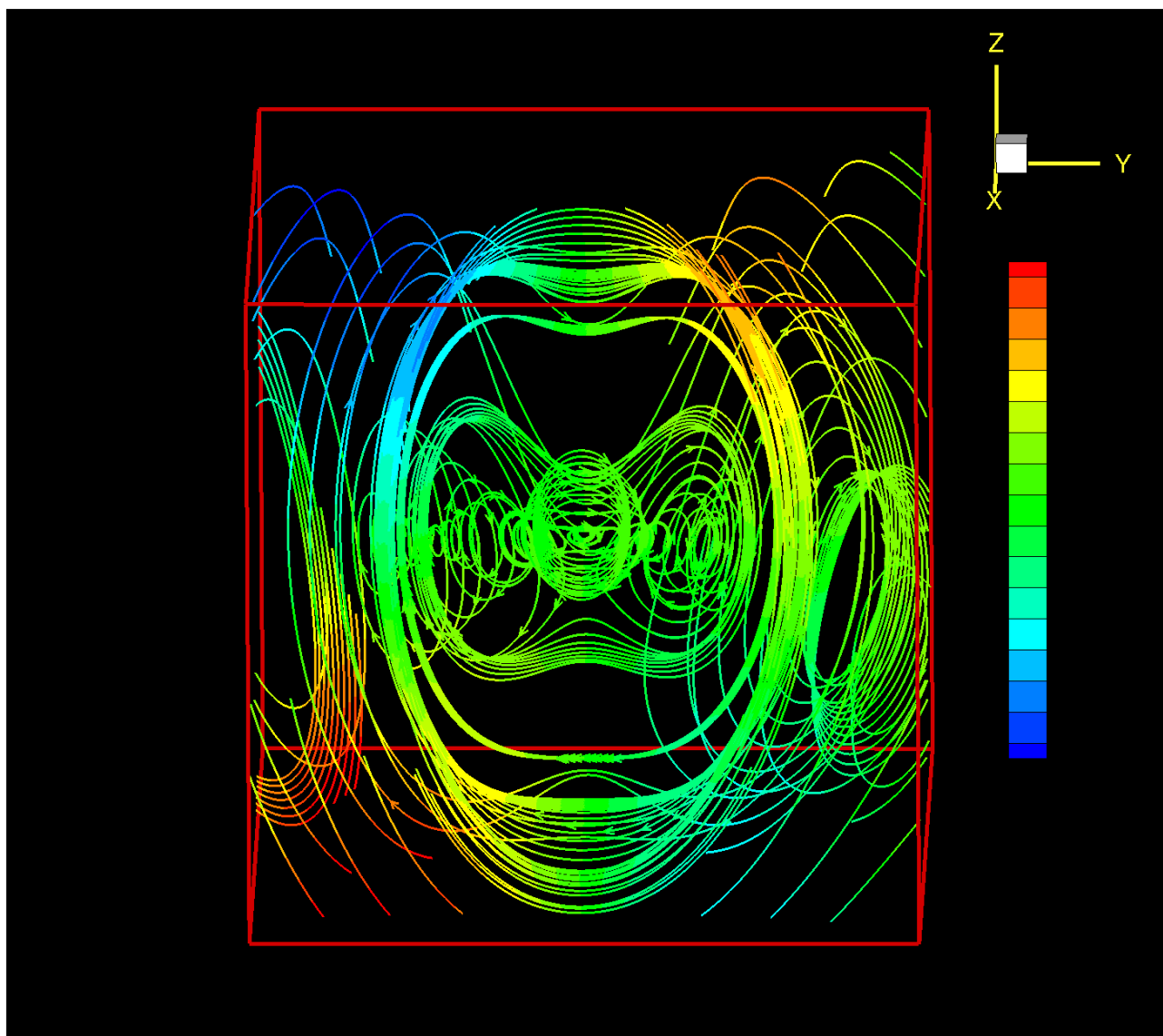




Вестник кибернетики

Международный журнал

Proceedings in Cybernetics

International Journal

№ 1 (29)

12+

2018

**БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
ХАНТЫ-МАНСКИЙСКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА — ЮГРЫ
«СУРГУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Вестник кибернетики

Международный журнал

Proceedings in Cybernetics

International Journal

№ 1 (29)

Сургут
2018

Учредитель и издатель

бюджетное учреждение высшего образования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры
«Сургутский государственный университет»

Главный редактор

Бетелин Владимир Борисович, академик РАН, д. ф.-м. н., профессор, Москва

Заместитель главного редактора

Галкин Валерий Алексеевич, д. ф.-м. н., профессор, Сургут

Ответственный секретарь

Гавриленко Тарас Владимирович, к. т. н., Сургут

Члены редакционной коллегии:

