет учесть факторы, которые начали заметно проявлять себя в последние десятилетия.

Отличительная особенность предлагаемой модели состоит не в некоем аналитическом соотношении, а в алгоритме численного решения уравнения динамики численности населения Земли.

Установлено, что рост численности имеет предел около 12 млрд. человек, что соответствует оценкам С.П. Капицы.

Однако объяснение существования этого предела основано не на демографическом императиве, а на учёте и формализации более понятных, широко известных и эффективных мер по ограничению рождаемости, принимаемых многими странами в рамках реализации своей демографической и экономической политики при содействии международных организаций.

Поэтому в предлагаемой математической модели глобальный демографический переход связывается с конкретными мерами по ограничению рождаемости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Население Земли. URL: <https://countrymeters.info/ru/World> (дата обращения: 10.11.2018).
2. Население Земли. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Население_Земли (дата обращения: 10.11.2018).
3. История населения Земли. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/История_населения_Земли (дата обращения: 10.11.2018).
4. А. В. Коротаяев, А. С. Малков, Д. А. Халтурина, «Математическая модель роста населения Земли, экономики, технологии и образования», Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша, 2005, 013, 39 с.
5. Капица С.П. «Рост населения Земли и его математическая модель» — М., «Наука и жизнь» № 3, 1998.
6. Капица С.П. «Модель роста населения Земли и предвиденное будущее цивилизации» — М., Институт физических проблем РАН, 2000.
7. Политика ограничения рождаемости. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Политика_ограничения_рождаемости.
8. Иванов С. В. «Снижение рождаемости в странах Юга» // Экономический журнал ВШЭ, № 11, 2011, с. 565–582 — М., Демоскоп Weekly № 587–588, 2011.

© Самарин Илья Вадимович (ivs@gubkin.ru), Фомин Александр Николаевич (sad116@mail.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УЩЕРБА ПРЕДПРИЯТИЮ ТЭК С УЧЁТОМ ПОЛУЧЕННОЙ С ПОМОЩЬЮ СТРАТЕГИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ГРУППЫ КОМПЕНСИРУЮЩИХ НЕГАТИВНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ МЕРОПРИЯТИЙ ПРИ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ

TECHNIQUE OF ASSESSMENT
OF DAMAGE TO THE FUEL AND ENERGY
COMPLEX ENTERPRISE GIVEN
THE RECEIVED GROUP OF MEASURES
COMPENSATING THE NEGATIVE
CONSEQUENCES WITH USE STRATEGIC
PLANNING IN THE OPERATION
OF THE AUTOMATED SYSTEM
OF FIRE AND EXPLOSION

**I. Samarin
A. Strogonov**

Summary. The process of modeling the risks of fire and explosion situations at the facilities of the fuel and energy complex (FEC) using the methodology of strategic planning is considered. Support of management on such objects is possible at use the automated system of fire and explosion (ASFEP) as a part of the automated process control system. Subsystem ASFEP require improvements. The purpose of the modeling process is the reduction of possible damage. Author introduces the definition of "risk of a dangerous situation" through the concept of probability. There are proposed the graph structure for the facility of the FEC. It bases on the state of the objects of protection and transitions given of dangerous situations. Two types of square matrices (with probabilities and maximum damage) represent the transition graph. When multiplying them, a matrix of risks of dangerous situations is obtained. This matrix can be used to estimate the integral damage. It is necessary to take into account corrective actions at strategic planning to prevent dangerous situations. Decision matrices allow determining the importance of a certain event to ensure fire safety (FS). There are presented two versions of calculation of probability of occurrence of a dangerous situation. As a result, the damage compensation coefficient is proposed. Its values form the compensation vector of FS measures at the facility of FEC.

Keywords: automated process control system; dangerous situation; fire safety; fire safety measures; risk of a dangerous situation; strategic planning; fuel and energy complex; decision matrix; damage; management support.

Самарин Илья Вадимович

*К.т.н., доцент, РГУ нефти и газа (НИУ) имени
И. М. Губкина
ivs@gubkin.ru*

Строгонов Андрей Юрьевич

Аспирант, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина

Аннотация. Рассмотрен процесс моделирования рисков пожаровзрывоопасных ситуаций на объектах топливно-энергетического комплекса (ТЭК) с помощью методологии стратегического планирования. Решение задач, связанных с поддержкой управления на таких объектах, возможно при использовании в составе автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУТП) автоматизированной системы пожаровзрывобезопасности (АСПВБ). Подсистемы АСПВБ требуют доработки в связи с интенсификацией производства и существенным увеличением объёмов хранимой на объектах продукции. Целью моделируемого процесса является снижение возможного ущерба. Через понятие вероятности введено определение "риска опасной ситуации". Предложена графовая структура объекта ТЭК, подвергшемуся воздействию опасных ситуаций, основу которого составляют состояния объектов защиты и переходы с учётом опасных ситуаций. Граф переходов представлен двумя видами квадратных матриц (с вероятностями и максимальным ущербом). При их перемножении получена матрица рисков опасных ситуаций, с помощью которой возможно оценить интегральный ущерб объекту ТЭК. Для предотвращения опасных ситуаций необходимо учитывать корректирующие действия при выполнении алгоритмов стратегического планирования. С помощью решающих матриц на различных уровнях можно определить важность проведения определённого мероприятия для обеспечения пожарной безопасности (ПБ) на объекте ТЭК. Вектор мероприятий ПБ для каждой опасной ситуации повышает защищённость объекта ТЭК, снижая уязвимость. Представлены расчёты вероятности возникновения опасной ситуации. В одном из них введён поправочный коэффициент для случая, если выполнение всех мероприятий ПБ лишь частично снижает опасное воздействие на объект защиты. В результате расчёта значений вероятностей можно получить оценку влияния мероприятий ПБ на компенсацию ущерба. В завершении статьи предложен коэффициент компенсации ущерба. При определении его значений можно получить компенсационный вектор мероприятий ПБ в целом на объекте ТЭК.

Ключевые слова: автоматизированная система управления технологическими процессами, опасная ситуация; пожарная безопасность; мероприятия пожарной безопасности; риск опасной ситуации; стратегическое планирование; топливно-энергетический комплекс; решающая матрица; ущерб; поддержка управления.

Введение

В последнее время на рынке топлива и энергетики наблюдается увеличение предложения, что обостряет конкуренцию участников рынка между собой с одной стороны, и приводит к необходимости пересмотра традиционных подходов к производству с другой. Предприятия топливно-энергетического комплекса (ТЭК), производя товары и энергию для потребления на рынке вынуждены, внедряя новые технологии, проводить постоянную модернизацию производственных мощностей с целью обеспечения нужной цены на рынке. В условиях международных санкций возник ряд запретов, например, в нефтегазовой отрасли. В связи с этим роль малых и средних предприятий для развития внутреннего рынка возросла [1]. И если на крупных предприятиях подход к обеспечению приемлемого уровня пожарной безопасности (ПБ) строго регламентирован, в необходимой степени автоматизирован, то малые и средние предприятия сталкиваются с некоторыми трудностями. И положительные и отрицательные стороны деятельности малых предприятий [1] по-своему влияют на степень риска опасных производственных ситуаций. Интенсификация производства на объектах ТЭК при этом имеет два основных аспекта, связанных с ПБ. Во-первых, существенно возрастают объемы хранимых на объектах ТЭК сырья, полуфабрикатов и продукции, имеющих взрывоопасные свойства. Следует отметить, что по данным [2] объём мировой торговли сжиженным природным газом (СПГ) в 2017 году вырос на 35,2 млн. тонн, установив новый годовой рекорд в 293,1 млн. тонн. Количество резервуаров для хранения СПГ каждый год увеличивается. Их разгерметизация может привести к возникновению пожаров и взрывов. Также, например, в [3] при обзоре нефтегазовых объектов описаны свойства углеводородов, характер их выбросов и особенности связанных с этим пожаров и взрывов. Во-вторых, интенсификация работы в новых условиях заставляет более интенсивно работать персонал, от чего существенно возрастает риск его неспровоцированных ошибочных действий. Для предприятий ТЭК требуется организация упорядоченного процесса предварительного планирования и контроля устойчивого и безопасного функционирования [4]. В работе [5] выделены основные задачи политики предприятия в области ПБ, а также некоторые особенности в исследовании проблем обеспечения ПБ на крупных предприятиях.

В описанных выше условиях задачи обеспечения ПБ следует решать, увеличивая количество автоматизированных процессов на объекте ТЭК, разрабатывая для него новые методы и средства поддержки управления [6, 7]. Одним из таких средств является набор методов стратегического планирования.