Панченко Владислав Яковлевич, академик РАН, д. ф.-м. н., профессор, Москва
Семёнов Алексей Львович, академик РАН и РАО, д. ф.-м. н., профессор, Москва
Савин Геннадий Иванович, академик РАН, д. ф.-м. н., профессор, Москва
Сойфер Виктор Александрович, академик РАН, д. т. н., профессор, Самара
Чаплыгин Юрий Александрович, академик РАН, д. т. н., профессор, Москва
Чубариков Владимир Николаевич, д. ф.-м. н., профессор, Москва
Смирнов Николай Николаевич, д. ф.-м. н., профессор, Москва
Губайдуллин Амир Анварович, д. ф.-м. н., профессор, Тюмень
Тишкин Владимир Федорович, член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н., профессор, Москва
Якобовский Михаил Владимирович, член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н., профессор, Москва
Цибульский Владимир Романович, д. т. н., профессор, Тюмень
Шагалиев Рашит Мирзагалиевич, д. ф.-м. н., Саратов
Острейковский Владислав Алексеевич, д. т. н., профессор, Сургут
Пападопулос Атанас, профессор, Страсбург, Франция
Де Роза Феличе, профессор, Болонья, Италия

Ответственный редактор

Чалова Анна Петровна, к. филол. н.

Редактор

Егоров Александр Алексеевич, к. т. н.

Технический редактор

Медведкова Ольга Николаевна

Переводчик

Бенская Марина Олеговна

Рисунок на обложке:

Визуализация магнитогидродинамических расчетов для точного решения внутри сферы
© В. А. Галкин, А. В. Гореликов

Решением Высшей аттестационной комиссии с 29 мая 2017 года журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» по следующим группам научных специальностей: 01.01.00 – математика, 01.02.00 – механика, 05.01.00 – инженерная геометрия и компьютерная графика, 05.13.00 – информатика, вычислительная техника и управление, 05.27.00 – электроника.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации средства массовой информации
ЭЛ № ФС 77–63407 от 16.10.2015.

Издается с 2002 года. Выпускается 4 раза в год.

Адрес редакции:

БУ ВО «Сургутский государственный университет»,
628412, Россия, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, г. Сургут, пр. Ленина, 1.
Тел.: (3462) 76-29-88, факс: (3462) 76-29-29, e-mail: jc@surgu.ru. Сайт: surgu.ru

Founder and Publisher

Surgut State University

Chief Editor

Prof. Vladimir B. Betelin, member of the Russian Academy of Sciences (RAS),
Doctor of Science (Phys&Math), Moscow

Vice Chief Editor

Prof. Valerii A. Galkin, Doctor of Science (Phys&Math), Surgut

Executive Editor

Taras V. Gavrilenko, PhD (Engineering), Surgut

Editorial Board:

Prof. Vladislav Ya. Panchenko, member of the Russian Academy of Sciences (RAS),
Doctor of Science (Phys&Math), Moscow

Prof. Alexey L. Semyonov, member of the Russian Academy of Sciences (RAS) and the Russian Academy of Education, Doctor of Science (Phys&Math), Moscow

Prof. Gennady I. Savin, member of the Russian Academy of Sciences (RAS),
Doctor of Science (Phys&Math), Moscow

Prof. Viktor A. Soifer, Doctor of Science (Engineering), member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Samara

Prof. Yuri A. Chaplygin, Doctor of Science (Engineering), member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Moscow

Prof. Vladimir N. Chubarikov, Doctor of Science (Phys&Math), Moscow

Prof. Nikolay N. Smirnov, Doctor of Science (Phys&Math), Moscow

Prof. Amir A. Gubaidullin, Doctor of Science (Phys&Math), Tyumen

Prof. Vladimir F. Tishkin, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (RAS),
Doctor of Science (Phys&Math), Moscow

Prof. Mikhail V. Iakobovskii, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (RAS),
Doctor of Science (Phys&Math), Moscow

Prof. Vladimir R. Tsibulsky, Doctor of Science (Engineering), Tyumen

Prof. Rashit M. Shagaliyev, Doctor of Science (Phys&Math), Sarov

Prof. Vladislav A. Ostreikovskiy, Doctor of Science (Engineering), Surgut

Prof. Athanase Papadopoulos, Strasbourg, France

Prof. Felice De Rosa, Bologna, Italy

Managing Editor

Anna P. Chalova, PhD (Linguistics)

Editor

Alexander A. Egorov, PhD (Engineering)

Technical Editor

Olga N. Medvedkova

Translator

Marina O. Benskaya

Cover Image:

A visualization of magnetohydrodynamic analysis used to find an exact solution within a sphere

© V. A. Galkin, A. B. Gorelikov

Since 29.05.2017 the journal is included in the List of Leading Peer-Reviewed Scientific Journals

Published in the RF by the Higher Attestation Commission,

which publishes main scientific results of doctor's and candidate's theses, on the following subject groups: 01.01.00 – Mathematics; 01.02.00 – Mechanics; 05.01.00 – Engineering Geometry and Computer Graphics; 05.13.00 – Computer Science, Computing, and Control; 05.27.00 – Electronics.

The journal is registered with the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media.

Mass media registration certificate EL No. FS 77–63407 dated on 16.10.2015.

Published since 2002. 4 issues per year.

Editorial Board Address:

Surgut State University, Russia 628412, Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Ugra, Surgut, Lenin pr., 1

Tel.: +7(3462) 76-2988, fax: +7 (3462) 76-2929, e-mail: jc@surgu.ru. Web: surgu.ru

© Surgut State University

© Authors

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Афанаскин И. В., Вольпин С. Г.,**Королев А. В., Ломакина О. В., Ялов П. В.**

Суперэлементная модель трехфазной фильтрации нефти, газа и воды с учетом работы добывающих скважин при забойном (и пластовом) давлении ниже давления насыщения нефти газом 9

Галкин В. А.

Моделирование седиментации в неоднородном потоке с учетом удаления выделившейся фазы из области течения 20

Еськов В. В., Еськов В. М., Вохмина Ю. В.

Гипотеза Н. А. Бернштейна и статистическая неустойчивость выборок параметров треморограмм 33

Мусакаев Э. Н., Родионов С. П., Косяков В. П.

Задача структурно-параметрической идентификации систем при моделировании двухфазной фильтрации в пористых средах 39

Юдин Е. Б.

Случайные графы предпочтительного связывания с добавлением полных подграфов 50

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Агафонов Н. А., Гиацинтов А. М., Родителей А. В.

Методы визуализации погодных явлений в имитационных системах 61

Аптюкова Г. А., Никифоров А. В., Гавриленко Т. В.

Проблема идентификации фальсификации цифрового изображения 66

Бушмелева К. И., Бажаев А. Б.,**Увайсов С. У., Бушмелев П. Е.**

Автоматизированная система расчета отбраковочных допусков на электро-радиоэлементы электронных средств 72

Бушмелева К. И., Васильчук А. Н.

Аспекты машинного обучения в крупной компании нефтегазовой отрасли ... 82

Денчик Ю. М., Иванова Е. В., Иванов Д. М., Иванов М. Н.,**Рыжаков В. В., Сальников В. Г., Ковалева Н. А.,****Кислицин Е. Ю., Ковалёв А. Ю., Антипин Д. П.**

Проблемы инновационного развития электрических сетей месторождений нефти как рецепторов на базе концепции SMART Grind 86

Ельмендеев А. П., Микшина В. С., Вирстюк А. Ю. 102

Выбор методики расчета распределения давления движения газожидкостной смеси в вертикальных трубах	
Мальцев А. В., Тимохин П. Ю., Трушин А. М.	
Методы распределенной визуализации виртуальных объектов с использованием мультитекстурирования на основе смешивания материалов	110
Микшина В. С., Назина Н. Б., Денисова Л. А.	
Анализ временных рядов поведения сложных динамических систем	116
Новиков В. П., Цибульский В. Р.	
Разработка классификатора траекторий регионального развития на основе ресурсной модели	122
Старков С. О., Лавренков Ю. Н.	
Нейросетевая система обработки сигналов с взаимозависимой адаптацией компонент для повышения помехоустойчивости систем радиосвязи	131
Памяти профессора В. Л. Якушева	
	143

CONTENTS

PHYSICS AND MATHEMATICS

Afanaskin I. V., Volpin S. G.,

Korolev A. V., Lomakina O. V., Yalov P. V.

Super-element model of three-phase filtration of oil, gas and water taking into account performance of producing wells at bottomhole (and reservoir) pressure below bubble point pressure 9

Galkin V. A.

Sedimentation modeling in non-uniform flow with regard for removing of precipitated phase from flow range 20

Eskov V. V., Eskov V. M., Vokhmina Yu. V.

N. A. Bernstein hypothesis and statistical samplings instability of tremorogram's parameters 33

Musakaev E. N., Rodionov S. P., Kosyakov V. P.

Problem of structure and parameter identification at simulation of two-phase filtration in porous media 39

Yudin E. B.

Preferential attachment random graphs with complete subgraphs increment 50

ENGINEERING

Agafonov N. A., Giatsintov A. M., Roditelev A. V.

Visualization methods of weather events in simulation systems 61

Aptyukova G. A., Nikiforov A. V., Gavrilenko T. V.

Identification problem of digital image adulteration 66

Bushmeleva K. I., Bazhaev A. B.,

Uvaisov S. U., Bushmelev P. E.

Automated calculation of tolerances screening for electronic components of electronic means 72

Bushmeleva K. I., Vasilchuk A. N.

Machine learning aspects in a major company of oil and gas industry 82

Denchik Yu. M., Ivanova E. V., Ivanov D. M., Ivanov M. N.,

Ryzhakov V. V., Salnikov V. G., Kovaleva N. A.,

Kislitsin E. Yu., Kovalev A. Yu., Antipin D. P.