Традиционным способом решения проблем поддержки управления на объектах ТЭК являлось применение внутри автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) автоматизированных систем пожаровзрывобезопасности (АСПВБ). Крайне важным является проведение непрерывной диагностики оборудования АСУТП и своевременное проведение мероприятий по предотвращению пожаров и взрывов [8]. Основные принципы функционирования АСПВБ на нефтеперерабатывающих производствах были заложены в [9], а также ряде других работ. В состав АСПВБ должны входить автоматизированная система предупреждения пожаров и взрывов, автоматизированная система пожаровзрывозащиты, автоматизированная система общего назначения, а также обеспечивающие подсистемы ([9], с. 130), среди которых следует выделить системы информационного, математического, программного и организационно-правового обеспечения. Применение новых разрабатываемых средств поддержки управления ПБ на объектах ТЭК проводится именно в рамках этих подсистем АСПВБ.

Доработка перечисленных обеспечивающих подсистем АСПВБ на предмет поддержки управления в наибольшей степени относится к подсистемам математического и организационно-правового обеспечения. Следует отметить, что их доработку необходимо проводить постоянно, а в связи с наметившейся интенсификацией работы персонала — возможно и в режиме реального времени. Также необходимо принимать во внимание факт использования на предприятиях ТЭК системы контроля и обеспечения ПБ зарубежного производства [10,11]. Сроки запланированных этапов модернизации АСУТП объектов инфраструктуры из-за ограничений на рынке могут быть нарушены, что в свою очередь не может не отразиться на уровне обеспечения ПБ на производственных объектах. Так, согласно [12] 80% доля рынка противопожарного оборудования занята производителями из-за рубежа. Лидерами по объёму продукции являются: ЧП «Артон» (36%), Beijing PT Security Technology (33%), Wizmart Technology (11%) [12].

Материалы и методы

Основным инструментом контроля и оценки качества поддержки ПБ управления на объектах ТЭК могут служить величины оценочных показателей пожарных рисков. В работах [13, 14] дано их определение, которое следует понимать, как вероятностную характеристику возникновения пожара в совокупности с его последствиями. В более общей постановке следует ввести определение “риска опасной ситуации”, которым следует понимать, по аналогии с пожарным риском, произведение вероятности возникновения данной ситуации на ущерб от её последствий. Его можно представить формулой

$$R_{\text{ОПС}} = P_{\text{ОПС}} * V_{\text{ОПС}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{ОПС}}$ – вероятность возникновения опасной ситуации;

$V_{\text{ОПС}}$ — ущерб от её последствий.

В статье [15] с помощью графа стратегического планирования рассмотрен метод оценки прогнозирования готовности пожарных сил и средств на предприятии ТЭК. Также данная разветвлённая структура в [15] применена для выявления уязвимостей обеспечения пожарной безопасности на объектах таких предприятий. Структура объекта ТЭК, подвергающемуся воздействию опасных ситуаций, в общем случае может быть различна. Однако, наиболее естественным образом она отражается именно в виде графа, в котором при рассмотрении поставленных в данной статье задач вершинами обозначаются состояния объектов защиты, а дугами переходы между ними, обусловленные возникновением опасных ситуаций. В этом случае

$$O_{\text{ТЭК}} = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}, \quad (2)$$

где S_1, S_2, \dots, S_N — N состояний объекта ТЭК, в которые он перейдёт при возникновении опасной ситуации;

$$C_{\text{ОПС}} = \{C_1, C_2, \dots, C_M\}, \quad (3)$$

где C_1, C_2, \dots, C_M — M опасных ситуаций для объекта ТЭК, которые при их возникновении вызовут его переход в одно из состояний с последствиями.

Значением C_i может быть, как описание опасной ситуации, так и конкретная физическая величина, имеющая числовое значение и обусловленная ее возникновением (вероятность события, защищенность объекта по конкретному параметру, экспертная оценка последствий, стоимость необходимых принимаемых мер для предотвращения ущерба и т.п.).

При этом сам граф таких переходов уместно представить в виде квадратной матрицы размером N на M [16], в которой будут представлены либо вероятности возникновения опасной ситуации

$$\bar{P}_{\text{ОПС}} = \begin{pmatrix} P_{11}, & P_{12}, \dots, & P_{1N} \\ P_{21}, & P_{22}, \dots, & P_{2N} \\ \dots & \dots & \dots \\ P_{M1}, & P_{M2}, \dots, & P_{MN} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

либо максимально возможный ущерб, причиняемый объекту ТЭК при переходе его в состояние с номером i при возникновении опасной ситуации с номером j

$$\bar{V}_{\text{ОПС}} = \begin{pmatrix} V_{11}, & V_{12}, \dots, & V_{1N} \\ V_{21}, & V_{22}, \dots, & V_{2N} \\ \dots & \dots & \dots \\ V_{M1}, & V_{M2}, \dots, & V_{MN} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Подобный подход к описанию рисков ПБ используется в [17].

Следует учитывать, что при этом возникновение одних опасных ситуаций приводит к переходу объекта ТЭК в определенные состояния, а при возникновении других объект переходит в другие состояния. Следовательно, для выбранного математического объекта существуют значения в конкретных ячейках матриц (4) и (5), которые равны 0.

Кроме того, для получения оценок значимости тех или иных опасных ситуаций в общей картине возможного ущерба следует нормировать значения матрицы (5) [18]. Для этого следует использовать так называемый максимальный ущерб, который могут нанести объекту ТЭК все опасные произошедшие одновременно ситуации.

$$V_{\text{ОПС}}^{\text{max}} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M V_{ij}, \quad (6)$$

где V_{ij} — элемент матрицы (5), выраженный в единицах ущерба (например, рублях, тоннах).

Тогда

$$V_{ij}^{\text{норм}} = V_{ij} / V_{\text{ОПС}}^{\text{max}}. \quad (7)$$

Для получения матрицы рисков опасных ситуаций $\bar{R}_{\text{ОПС}}$ следует транспонировать матрицу (5) и по аналогии с (1) выполнить произведение на строку или столбец [16]

$$\bar{R}_{\text{ОПС}}^i = \bar{P}_{\text{ОПС}}^i * \bar{V}_{\text{ОПС}}^T. \quad (8)$$

Физический смысл $\bar{R}_{\text{ОПС}}^i$ в (8) — ущерб, приносимый объекту ТЭК всеми возможными опасными ситуациями при условии, что он уже находится в i -том состоянии.

В этом случае с помощью (8) можно оценить возможный интегральный ущерб объекту ТЭК, находящемуся в заданном (i -том) состоянии, по всем опасным ситуациям

$$R_{\text{ОПС}}^i = \sum_{j=1}^M \bar{R}_{\text{ОПС}}^i. \quad (9)$$

При этом предполагается, что заданное состояние объекта ТЭК возникло в результате того, что в некоторый момент времени на нем произошли события, которые перевели его в это состояние до возникновения всей совокупности опасных ситуаций.

Сегодня на предприятиях ТЭК немалое внимание руководителей и лиц, принимающих решения, уделяется контролю над выполнением требований стандар-

тизации в области управления безопасностью. Однако, учитывая при формировании данных требований накопленный опыт причин возникновения опасных ситуаций, следует понимать, что предусмотренные сценарии аварий будут включать уже известные нештатные ситуации. Также сильный акцент на стандартизацию может негативно отразиться на скорости развития производства, потенциале и эффективности управления в целом [19].

В целях предотвращения опасных ситуаций на объекте ТЭК дежурной смене, управляющей реализацией мероприятий ПБ, организационно-распорядительной документацией, составленной с учётом применяемой в Российской Федерации нормативной базы по обеспечению ПБ, рекомендуется использование различных корректирующих действий. Совокупность этих действий может быть различной в зависимости от конкретной ситуации. Однако, данные действия будут выполняться при реализации соответствующих алгоритмов поддержки управления в математическом обеспечении АСПВБ и их целью будет обеспечение ПБ на объекте ТЭК.

В данном контексте это означает применение математического аппарата стратегического планирования. Рассмотрим насколько эффективно это может быть. Согласно [20] для применения мониторинга на объекте ТЭК, основанного на методах стратегического планирования в деятельности по управлению ПБ необходим контроль проводимых мероприятий ПБ в соответствии с планами, составленными на определённый период. При этом каждое из мероприятий планов, завязано на заданную стратегическую цель. Для прогнозирования выполнения планов обеспечения ПБ на объекте ТЭК может быть применён механизм автоматизированного мониторинга [21, 22]. При управлении ПБ на объекте ТЭК целью может быть “обеспечение ПБ” или “снижение возможного ущерба”. Так как данные цели для руководителя дежурной смены объекта ТЭК коррелируют между собой, будем рассматривать последнюю в качестве основной, так как она более удобна для решения поставленных в данной статье задачи.

Для определения значимости мероприятий ПБ в [20] предложен многоуровневый подход, анализирующий значимость отдельных, составляющих всю совокупность действий по достижению поставленных целей, мероприятий, которые могут быть сгруппированы на более высоких уровнях иерархии действий в блоки и направления. Математическим объектом, определяющим значимость отдельных мероприятий по достижению заданной цели, является решающая матрица, составляемая на каждом из уровней иерархии действий [18, 23]. Такие объекты могут быть использованы в математическом обеспечении АСПВБ для обеспечения поддержки управления. Получив такую матрицу для определённого уровня ме-

роприятий или их совокупности, можно определить насколько важно их проведение для обеспечения ПБ на объекте ТЭК или в более крупном масштабе.

Предположим, что по итогам перемножения матриц значимости различных уровней с предустановленными нормированными значениями отдельных их элементов (схема действий предложена в [20]) для выполнения задач обеспечения ПБ на объекте ТЭК была получена решающая матрица T

$$T = \begin{pmatrix} T_{11}, & T_{12}, \dots, & T_{1F} \\ T_{21}, & T_{22}, \dots, & T_{2F} \\ \dots & \dots & \dots \\ T_{L1}, & T_{L2}, \dots, & T_{LF} \end{pmatrix}, \quad (10)$$

где L — число уровней мероприятий ПБ,

F — число мероприятий ПБ (или их совокупности) на уровне L .

Матрица (10) отличается от предложенных в [20] тем, что в ней мероприятия и их совокупности по уровням их детализации по отношению к достижению поставленной стратегической цели расположены в строках. В [20] они расположены в матрицах. При наличии такого математического объекта исходя из логики модели в [20] очевидно, что число мероприятий на уровнях $L_i < L$ будет меньше F . Поэтому логично считать, что отдельные элементы матрицы (10) на уровнях, меньших L , будут равны 0. Номера их позиций при этом не имеют значения. Число значащих элементов строк матрицы T в строке с номером i будем обозначать как L_i . Оно будет соответствовать числу реально предпринимаемых действий по достижению стратегических целей обеспечения ПБ или снижения ущерба на объекте ТЭК при их последовательном уточнении или детализации.

Ещё одним свойством данной матрицы является то факт, что ее построчные суммы равны 1

$$T^l = \sum_{i=1}^F T_{il} = \sum_{j=1}^{L_l} T_{jl} = 1, \quad (11)$$

где l — номер строки.

Это вытекает из условия нормировки на каждом из уровней.

Имея такой инструмент оценки “компенсации последствий”, как матрица (10), при выборе стратегической цели для объекта ТЭК по снижению ущерба следует использовать строки этой матрицы для определения возможного снижения при применении мероприятий ПБ на объекте ТЭК. Для этого необходимо связать каждое мероприятие ПБ (или их совокупность) с отдельной опасной ситуацией (см. (3)), сформировав для каждой

из них вектор из мероприятий или их совокупности из строк уровней матрицы Т

$$C^u_{\text{Комп}} = \{T^u_{lk}, T^u_{lk+1}, \dots, T^u_{lk+G}\}, \quad (12)$$

где G — число предотвращающих, полностью или частично компенсирующих угрозу возникновения или снижающих ущерб мероприятий по опасной ситуации с номером u;

где l — номер строки матрицы Т.

Проведение мероприятий (12) повышает защищенность объекта ТЭК, снижая его уязвимость по опасной ситуации с номером u. При этом

$$\sum_{i=k}^{k+G} T^u_{li} < 1, \quad (13)$$

так как для опасных ситуаций много и для компенсации воздействия всей их совокупности требуется как раз F мероприятий ПБ (L_i – на других уровнях), при этом $F > G$ ($L_i > G$).

Однако, если совокупность мероприятий (12) компенсирует негативные последствия от опасной ситуации с номером u, то следует считать их полной группой компенсирующих событий, нормировка которых по сумме их значений позволит учесть насколько хорошо с точки зрения управления объект ТЭК ей противостоит. В этом случае

$$T^u_{li} \text{ max} = \sum_{k=1}^G T^u_{lk}. \quad (14)$$

$$T^u_{lk} \text{ нрм} = T^u_{lk} / T^u_{li} \text{ max}. \quad (15)$$

$$C^u_{\text{комп нрм}} = \{T^u_{lk} \text{ нрм}, T^u_{lk+1} \text{ нрм}, \dots, T^u_{lk+G} \text{ нрм}\}, \quad (16)$$

Результаты и обсуждения

Будем при дальнейшем расчете полагать, что мероприятия в (12) независимы, что не всегда очевидно, и не требуют определенной последовательности выполнения. Тогда после проведения нормировки значений (12) следует в (8) использовать такие значения, для которых величина вероятности возникновения данной опасной ситуации рассчитывается как

$$\overline{P^u}_{\text{мер}} = \overline{P^u}_{\text{опс}} * (1 - \sum_{k=1}^G T^u_{lk} \text{ нрм}). \quad (17)$$

Из (17) следует, что при проведении полной группы компенсирующих мероприятий вероятность ущерба $\overline{P^u}_{\text{мер}}$ от опасной ситуации с номером u может сократиться до 0. В тоже время, возможен вариант такого развития событий, при котором даже выполнение всех мероприятий из (12) для компенсации опасной ситуации с номером

и приведет лишь к частичной компенсации данного воздействия на объект ТЭК. В последнем случае во второй множитель в (17) для опасной ситуации с номером u следует ввести поправочный коэффициент $\varepsilon_u < 1$ и рассчитывать вероятности ущерба в соответствии с формулой

$$\overline{P^u}_{\text{мер}} = \overline{P^u}_{\text{опс}} * (1 - \varepsilon_u * \sum_{k=1}^G T^u_{lk} \text{ нрм}). \quad (18)$$

Сформировав из значений, рассчитанных по формуле (18) вектор, аналогичный строке матрицы (4), можно получить оценку влияния мероприятий ПБ (или их совокупности) на компенсацию возможного ущерба от заданной опасной ситуации.

Тогда ущерб, приносимый объекту ТЭК всеми возможными опасными ситуациями при условии, что он уже находится в i-том состоянии

$$\overline{R^i}_{\text{опс}} \text{ мер} = \overline{P^i}_{\text{мер}} * \overline{V}_{\text{опс}}^T. \quad (19)$$

И соответственно совокупный интегральный ущерб для данного состояния

$$R_{\text{опс}} \text{ i мер} = \sum_{i=1}^M \overline{R^i}_{\text{опс}} \text{ мер}. \quad (20)$$

Отношение

$$\vartheta_i \text{ мер} = R_{\text{опс}} \text{ i мер} / R_{\text{опс}}^i \quad (21)$$

можно назвать коэффициентом компенсации ущерба мероприятиями ПБ (или их совокупностью), который был бы причинен объекту ТЭК всеми возможными опасными ситуациями при условии, что он находится в i-том состоянии.

Тогда, рассчитав $\vartheta_i \text{ мер}$ для каждого из состояний, можно получить компенсационный вектор мероприятий ПБ (или их совокупности) на объекте ТЭК в целом. Интерпретация данного объекта может быть достаточно широкой, как и возможность использовать для его расчета дополнительные параметры. Одним из примеров применения в данной модели новых параметров может быть финансирование мероприятий ПБ (или их совокупности). Другим — их обеспечение человеческими ресурсами. Третьим — фактические времена их проведения с учётом сроков службы соответствующего оборудования (как регистрирующего опасные ситуации, так и используемого дежурными сменами объектов ТЭК для проверки исправности регистрирующих устройств). Использование новых технологий также может быть источником исходных данных в рассматриваемой модели.

В [24] рассмотрены вопросы построения информационно-управляющих систем на предприятиях газовой отрасли. Предложена структура интеллектуальной системы поддержки принятия решений. В качестве до-

полнения подобной системы управления возможно применить описанные выше методы оценки рисков возникновения опасных ситуаций на объектах предприятий.