Innovative development problems of electric network of oil deposits as receptors on basis of the SMART Grid concept..... 86

Elmendeev A. P., Mikshina V. S., Virstyuk A. Yu.	
Choice of calculation methods for pressure distribution	102
Maltsev A. V., P. Timokhin Yu., Trushin A. M.	
Methods for distributed visualization of virtual objects using multitexturing based on material blending	110
Mikshina V. S., Nazina N. B., Denisova L. A.	
Time series analysis of complex dynamic systems behavior	116
Novikov V. P., Tsibulsky V. R.	
Working of trajectories classifier of regional development based on resource model	122
Starkov S. O., Lavrenkov Yu. N.	
Neural signal processing systems with interdependent adaptation of components for noise immunity enhancement of radio communication system	131
In memory of professor V. L. Yakushev	143

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 622.276:519.87

СУПЕРЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ТРЕХФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ НЕФТИ, ГАЗА И ВОДЫ С УЧЕТОМ РАБОТЫ ДОБЫВАЮЩИХ СКВАЖИН ПРИ ЗАБОЙНОМ (И ПЛАСТОВОМ) ДАВЛЕНИИ НИЖЕ ДАВЛЕНИЯ НАСЫЩЕНИЯ НЕФТИ ГАЗОМ

И. В. Афанаскин, С. Г. Вольпин, А. В. Королев, О. В. Ломакина, П. В. Ялов
Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук, ivan@afanaskin.ru

Рассматриваются вопросы математического моделирования трехфазной фильтрации несмешивающихся флюидов – нефти, газа и воды. Системе дифференциальных уравнений сохранения ставится в соответствие полностью явная численная схема на суперэлементной расчетной сетке. Предлагается методика учета работы добывающих скважин при забойном (и пластовом) давлении ниже давления насыщения в рамках суперэлементной модели (при больших размерах ячеек и существенном изменении давления внутри ячейки). Получены удовлетворительные результаты при сопоставительном тестировании с коммерческим программным продуктом.

Ключевые слова: фильтрационная модель, трехфазная фильтрация, суперэлементная модель, модель Маскета – Мереса.

SUPER-ELEMENT MODEL OF THREE-PHASE FILTRATION OF OIL, GAS AND WATER TAKING INTO ACCOUNT PERFORMANCE OF PRODUCING WELLS AT BOTTOMHOLE (AND RESERVOIR) PRESSURE BELOW BUBBLE POINT PRESSURE

I. V. Afanaskin, S. G. Volpin, A. V. Korolev, O. V. Lomakina, P. V. Yalov
System Research Institute, Russian Academy of Sciences, ivan@afanaskin.ru

Problems of mathematical modeling of three-phase flow of immiscible fluids: oil, gas and water, are considered. The system of differential conservation equations is associated with a completely explicit numerical scheme on a super-element grid. A technique is proposed for producing wells working at bottomhole (and reservoir) pressure below the bubble point pressure in the super-element model (for large cell sizes and a significant pressure change inside the cell). Satisfactory results were obtained in comparative testing using commercial software.

Keywords: filtration model, three-phase filtration, super-element model, Muskat – Meres model.

Введение

При управлении разработкой нефтяных месторождений возникает необходимость проведения большого количества расчетов показателей разработки для разных вариантов геологического строения пласта и при различных управляющих воздействиях. При этом для ускорения расчетов часто используются упрощенные математические модели. Хорошим вариантом являются суперэлементные модели, обладающие большой реалистичностью при воспроизведении физических процессов на малом количестве ячеек, что приводит к небольшим затратам расчетного времени. Существующие суперэлементные модели описывают двухфазную фильтрацию нефти и воды. Однако, поскольку многие добывающие скважины эксплуатируются при забойных давлениях существенно ниже давления насыщения, а на некоторых месторождениях текущее пластовое давление ниже давления насыщения либо ве-

дется закачка газа, актуальным является создание трехфазных суперэлементных моделей. В работе описана попытка создания такой модели.

Математическая модель трехфазной фильтрации нефти, газа и воды

Система уравнений, описывающая трехфазную фильтрацию несмешивающихся флюидов (нефти, газа и воды) состоит из трех уравнений сохранения количества основных компонентов (объемов нефти, газа и воды в стандартных условиях) и обобщенного закона Дарси (такая система называется системой уравнений Маскета – Мереса), капиллярными и гравитационными силами, а также растворимостью газа в воде пренебрегается [1, 4, 5, 8]:
 уравнения сохранения объемов нефти, газа и воды:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{mS_o}{B_o} \right) + \operatorname{div} \left(\frac{\vec{W}_o}{B_o} \right) = -\bar{q}_o, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{mS_w}{B_w} \right) + \operatorname{div} \left(\frac{\vec{W}_w}{B_w} \right) = -\bar{q}_w, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{mS_g}{B_g} + \frac{mS_o R_s}{B_o} \right) + \operatorname{div} \left(\frac{\vec{W}_g}{B_g} + \frac{\vec{W}_o R_s}{B_o} \right) = -\bar{q}_{fg} - \bar{q}_o R_s, \quad (3)$$

обобщенный закон Дарси:

$$\vec{W}_\alpha = -\frac{k k_{r\alpha}}{\mu_\alpha} \operatorname{grad}(P), \quad \alpha = o, w, g, \quad (4)$$

где m – пористость; S_o , S_g и S_w ; B_o , B_g и B_w ; $\vec{W}_o$, $\vec{W}_g$ и $\vec{W}_w$; $\bar{q}_o$, $\bar{q}_{fg}$ и $\bar{q}_w$; k_{ro} , k_{rg} и k_{rw} ; μ_o , μ_g , и μ_w – насыщенность, объемный коэффициент; вектор скорости фильтрации; плотность источника (стока), моделирующего работу скважины (нижний индекс «fg» означает свободный газ); относительная фазовая проницаемость; вязкость нефти, газа и воды соответственно; R_s – растворимость газа в нефти; k – абсолютная проницаемость; P – пластовое давление.