Заключение

Предложенная методика оценки ущерба может служить средством поддержки управления как на отдельных предприятиях ТЭК, так и в отраслевом масштабе в целом. Используемый в процессе моделирования математический аппарат стратегического планирования позволяет эффективно осуществить декомпозицию выбранной агрегатной цели (снижения возможного ущерба), а также провести анализ мероприятий и их групп с учётом их

значимостей в общем уровне снижения рисков возникновения опасных ситуаций, связанных с ПБ. Реализация модели в составе подсистем АСПВБ математического и организационно-правового обеспечения с помощью программно-инструментальных средств разработки программ способна стать весьма полезным инструментом для лиц, принимающих решения, на различных функциональных участках предприятий ТЭК. Регулярный контроль и своевременная оценка качества поддержки ПБ крайне важны для предупреждения пожарных рисков и, как следствие, позволяют снизить объём материальных потерь и сократить время нештатной ситуации на объекте ТЭК. Рассмотренная в работе модель может быть применена для достижения данных целей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kapitonov I. A., Voloshin V. I., Zhukovskaya I. V., Shulus A. A. Small and medium-sized enterprises as a driver of innovative development of the Russian fuel and energy complex // *International Journal of Energy Economics and Policy*. — 2017. — Vol. 7. — no. 3. — pp. 231–239.
2. International Gas Union (IGU). 2018 World LNG Report // 27th World Gas Conference Edition. — 2018. — 106 p.
3. Nolan D. P. Handbook of fire and explosion protection engineering principles for oil, gas, chemical and related facilities. — 3rd ed. — Norwich, NY: William Andrew, 2010. — 496 p.
4. Dawoud Sam M. Fire protection in the petroleum industry // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition (11–14 November, 2007, Anaheim, California, USA)*. DOI: 10.2118/110521-ms.
5. Гвоздев Е. В., Бутузов С. Ю., Рыженко А. А., Прус Ю. В. Моделирование системы оценки и планирования мероприятий пожарной безопасности для территориально распределённых крупных организаций. — М.: Академия гражданской защиты МЧС России. — 2017. — 162 с.
6. Handscomb C., Sharabura S., Woxholth J. The oil and gas organization of the future. URL: <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/the-oil-and-gas-organization-of-the-future> (дата обращения: 27.10.2018).
7. Kovin R., Kudinov A., Markov NG, Miroshnichenko E. Information technologies in industrial enterprises production assets management // *Key Engineering Materials*. — Trans Tech Publications, 2016. — Vol. 685. — pp. 823–827.
8. Топольский Н. Г., Самарин И. В., Строгонов А. Ю. Модель оценки обеспечения комплексной безопасности в АСУТП с применением диагностики пожарных извещателей для построения автоматизированной системы поддержки управления пожаровзрывобезопасностью // *Пожаровзрывобезопасность*. — 2018. — Т. 27. — № 11. — С. 15–22.
9. Абросимов А. А., Топольский Н. Г., Федоров А. В. Автоматизированные системы пожаровзрывобезопасности нефтеперерабатывающих производств. — М.: МИПБ МВД России, 1999. — 244 с.
10. IRP 15: Snubbing Operations. An Industry Recommended Practice (IRP) for the canadian oil and gas industry. — May 2015. — Vol. 15. — 167 p. URL: <http://www.enform.ca/resources/download-resource.cfm?resourceId=25&type=pdf> (дата обращения: 23.10.2018)
11. Construction Health and Safety Manual: Oil Refineries and Petrochemical Plants. URL: https://www.ihsa.ca/rtf/health_safety_manual/pdfs/locations/Oil_Refineries.pdf (дата обращения: 23.10.2018)
12. How Russia has overhauled its fire protection sector. URL: <http://www.securika-moscow.ru/en-GB/press/news/How-Russia-overhauled-fire-protection-sector.aspx> (дата обращения: 23.10.2018).
13. Брушлинский Н. Н., Глуховенко Ю. М., Коробко В. Б., Соколов С. В., Вагнер П., Лупанов С. А., Клепко Е. А. Пожарные риски. Выпуск 1. — М.: ВНИИПО МЧС России, 2004. — 48 с.
14. Брушлинский Н. Н., Соколов С. В., Клепко Е. А., Белов В. А., Иванова О. В., Попков С. Ю. Основы теории пожарных рисков и её приложения. — М.: Академия ГПС МЧС России, 2012. — 192 с.
15. Самарин И. В., Строгонов А. Ю. Модель оценки пожарной безопасности на объектах топливно-энергетического комплекса с помощью их временных характеристик на графах стратегического планирования в составе автоматизированной системы поддержки управления // *Труды Российского государственного университета нефти и газа им. И. М. Губкина*. — 2018. — № 4 (293). — С. 143–154.
16. Гельфанд И. М. Лекции по линейной алгебре // М.: Добросвет: Издательство «КДУ». — 2006. — 320 с.
17. Прус Ю. В., Колесникова А. Р., Клепко Е. А., Шаповалов В. М., Моделирование структуры и динамики техногенных и пожарных рисков в социотехнических системах // *Технологии техносферной безопасности*. — 2014. — № 4(56). — С. 16.
18. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа: Учебное пособие/Изд. 3-е, доп. // М.: Книжный дом «Либроком». — 2013. — 532 с.
19. Antonsen S., Skarholt K., Ringstad A. J. The role of standardization in safety management — A case study of a major oil & gas company // *Safety Science*. — 2012. — Vol. 50. — No.10. — pp. 2001–2009. DOI: 10.1016/j.ssci.2011.11.001.

20. Самарин И. В., Фомин А. Н. Стратегическое планирование на предприятии: применение метода анализа иерархий для стратегического мониторинга деятельности // Экономика, статистика и информатика. Вестник УМО. — 2014. — № 5. — С. 84–89. DOI: 10.21686/2500–3925–2014–5–84–89.
21. Lee W., Cheon M., Hyun C.-H., Park M. Development of building fire safety system with automatic security firm monitoring capability // Fire Safety Journal. — 2013. — Vol. 58. — pp. 65–73. DOI: 10.1016/j.firesaf.2013.01.003.
22. Самарин И. В., Строгонов А. Ю., Шарова И. Я., Фомин А. Н. Модификация распределения Парето для решения задач автоматизации процессов стратегического планирования и мониторинга // Перспективы науки. — 2018. — № 4 (103). — С. 31–37.
23. Yang J. B., Xu D. L. On the evidential reasoning algorithm for multiple attribute decision analysis under uncertainty // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics — Part A: Systems and Humans. — 2002. — Vol. 32. — no. 3. — pp. 289–304.
24. Milov V. R., Suslov B. A., Kryukov O. V. Intellectual management decision support in gas industry // Automation and Remote Control. — 2011. — Vol. 72, No. 5. — P. 1095–1101. DOI: 10.1134/S0005117911050183.

© Самарин Илья Вадимович (ivs@gubkin.ru), Строгонов Андрей Юрьевич.
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ КЛАСТЕРОВ

OPTIMIZATION TOOLS FOR MODELING PETROCHEMICAL CLUSTERS

**A. Khokhlov
D. Mishutin
P. Borodin**

Summary. The optimization tools for the APS (Advanced Planning & Scheduling) class of problems for modeling petrochemical clusters are considered. It is proposed a proven approach for planning a vertically integrated oil company (VIOC) to solving the development problems this clusters. The optimization modeling of the Nizhnekamsk petrochemical cluster (NNHK) is considered as an example of implementation.

Keywords: development, optimization tools, modeling, petrochemical clusters, integrated planning complex, linear programming, efficiency.

Страгической задачей модернизации экономики страны на основе перехода на инновационный путь социально-экономического развития является, в частности, стимулирование и поддержка процессов формирования на ее территории своеобразных «центров развития». Подобными центрами могут стать кластерные промышленные системы (КПС), рассматриваемые как центры развития [1]: привлечения инвестиций, распространения инноваций, формирования человеческого капитала нового качества, формирования культуры деловых отношений и других адекватных институтов и т.д., ориентированных на решение задач модернизации экономики страны в целом.

Территориально-производственные нефтегазохимические комплексы, имеющиеся в ряде регионов, стали по факту ядром КПС, и как указано в утвержденном Минэнерго РФ «Плане развития газо- и нефтехимии России на период до 2030 года», необходимо «будет сделан упор на развитие нефтегазохимических кластеров, которые помогут комплексно решить задачи по переработке сырья, развитию производственной базы и эффективно сбыта готовой продукции».

Выбор перспективного сценария развития нефтегазохимических кластеров среди возможных вариантов потребует перейти от моделей корреляционно-регрессионных анализа с элементами оптимизации, как, например, в работе [2], к привлечению моделирующих

Хохлов Александр Сергеевич
Д.т.н., профессор, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина
box1563@gmail.com
Мишутин Дмитрий Юрьевич
АО «Хоневелл» (Москва)
Бородин Павел Евгеньевич
АО «Хоневелл» (Москва)

Аннотация. Рассмотрен оптимизационный инструментарий для класса задач APS (Advanced Planning & Scheduling) и их взаимосвязь применительно к моделированию нефтехимических кластеров. Предлагается применить апробированный подход по планированию вертикально интегрированной нефтяной компании (ВИНК) к решению ключевых задач развития подобных кластеров. В качестве примера реализации рассмотрено оптимизационное моделирование Нижнекамского нефтехимического кластера (ННХК).

Ключевые слова: развитие, оптимизационные инструменты, моделирование, нефтехимические кластеры, комплекс интегрированного планирования, линейное программирование, эффективность.

комплексов в виде оптимизационных инструментариев используемых для этого класса предприятий и показавших свою эффективность. Речь идет о комплексах планирования деятельности ВИНК [3], успешно применяемых как на уровне центрального офиса ВИНК, так и в его дочерних предприятиях НПЗ/НХК.

В предлагаемой работе рассматривается подход к применению оптимизационного инструментария к моделированию Нижнекамского нефтехимического кластера (ННХК). В качестве кластерообразующих предприятий, согласно [2], выбрано производственное ядро: ОАО «ТАИФ-НК», АО «Танеко», ПАО «Нижнекамскнефтехим» с рядом химических и нефтехимических заводов, и ПАО «Нижнекамскшина» (НКШ), что и представлено в виде производственной структуры на рис. 1:

Производственная структура ННХК

Структуру ННХК условно можно разделить согласно рис. 1 на три блока:

1. ОАО «ТАИФ-НК», АО «Танеко» — производства непрерывные — НПЗ;
2. ПАО «Нижнекамскнефтехим» с рядом химических и нефтехимических заводов — совокупность в основном непрерывных производств — НХК и 10 малых и средних производителей промышленной продукции.

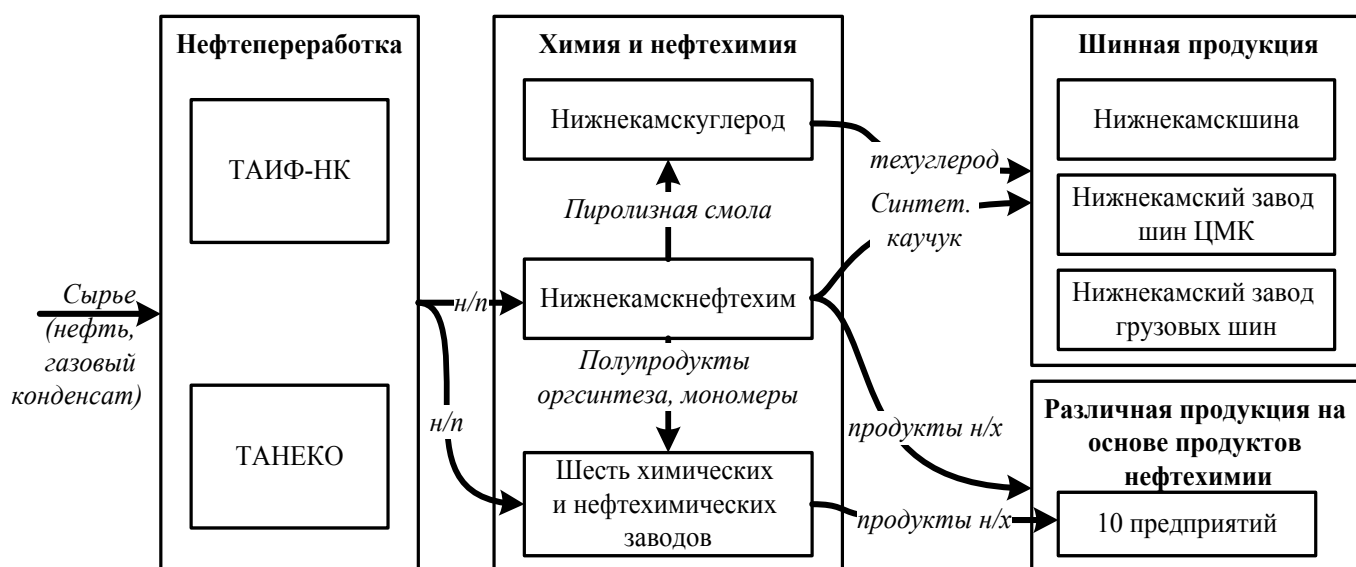


Рис. 1 Производственная структура ННХК

3. ПАО «Нижнекамскшина» — массовое дискретное производство.

Рассмотрим технологические особенности первых двух блоков и, соответственно, способы их моделирования как по отдельности, так и в совокупности с учетом потоковой взаимосвязи, а затем и специфику третьего блока, модель и общий подход к моделированию всего ННХК.

Модели предприятий нефтепереработки, нефтехимии

Производства непрерывного типа вообще, и предприятия нефтепереработки, нефтехимии из ННХК, в частности, характеризуются:

- ◆ крупнотоннажностью и энергоемкостью — суммарный объем первичной переработки нефти/конденсат на двух НПЗ Нижнекамска составляет порядка 24 млн. тонн, что около 9% от ее валового объема в стране;
- ◆ колебаниями свойств сырья (сырая нефть, конденсат) — на два НПЗ Нижнекамска могут поступать различные сорта нефти и конденсат, различающихся плотностью, вязкостью, содержанием серы и т.д., и, соответственно, возникает вопрос какую нефть перерабатывать;
- ◆ разнообразием технологических процессов и режимов и, соответственно, их модернизация с повышением глубины переработки и снижением энергоемкости. К примеру ТАНЕКО планирует выйти на показатели: мощность по сырью в 15 млн.

тонн в год, глубина переработки 95%, выход светлых нефтепродуктов — 90%, темных — 0.;

- ◆ сложной логистикой большого числа потоков и резервуарных парков (сырья, полупродуктов, товарной продукции) — например, стальные резервуары могут иметь емкость до 120~<000 м³;
- ◆ интенсивной динамикой рынков различных нефтепродуктов и многовариантностью производственных планов, обусловленная большим ассортиментом продукции и конкуренцией по сбыту нефти (прямогонного бензина и бензина газового стабильного) и на топливном рынке.

Указанные характеристики порождают многовариантность при подготовке текущих/стратегических планов развития производства (программа работы объектов предприятия на горизонте внутри / более года) и при инвестиционном моделировании [4]. Это предполагает, что при расчете должна быть использована оптимизационная модель производства. Именно критерий оптимизации и позволит определить наилучший вариант среди допустимых.

Основными задачами класса APS (*Advanced Planning & Scheduling*), решаемыми на уровне предприятий двух блоков ННХК являются:

- ◆ оптимизационное производственное моделирование предприятия на горизонте планирования внутри и более года с использованием одно и многоинтервальных (многопериодных) оптимизационных моделей, позволяющих определять весь спектр целевых параметров планирования (объем и номенклатуры сырья и товарных

продуктов, потребление вспомогательных материалов и технологические режимы работы производства, технико-экономические показатели работы предприятия в целом);

- ◆ технико-экономическая оценка процессинговых соглашений по переработке давальческого сырья;
- ◆ оптимизационное инвестиционное моделирование технологических реконструкций и техперевооружений (например, при подготовке Мастер-планов и Техничко-Экономическое Обоснования проектов)[4];
- ◆ проведение различных расчетов технологического характера (изменение технологических режимов, структуры отбора полупродуктов, замена катализаторов и т.п.);
- ◆ решение задач оптимального выбора перерабатываемых нефтей в зависимости от состояния рынка нефти и нефтепродуктов и технологической конфигурации первых двух блоков ННХК.

Реализация этого круга задач для предприятий двух блоков ННХК, предполагает наличие оптимизационных моделей, где необходимо учитывать:

- ◆ Качество поступающих нефтей, промежуточных потоков с технологических установок, товарных нефтепродуктов (т.е. увязать качество и технологию компаундирования на производстве всех потоков от нефти до нефтепродуктов);
- ◆ Условия вход-выход технологических установок для различных видов сырья и режимов работы и сезонные нормы потребления вспомогательных материалов, энергии в диапазоне работы установки;
- ◆ Ограничения, отражающие технологию переработки, мощность и график ремонтов установок на горизонте планирования, запасы и внешнюю рыночную ситуацию. К ним относятся ресурсные, ассортиментные, производственные, спецификационные ограничения и баланс потоков (объемный и весовой);
- ◆ Экономику переработки, включая стоимость всей номенклатуры потребляемого сырья, вспомогательных материалов, энергии и цен на товарные нефтепродукты.

В качестве критерия оптимизации используется маргинальная прибыль (товарный выпуск продукции НПЗ минус затраты на сырье, минус условно-переменные производственные затраты). Для получения значения прибыли или стоимости процессинга необходимо из маргинальной прибыли вычесть условно-постоянные затраты.

Формально, исходя из предлагаемой постановки, рассматриваемая задача моделирования работы про-

изводства представлена в виде оптимизационной модели[5, 6]:

$$F = \sum_{j=1}^m c_j x_j - \sum_{j=m+1}^n d_j x_j \rightarrow \max, \quad (1.1)$$

$$\underline{b}_i \leq \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j + \sum_{j=n+1}^p a_{ij}(x_j) x_j \leq \bar{b}_i, i = 1, \dots, k, \quad (1.2)$$

$$x_j \geq 0, j = 1, \dots, p.$$

Здесь:

- ◆ c_j — цена продажи единицы $x_j, j = 1, \dots, m$ — переменные продажи потоков модели;
- ◆ d_j — стоимость покупки единицы $x_j, j = m+1, \dots, n$ — переменные покупки потоков модели;
- ◆ $x_j, j = n+1, \dots, p$ — переменные внутренних потоков модели, нагрузки установок, качество смесей и т.д.;
- ◆ a_{ij} — постоянные коэффициенты матрицы ограничений;
- ◆ $a_{ij}(x)$ — переменные коэффициенты матрицы ограничений, зависящие от одной или нескольких x_j ;
- ◆ $\underline{b}_i, \bar{b}_i$ — левые и правые части ограничений, $i = 1, \dots, k$.
- ◆ F — критерием решения данной задачи является максимизация маргинальной прибыли.