Систему уравнений (1)–(4) необходимо дополнить замыкающими соотношениями:

$$S_o + S_g + S_w = 1, \quad (5)$$

$$m = m_0 [1 + C_r (P - P_0)], \quad (6)$$

$$B_\alpha = B_\alpha(P), \quad \mu_\alpha = \mu_\alpha(P), \quad \alpha = o, w, g, \quad (7)$$

$$R_s = R_s(P), \quad (8)$$

$$k_{ro} = k_{ro}(S_g, S_w), \quad k_{rg} = k_{rg}(S_g), \quad k_{rw} = k_{rw}(S_w), \quad (9)$$

где m_0 – пористость при начальном пластовом давлении;

C_r – сжимаемость пласта;

P_0 – начальное пластовое давление.

Применяя подход, описанный в [4] для конечно-разностной формы системы (1–3), к дифференциальной форме той же системы, можно получить следующую систему уравнений:

$$C_{op} \frac{\partial P}{\partial t} + C_{os} \frac{\partial S_o}{\partial t} = -\bar{q}_o - \operatorname{div} \left(\frac{\vec{W}_o}{B_o} \right), \quad (10)$$

$$C_{wp} \frac{\partial P}{\partial t} + C_{ws} \frac{\partial S_w}{\partial t} = -\bar{q}_w - \operatorname{div} \left(\frac{\vec{W}_w}{B_w} \right), \quad (11)$$

$$C_{gp} \frac{\partial P}{\partial t} + C_{gs} \frac{\partial S_g}{\partial t} + C_{dgp} \frac{\partial P}{\partial t} + C_{dgs} \frac{\partial S_o}{\partial t} = -\bar{q}_{fg} - \bar{q}_o R_s - \operatorname{div} \left(\frac{\vec{W}_g}{B_g} + \frac{\vec{W}_o R_s}{B_o} \right), \quad (12)$$

где

$$C_{\alpha p} = \left(\frac{1}{B_\alpha} \frac{dm}{dP} - \frac{m}{B_\alpha^2} \frac{dB_\alpha}{dP} \right) S_\alpha, \quad \alpha = o, w, g, \quad (13)$$

$$C_{\alpha s} = \frac{m}{B_\alpha}, \quad \alpha = o, w, g, \quad (14)$$

$$C_{dgp} = \left[\left(\frac{1}{B_o} \frac{dm}{dP} - \frac{m}{B_o^2} \frac{dB_o}{dP} \right) R_s + \frac{m}{B_o} \frac{dR_s}{dP} \right] S_o = C_{op} R_s + \frac{m S_o}{B_o} \frac{dR_s}{dP}, \quad (15)$$

$$C_{dgs} = \frac{m R_s}{B_o}. \quad (16)$$

Умножим (11) на A , а (12) на B и просуммируем (10)–(12). Зададим A и B так, чтобы все производные по времени от насыщенности сократились. Тогда необходимо выполнение равенства:

$$C_{os} \frac{\partial S_o}{\partial t} + A C_{ws} \frac{\partial S_w}{\partial t} + B C_{gs} \frac{\partial S_g}{\partial t} + B C_{dgs} \frac{\partial S_o}{\partial t} = 0. \quad (17)$$

Продифференцировав условие (5) по времени, получим:

$$\frac{\partial S_o}{\partial t} + \frac{\partial S_g}{\partial t} + \frac{\partial S_w}{\partial t} = 0. \quad (18)$$

Анализируя (17) и (18), получаем условие:

$$C_{os} + B C_{dgs} = A C_{ws} = B C_{gs}. \quad (19)$$

Найдем A и B из (19):

$$B = \frac{C_{os}}{C_{gs} - C_{dgs}}, \quad A = B \frac{C_{gs}}{C_{ws}}. \quad (20)$$

Тогда сумма уравнений (10)–(12) принимает вид:

$$\begin{aligned} & (C_{op} + A C_{wp} + B C_{gp} + B C_{dgp}) \frac{\partial P}{\partial t} + A \bar{q}_w + B \bar{q}_{fg} + B \bar{q}_o R_s + A \cdot \operatorname{div} \left(\frac{\vec{W}_w}{B_w} \right) + \\ & + B \cdot \operatorname{div} \left(\frac{\vec{W}_g}{B_g} + \frac{\vec{W}_o R_s}{B_o} \right) = -\bar{q}_o - \operatorname{div} \left(\frac{\vec{W}_o}{B_o} \right) \end{aligned} \quad (21)$$