Непосредственно из условий (1.2) следует, что модель оптимизационного производственного планирования НПЗ/НХК представляет собой нелинейную задачу математического программирования большой размерности (несколько тысяч переменных). Природа нелинейности задачи планирования производства скрыта в сложных зависимостях параметров производства от значения переменных, например: материальные балансы установок, изменяются в зависимости от качества поступающего сырья; расход потребления энергоресурсов и вспомогательных материалов зависит от загрузки установок и др. Учет условий нелинейности от качества сырья остается актуальным и при выборе корзины нефтей для переработки на перспективу, т.е. при стратегическом и инвестиционном моделировании [4].

Структурно модель НПЗ/НХК состоит из подмоделей: установок, объединения (смешения) потоков в соответствии со схемой трубопроводов и смешения товарных нефтепродуктов, и исходные данные представлены для каждой подмоделей. Результаты решения анализируются для общей модели завода и подмоделей.

На предприятиях ОАО «ТАИФ-НК», АО «Танеко» указанные задачи реализованы с использованием системы

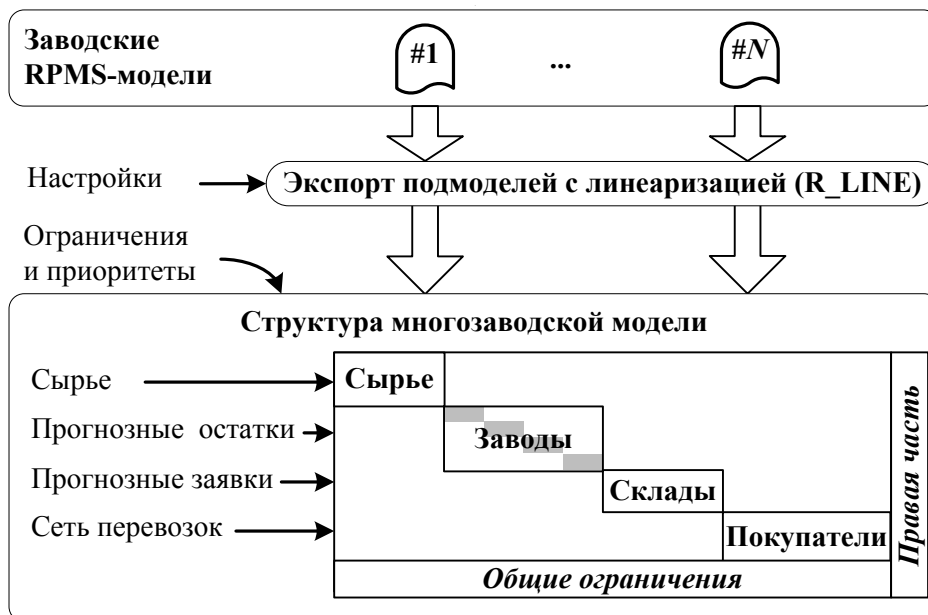


Рис. 2. Структура многозаводской RPMS-модели

RPMS (Refinery and Petrochemical Modeling System, текущий релиз R510, разработки корпорации Honeywell, (<https://www.honeywellprocess.com>)), на ПАО «Нижнекамскнефтехим» с рядом химических и нефтехимических заводов применяются более простые модели в среде Microsoft Excel.

Автоматизированное планирование предприятиями типа НПЗ/НХК в среде RPMS позволяет по имеющимся оценкам получить дополнительный операционный доход более 27 млн. долл. США в год для НПЗ с мощностью 17 млн. т в год по первичной переработке нефти [7].

Система RPMS наряду с построением одно и многопериодных оптимизационных моделей, позволяет создавать и многозаводские модели с учетом первичной логистики с общим критерием оптимизации в виде структуры рис. 2.

Создав, например, RPMS-модель ПАО «Нижнекамскнефтехим» с рядом химических и нефтехимических заводов станет возможным сгенерировать подобную многозаводскую модель на основе RPMS-моделей заводов с разным уровнем агрегирования, и моделировать различные аспекты работы двух первых блоков ННХК. При этом 10 малых и средних производителей промышленной продукции предстанут в многозаводской модели как отдельные вектора вариантов выпуска конечной продукции и увязанные с рынками ее сбыта.

Имеется специализированная апробированная система F_PRESS, позволяющая генерировать много-

заводские модели в виде структуры рис. 2 на основе RPMS-моделей заводов с разным уровнем агрегирования, учитывая их взаимосвязи, и формируя общий критерий оптимизации. Детали по системе F_PRESS и необходимые при этом современные средства интеграции данных и генерации модели приведены в [3].

После описания подхода к построению многозаводской модели двух первых блоков ННХК, рассмотрим способ построения оптимизационной модели НКШ, функционирующую на предприятии более 20 лет[8].

Модель НКШ- дискретное производство массового характера

Рассмотрим кратко особенности технологии шинного производства и структур данных для моделирования. Укрупненная технологическая схема производства шин представлена на рис 3.

В цехе подготовки осуществляются технологические операции, необходимые для приведения всех видов сырья (производстве шин используется до 100 видов сырья) к форме, в которой они могут быть использованы при производстве шин, такие как разгрузка транспортных средств, освобождение от упаковки и т.п.

Из цеха подготовки основные виды сырья — каучуки, химикаты, технический углерод (в основном продукция блока 2 ННХК рис. 1) — поступают в подготовительное производство, в котором, в технологическом процессе 2-х или 3-х стадийного смешения, производится вся но-

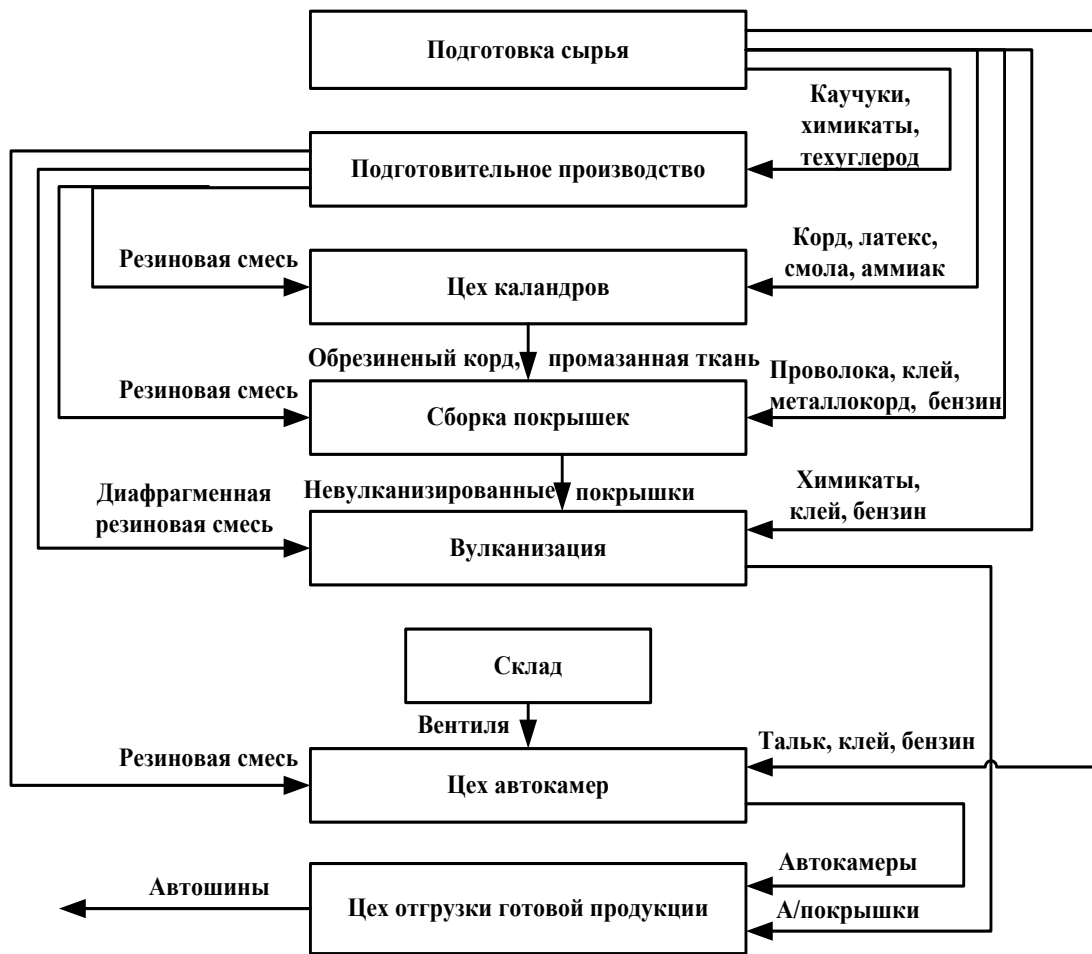


Рис. 3. Технологическая структурная схема производства шин

менклатура резиновых смесей, необходимых для производства всех типоразмеров автопокрышек, автокамер и др. запланированных к производству резинотехнических изделий.