Обозначим:

$$C_{ABC} = C_{op} + A C_{wp} + B C_{gp} + B C_{dgp}, \quad C_1 = \frac{A}{C_{ABC}}, \quad C_2 = \frac{B}{C_{ABC}}, \quad C_3 = \frac{1}{C_{ABC}}. \quad (22)$$

Тогда уравнение для давления (21) можно переписать как:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + C_1 \left[\bar{q}_w + \operatorname{div} \left(\frac{\vec{W}_w}{B_w} \right) \right] + C_2 \left[\bar{q}_{fg} + \bar{q}_o R_s + \operatorname{div} \left(\frac{\vec{W}_g}{B_g} + \frac{\vec{W}_o R_s}{B_o} \right) \right] = -C_3 \left[\bar{q}_o + \operatorname{div} \left(\frac{\vec{W}_o}{B_o} \right) \right]. \quad (23)$$

Численная схема

Рассмотрим расчетную сетку, составленную из так называемых суперэлементов [6, 7] – ячеек с размерами в плане сопоставимыми с расстоянием между скважинами (300–500 м). Тогда количество ячеек в модели будет примерно равно количеству скважин. Как правило, скважины выступают в роли центров ячеек. В неразбуренной части объекта для построения сетки могут быть введены фиктивные скважины. Использование такой сетки позволяет сократить вычислительные затраты в тысячи раз [6].

Задача построения сетки суперэлементов в плане (2D сетки) сводится к задаче построения областей Вороного:

1. Нанесение на карту скважин и границ залежи.
2. Построение выпуклой оболочки по N скважинам путем соединения внешних скважин залежи прямыми линиями.
3. Построение триангуляции Делоне на множестве скважин залежи (участка).
4. Построение областей Вороного для скважин, включенных в триангуляцию.

Для получения суперэлементной 3D сетки сетку, построенную в плане, копируют для разных слоев, изменяя при этом глубину залегания кровли ячеек и их толщину.

Большой размер ячеек позволяет использовать полностью явную схему. Рассмотрим такую схему для уравнения (23) на сетке суперэлементов в плане (2D – плоская модель):

$$\begin{aligned} \frac{F_i h_i}{\Delta t^{n+1}} (P_i^{n+1} - P_i^n) + (C_1)_i^{n+1} \left[(q_w)_i^n + \sum_{j=1}^{N_i} (q_w)_{ij}^n \right] + (C_2)_i^{n+1} \left[(q_{fg})_i^n + (q_o)_i^n (R_s)_i^n + \right. \\ \left. + \sum_{j=1}^{N_i} (q_g)_{ij}^n + \sum_{j=1}^{N_i} (q_o)_{ij}^n (R_s)_{ij}^n \right] = -(C_3)_i^{n+1} \left[(q_o)_i^n + \sum_{j=1}^{N_i} (q_o)_{ij}^n \right], \end{aligned} \quad (24)$$

где n – номер шага по времени; i – номер ячейки; Δt^{n+1} – шаг по времени (переменный, зависит от максимально допустимого изменения давления и насыщенности, определяется в соответствии с рекомендациями работы [1]); F_i и h_i – площадь и толщина ячейки i ; $(q_\alpha)_i^n$ – дебит фазы $\alpha = o, g, w$ скважины в ячейке i на шаге по времени n ; $(q_\alpha)_{ij}^n$ – переток фазы $\alpha = o, g, w$ между ячейками i и j на шаге по времени n (определяется аналогично работам [2, 3]); $(R_s)_{ij}^n$ – растворимость газа в нефти, перетекаемой между ячейками i и j на шаге по времени n (определяется вверх по потоку); N_i – количество соседних ячеек для ячейки i .

Линеаризуем множители $(C_1)_i^{n+1}$, $(C_2)_i^{n+1}$ и $(C_3)_i^{n+1}$ следующим образом:

$$x_i^{n+1} = x_i^n + \left(\frac{\partial x}{\partial P} \right)_i^n (P_i^{n+1} - P_i^n), \quad (25)$$

где x – это C_1 , C_2 и C_3 .

Обозначим:

$$(C'_{1p})_i^n = \left(\frac{\partial C_1}{\partial P} \right)_i^n, \quad (C'_{2p})_i^n = \left(\frac{\partial C_2}{\partial P} \right)_i^n, \quad (C'_{3p})_i^n = \left(\frac{\partial C_3}{\partial P} \right)_i^n, \quad (26)$$

$$\begin{aligned}(q_1)_i^n &= \left[(q_w)_i^n + \sum_{j=1}^{N_i} (q_w)_{ij}^n \right], \quad (q_2)_i^n = \left[(q_{fg})_i^n + (q_o)_i^n (R_s)_i^n + \sum_{j=1}^{N_i} (q_g)_{ij}^n + \sum_{j=1}^{N_i} (q_o)_{ij}^n (R_s)_{ij}^n \right], \\ (q_3)_i^n &= \left[(q_o)_i^n + \sum_{j=1}^{N_i} (q_o)_{ij}^n \right].\end{aligned}\quad (27)$$