Все подготовленные таким образом необходимые для производства автопокрышек компоненты поступают в сборочное производство, где на специализированных сборочных технологических линиях конвейерного типа осуществляется сборка невулканизированных покрышек, поступающих в дальнейшем на вулканизацию.

Вулканизация осуществляется в технологических аппаратах — вулканизаторах периодического типа, при относительно высоких температуре и давлении, в результате чего получают готовые автопокрышки.

Наконец, автопокрышки комплектуются автокамерами и отправляются через цех отгрузки готовой продукции потребителям.

Для моделирования производства шин на требуемом уровне агрегирования (детальности) и в соответствии с регламентом производства (где задан ритм) необходимо решить две основные проблемы:

- ♦ сбор, обработка и структурирование большого объема разнородных и одновременно взаимосвязанных технико-коммерческих исходных данных многозаводского объединения, которые должны быть учтены в расчете, и представлены в плане;
- ♦ организация взаимодействия большого числа специалистов из различных служб в управлении предприятием, и вовлеченных в бизнес-процессы подготовки, принятия и реализации решений по плану производства, закупок и поставок.

В связи указанным уровнем сложности управленческой задачи потребовалось разработать автоматизированный комплекс планирования шинного объединения SOFTYRE. Задача была решена на основе создания и внедрения трех основных компонент методологического,

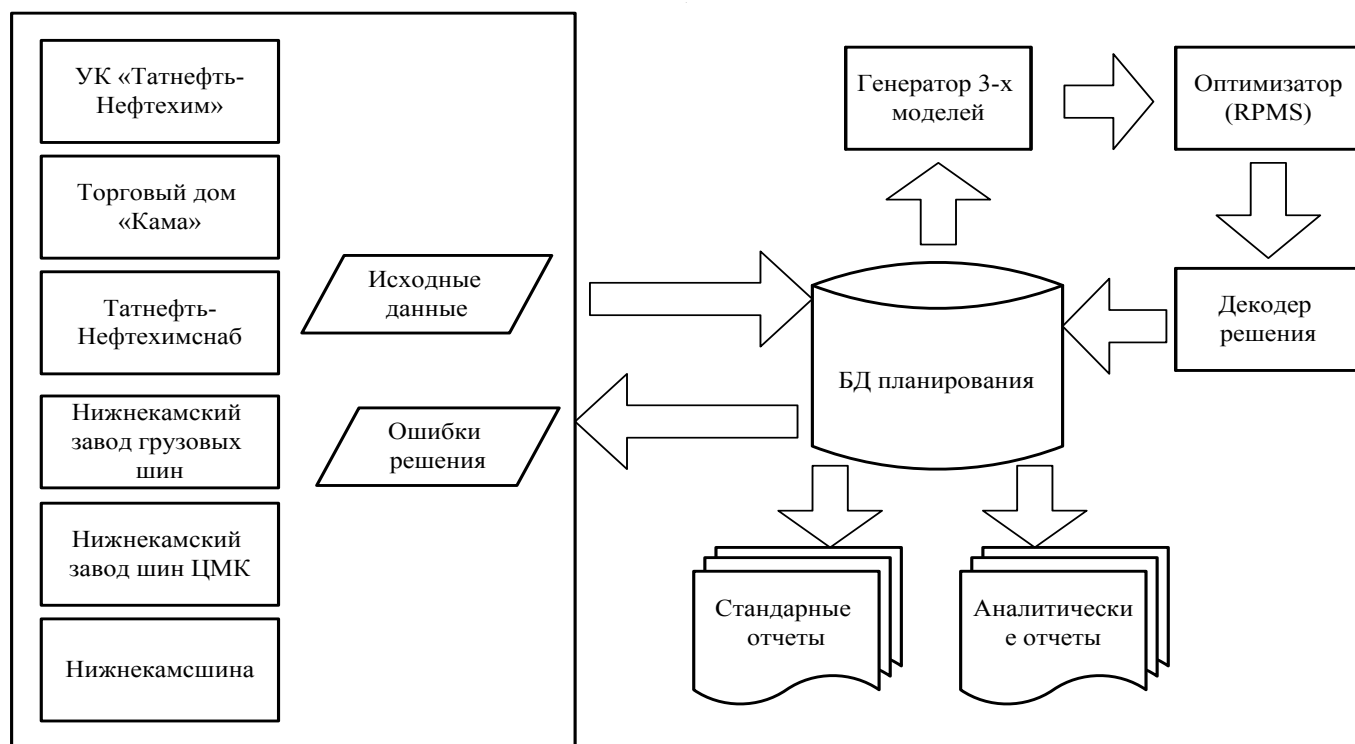


Рис. 3. Реализация оптимизационного моделирования НКШ.

информационного, математического и программного обеспечения:

- ♦ методология и подходы к построению структур данных большого объема, учитывающих специфический характер технологических ограничений предметной области;
- ♦ математической модели оптимизационного планирования шинного объединения и программных средств ее реализации;
- ♦ многопользовательской подсистемы сбора, контроля и диагностики исходных данных.

Реализация программного комплекса оптимизационного планирования шинного производственного объединения для автоматизации процедур формирования структур данных, ведения исходных данных, формирования и актуализации модели планирования, получения решения и его анализа, основано на технологии R_SAND³ и включает следующий набор основных элементов (см. рис. 3):

Оптимизационная модель НКШ имеет вид подобный структуре (1.1–1.2), где критерий: $F = S - P - L - Z \rightarrow \max$,

³ R_SAND — технология построения оптимизационных систем планирования, позволяющих в автоматизированном режиме генерировать структурно-поточковые модели планирования деятельности компании и ее дочерних обществ в формате RPMS.

то есть разность плановой выручки от реализации произведенной продукции S , затрат на необходимые для производства закупки сырья, материалов, комплектующих изделий и энергоносителей P , затрат на сдельную оплату труда L и затрат, связанных с созданием и хранением запасов Z . Критерий F является линейной функцией переменных задачи — объемов закупок сырья, производства изделий и продаж соответствующих товарных позиций.

Опыт длительной эксплуатации программного комплекса SOFTYRE показал свою высокую эффективность, т.к. позволил получить целый ряд преимуществ за счет автоматизации построения модели планирования и интеграции комплекса в существующую программную и организационную среду шинного объединения.

В результате управляющая компания ПАО «Нижнекамскшина» решает широкий спектр задач планирования на различные горизонты планирования от декады и далее, а также и проводит инвестиционное моделирование, что является исключительно важным конкурентным преимуществом при меняющейся рыночной конъюнктуре.

Способы моделирования производственной структуры ННХК

Представленные выше три оптимизационных инструмента: RPMS, F_PRESS, SOFTYRE в совокупности позволяют моделировать ННХК по следующей схеме:

0. Внедрение системы RPMS в ПАО «Нижекамскнефтехим», что позволит иметь RPMS-модель нефтехимического комплекса и наряду с возможностью проведения текущего планирования его деятельности внутри года, соответственно, будет подготовлена группа пользователей для проведения моделирования и актуализации RPMS-модели на требуемый горизонт планирования.

1. Наличие трех RPMS-моделей предприятий ОАО «ТАИФ-НК», АО «Танеко», ПАО «Нижекамскнефтехим» и агрегированное представление балансов производства в виде векторов вход-выход ряда химических и нефтехимических заводов и малых / средних производителей промышленной продукции позволит сгенерировать F_PRESS — модель с общей системой ограничений и выбранным критерием оптимизации.

Моделирование средствами F_PRESS различных сценарных условий для этих двух блоков позволит получить семейство решений, например, с экономической оценкой их эффективности.

2. Ряд выделенных решений с шага 1 можно использовать как входные данные системы SOFTYRE для последующего моделирования производства шинной продукции.

3. Анализ результатов решений с шага 1 и 2 дадут представление об эффективности принятых сценариев развития, что позволит завершить процесс моделирования или скорректировать сценарные условия и вернуться к шагу 1 и/или 2.

Непосредственно из представленной схемы моделирования с использованием трех оптимизационных инструментов следует, что возможны различные ее модификации, связанные с последовательностью модели-

рования, уровнем агрегирования моделей производств и выбранным критерием оптимизации.

Отметим по поводу критерия оптимизации, что для измерения и анализа технико — экономического уровня производства в отраслях народного хозяйства отдается предпочтение относительным показателями [2], таким как фондоотдача, рентабельность и т.п. Введение в задачу линейного программирования критерия в виде относительного показателя, переводит ее в класс дробно-линейной оптимизации, что при существующем прогрессе математического программирования не является вычислительной проблемой. Оптимизационный инструментарий должен будет расширен в части учета подхода, реализующего метод анализа среды функционирования (АСФ — англ. DEA- Data Envelopment Analysis) [9].

Заключение

1. Предлагаемый оптимизационный инструментарий в виде трех систем для моделирования нефтехимических кластеров прошел длительную апробацию в ВИНК[3,8] и совершенствуется российской командой в ходе его эксплуатации в связи с возникновением новых аспектов для оптимизации на производствах НПЗ/НХК и прогресса в ИТ.

2. На предприятиях ОАО «ТАИФ-НК», ПАО «Нижекамскшина», АО «Танеко» из ядра ННХК длительно эксплуатируются две из трех систем, что указывает на наличие команд подготовленных пользователей для эффективной эксплуатации этих систем, и обеспечено их сопровождение со стороны консультантов и разработчиков.

3. Моделирование нефтехимических кластеров указанными средствами может проводиться только подготовленной командой пользователей внутри некой управляющей структуры, которой бы гарантировали доступ к производственной информации и моделям с предприятий входящих в кластер. Например, для ННХК такой управляющей структурой мог бы быть «ИННОКАМ».

ЛИТЕРАТУРА

1. Марков Л. С. Теоретико-методологические основы кластерного подхода. Новосибирск: ИЭОПП СО РАН, 2015, — 300с.
2. Фомин Н. Ю. Кластерная стратегия инновационного и экономического развития народнохозяйственного комплекса России / Н. Ю. Фомин, А. Н. Дырдонова // Инновационные и экономические особенности укрепления государственности России в XXI веке / под ред. Адамова Н. А. — М.: ЭКЦ «Профессор», 2016. — С. 43–73
3. Хохлов А.С., Баулин Е. С., Коннов А. И., Мишутин Д. Ю. Комплекс интегрированного планирования деятельности ВИНК// Автоматизация в промышленности, Москва, 2018, № 12. — с. 15–26.
4. Шишорин Ю.Р., Цодиков Ю. М., Мостовой Н. В., Аксенова Т. С. Оптимизационное моделирование при перспективном планировании предприятий нефтепереработки и нефтехимии// Автоматизация в промышленности, Москва, 2018, № 12. — с. 42–47.
5. Дудников Е.Е., Цодиков Ю. М. Типовые задачи оперативного управления непрерывным производством. М.: Энергия, 1979. — 272 с.

6. Хохлов А.С., Цодиков Ю. М., Баулин Е. С., Оптимизационные модели НПЗ/НХК и средства их поддержки. Учебное пособие. — М.: Издательский центр РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, 2015. — 91 с.
7. Кувыкин В. И. Организация автоматизированных систем планирования и материального баланса // Автоматизация в промышленности. 2014. № 8. С. 29–33.
8. Артемьев С. Б., Бородин П. Е., Курьянова Е. В. Опыт автоматизации планирования шинного производства//Автоматизация в промышленности. 2015. № 4. С. 41–46.
9. Кривоножко В. Е., Лычев А. В. Моделирование и анализ деятельности сложных систем. — М.: ЛЕНАНД, 2013. — 256 с.

© Хохлов Александр Сергеевич (box1563@gmail.com), Мишутин Дмитрий Юрьевич.

НАШИ АВТОРЫ OUR AUTHORS

Barashkin R. — Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)
barashkin.r@gubkin.ru

Borodin P. — Honeywell JSC (Moscow)

Dvoryankin N. — National Research Nuclear University "MEPI"
nik.dvrn@gmail.com

Dvoryankin S. — Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)
s_dvrn@mail.ru

Fomin A. — Military Academy RVSN them. Peter the Great (Moscow)
sad116@mail.ru

Gavshin M. — Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)
gavshin@gubkin.ru

Gostev S. — Concern "Granit" (Moscow)

Grinyaev S. — Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)

Grishenin R. — Foundation to support public diplomacy named after AM. Gorchakova (Moscow)

Itkin V. — Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)
itkin.v@gubkin.ru

Ivanov M. — Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)
fkb-info@gubkin.ru

Kalashnikov P. — Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)

Karmanov A. — Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)
abkar2007@yandex.ru

Kashirin D. — Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)

Khokhlov A. — Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)
box1563@gmail.com

Khrabrov I. — Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)
khrabrov@gubkin.ru

Kochueva O. — Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)
olgakoch@mail.ru

Krotov A. — Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)
a.krotov@sovtigaz.ru

Kryuchkov A. — Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)
kruchkov.a@gubkin.ru

Medvedev D. — Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)
Medvedev.d@gubkin.ru

Mishutin D. — Honeywell JSC (Moscow)

Novikov A. — Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)
cranon@yandex.ru

Osetinskiy N. — Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)
avt1948@mail.ru

Pankratenko I. — Center for Strategic Estimates and Forecasts (Moscow)

Popadko V. — Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)
pve@gubkin.ru

Popova Ya. — Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)
yanina.zykova@yandex.ru

Pravikov D. — Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)
dip@gubkin.pro

Prus Yu. — Russian State Social University

Pryadko S. — Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)
sergeypryadko@gmail.com

Ryazanova A. — VINITI RAS (Moscow)

Samarin I. — Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)
ivs@gubkin.ru

Scherbakov A. — Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)

Strogonov A. — Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)

Yermolkin O. — Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)
ove@gubkin.ru

Yuzhanin V. — Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)

Zelenoritskaya — National Research Nuclear University "MEPI"

Zhedyayevskiy D. — Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)

Требования к оформлению статей, направляемых для публикации в журнале



Для публикации научных работ в выпусках серий научно-практического журнала «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики» принимаются статьи на русском языке. Статья должна соответствовать научным требованиям и общему направлению серии журнала, быть интересной достаточно широкому кругу российской и зарубежной научной общественности.

Материал, предлагаемый для публикации, должен быть оригинальным, не опубликованным ранее в других печатных изданиях, написан в контексте современной научной литературы, и содержать очевидный элемент создания нового знания. Представленные статьи проходят проверку в программе «Антиплагиат».

За точность воспроизведения дат, имен, цитат, формул, цифр несет ответственность автор.

Редакционная коллегия оставляет за собой право на редактирование статей без изменения научного содержания авторского варианта.

Научно-практический журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики» проводит независимое (внутреннее) рецензирование.

Правила оформления текста.

- ◆ Текст статьи набирается через 1,5 интервала в текстовом редакторе Word для Windows с расширением “.doc”, или “.rtf”, шрифт 14 Times New Roman.
- ◆ Перед заглавием статьи указывается шифр согласно универсальной десятичной классификации (УДК).
- ◆ Рисунки и таблицы в статью не вставляются, а даются отдельными файлами.
- ◆ Единицы измерения в статье следует выражать в Международной системе единиц (СИ).
- ◆ Все таблицы в тексте должны иметь названия и сквозную нумерацию. Сокращения слов в таблицах не допускаются.
- ◆ Литературные источники, использованные в статье, должны быть представлены общим списком в ее конце. Ссылки на упомянутую литературу в тексте обязательны и даются в квадратных скобках. Нумерация источников идет в последовательности упоминания в тексте.
- ◆ Литература составляется в соответствии с ГОСТ 7.1-2003.
- ◆ Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Правила написания математических формул.

- ◆ В статье следует приводить лишь самые главные, итоговые формулы.
- ◆ Математические формулы нужно набирать, точно размещая знаки, цифры, буквы.
- ◆ Все использованные в формуле символы следует расшифровывать.

Правила оформления графики.

- ◆ Растровые форматы: рисунки и фотографии, сканируемые или подготовленные в Photoshop, Paintbrush, Corel Photopaint, должны иметь разрешение не менее 300 dpi, формата TIF, без LZW уплотнения, CMYK.
- ◆ Векторные форматы: рисунки, выполненные в программе CorelDraw 5.0-11.0, должны иметь толщину линий не менее 0,2 мм, текст в них может быть набран шрифтом Times New Roman или Arial. Не рекомендуется конвертировать графику из CorelDraw в растровые форматы. Встроенные - 300 dpi, формата TIF, без LZW уплотнения, CMYK.

По вопросам публикации следует обращаться к шеф-редактору научно-практического журнала «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики» (e-mail: redaktor@nauteh.ru).