Тогда с учетом (25)–(27) поделив уравнение (24) на $F_i h_i / \Delta t^{n+1}$ и вынося множитель $P_i^{n+1} - P_i^n$, это уравнение можно переписать следующим образом:

$$\begin{aligned}(P_i^{n+1} - P_i^n) \left\{ 1 + \frac{\Delta t^{n+1}}{F_i h_i} \left[(C'_{1p})_i^n (q_1)_i^n + (C'_{2p})_i^n (q_2)_i^n + (C'_{3p})_i^n (q_3)_i^n \right] \right\} = \\ = - \frac{\Delta t^{n+1}}{F_i h_i} \left[(C_1)_i^n (q_1)_i^n + (C_2)_i^n (q_2)_i^n + (C_3)_i^n (q_3)_i^n \right].\end{aligned}\quad (28)$$

В результате получаем следующее численное уравнение для давления:

$$P_i^{n+1} = P_i^n - \frac{\frac{\Delta t^{n+1}}{F_i h_i} \left[(C_1)_i^n (q_1)_i^n + (C_2)_i^n (q_2)_i^n + (C_3)_i^n (q_3)_i^n \right]}{1 + \frac{\Delta t^{n+1}}{F_i h_i} \left[(C'_{1p})_i^n (q_1)_i^n + (C'_{2p})_i^n (q_2)_i^n + (C'_{3p})_i^n (q_3)_i^n \right]}.\quad (29)$$

Запишем численный аналог уравнений (1) и (3):

$$\frac{F_i h_i}{\Delta t^{n+1}} \left[\left(\frac{m S_o}{B_o} \right)_i^{n+1} - \left(\frac{m S_o}{B_o} \right)_i^n \right] + \sum_{j=1}^{N_i} (q_o)_{ij}^{n+1} = -(q_o)_i^{n+1},\quad (30)$$

$$\begin{aligned}\frac{F_i h_i}{\Delta t^{n+1}} \left[\left(\frac{m S_g}{B_g} + \frac{m S_o R_s}{B_o} \right)_i^{n+1} - \left(\frac{m S_g}{B_g} + \frac{m S_o R_s}{B_o} \right)_i^n \right] + \sum_{j=1}^{N_i} (q_g)_{ij}^{n+1} + \sum_{j=1}^{N_i} (q_o)_{ij}^{n+1} (R_s)_{ij}^n = \\ = -(q_{fg})_i^{n+1} - (q_o)_i^{n+1} (R_s)_i^n,\end{aligned}\quad (31)$$

где слагаемые вида $(q_\alpha)_i^{n+1}$ и $(q_\alpha)_{ij}^{n+1}$ зависят от давления на слое $n + 1$ и соответствующей насыщенности на слое n .

Выразим из численных аналогов уравнений сохранения объемов нефти и газа в стандартных условиях (30) и (31) величины $(V_{oSC})_i^{n+1}$ и $(V_{gSC})_i^{n+1}$ – удельные объемы нефти и газа на новом шаге по времени:

$$(V_{oSC})_i^{n+1} = \left(\frac{m S_o}{B_o} \right)_i^{n+1} = \left(\frac{m S_o}{B_o} \right)_i^n - \frac{\Delta t^{n+1}}{F_i h_i} \left[(q_o)_i^{n+1} + \sum_{j=1}^{N_i} (q_o)_{ij}^{n+1} \right],\quad (32)$$

$$\begin{aligned}(V_{gSC})_i^{n+1} = \left(\frac{m S_g}{B_g} + \frac{m S_o R_s}{B_o} \right)_i^{n+1} = \\ = \left(\frac{m S_g}{B_g} + \frac{m S_o R_s}{B_o} \right)_i^n - \frac{\Delta t^{n+1}}{F_i h_i} \left[(q_{fg})_i^{n+1} + (q_o)_i^{n+1} (R_s)_i^n + \sum_{j=1}^{N_i} (q_g)_{ij}^{n+1} + \sum_{j=1}^{N_i} (q_o)_{ij}^{n+1} (R_s)_{ij}^n \right].\end{aligned}\quad (33)$$

Запишем разностный аналог дифференциального уравнения для водонасыщенности (11):

$$(C_{wp})_i^{n+1}(P_i^{n+1} - P_i^n) + (C_{ws})_i^{n+1}[(S_w)_i^{n+1} - (S_w)_i^n] = -\frac{\Delta t^{n+1}}{F_i h_i} \left[(q_w)_i^{n+1} + \sum_{j=1}^{N_i} (q_w)_{ij}^{n+1} \right]. \quad (34)$$

Выразим из (34) водонасыщенность на новом шаге по времени:

$$(S_w)_i^{n+1} = (S_w)_i^n - \frac{\Delta t^{n+1}}{F_i h_i (C_{ws})_i^{n+1}} \left[(q_w)_i^{n+1} + \sum_{j=1}^{N_i} (q_w)_{ij}^{n+1} \right] - \frac{(C_{wp})_i^{n+1}}{(C_{ws})_i^{n+1}} (P_i^{n+1} - P_i^n). \quad (35)$$

Вспомним, что одним из замыкающих соотношений является зависимость (8) растворимости газа в нефти от давления $R_s = R_s(P)$, полученная по результатам лабораторных PVT-исследований пластовой нефти. Следует отметить, что $R_s(P)$ – это максимальное содержание газа, растворимого в нефти при данном давлении. Возможны два случая:

1. Нефть недонасыщена газом. Фактическое содержание газа в нефти при данном давлении меньше максимально возможного $R_s(P)$. Тогда свободного газа в пласте нет.

2. Нефть перенасыщена газом. Фактическое количество газа в пласте (относительно количества нефти) больше, чем может раствориться в нефти при данном давлении $R_s(P)$. Тогда в пласте присутствует газовая фаза.

Рассмотрим способ вычисления насыщенностей нефтью и газом с учетом этих двух возможных ситуаций.

Если выполняется условие:

$$\frac{(V_{gSC})_i^{n+1}}{(V_{oSC})_i^{n+1}} \leq R_s(P_i^{n+1}), \quad (36)$$

то нефть недонасыщена газом и свободный газ в пласте отсутствует. Тогда:

$$(S_o)_i^{n+1} = 1 - (S_w)_i^{n+1}, \quad (S_g)_i^{n+1} = 0 \quad \text{и} \quad (R_s)_i^{n+1} = \frac{(V_{gSC})_i^{n+1}}{(V_{oSC})_i^{n+1}}, \quad (37)$$

где $(R_s)_i^{n+1}$ – фактическое количество газа, растворенного в нефти на шаге по времени $n+1$ в блоке сетки i .

Если выполняется условие:

$$\frac{(V_{gSC})_i^{n+1}}{(V_{oSC})_i^{n+1}} > R_s(P_i^{n+1}), \quad (38)$$

то нефть перенасыщена газом и в пласте присутствует газовая фаза. Тогда:

$$(S_g)_i^{n+1} = \frac{(B_g)_i^{n+1}}{m_i^{n+1}} [(V_{gSC})_i^{n+1} - (V_{oSC})_i^{n+1} R_s(P_i^{n+1})], \quad (S_o)_i^{n+1} = 1 - (S_w)_i^{n+1} - (S_g)_i^{n+1} \quad \text{и} \\ (R_s)_i^{n+1} = R_s(P_i^{n+1}) = (R_s)_{\max}, \quad (39)$$

где

$$(B_g)_i^{n+1} = B_g(P_i^{n+1}) \quad \text{и} \quad m_i^{n+1} = m_i(P_i^{n+1}) = (m_0)_i [1 + C_r(P_i^{n+1} - P_0)].$$

Таким образом, мы определили на новом временном шаге давление, количество фаз и насыщенность пласта фазами. Предложенная 2D расчетная схема легко обобщается на случай 3D. Описанная модель реализована в программе OPC-2.

Моделирование работы скважин

Выведем формулу для дебита скважины $(q_\alpha)_i^n$ с учетом больших размеров ячеек и (как следствие) большого изменения давления в пределах ячейки от $(P_w)_i^n$ – давления на стенке скважины, до P_i^n – среднего давления в ячейке, интерпретируемого как давление на расстоянии $(R_c)_i$ от скважины, находящейся в центре ячейки. При выводе будем опускать индексы «i» и «n». Запишем закон Дарси для плоскорадиального потока:

$$q_\alpha = \frac{kk_{r\alpha}}{\mu_\alpha B_\alpha} \cdot \frac{dP}{dr} \cdot 2\pi rh. \quad (40)$$

Разделим переменные в (40) и проинтегрируем от радиуса скважины r_w до радиуса контура питания R_c и от давления на стенке скважины P_w до давления на контуре питания P :

$$q_\alpha \int_{r_w}^{R_c} \frac{dr}{r} = 2\pi k k_{r\alpha} h \int_{P_w}^P \frac{dP}{\mu_\alpha B_\alpha}. \quad (41)$$

После интегрирования с учетом индексов «i» и «n», а также с учетом возможного наличия скин-эффекта получим:

$$(q_\alpha)_i^n = \frac{2\pi k_i (k_{r\alpha})_i^n h_i}{\ln \left[\frac{(R_c)_i}{(r_w)_i} \right] + Skin_i^n} \int_{(P_w)_i^n}^{P_i^n} \frac{dP}{\mu_\alpha B_\alpha}, \quad (42)$$

где $Skin_i^n$ – скин-фактор скважины и

$$(R_c)_i = 0,14 \sqrt{2F_i}. \quad (43)$$

Чтобы взять интеграл в (42) будем пользоваться методом парабол (методом Симпсона):

$$\int_{(P_w)_i^n}^{P_i^n} \frac{dP}{\mu_\alpha B_\alpha} \approx \frac{P_i^n - (P_w)_i^n}{6} \left\{ f \left[(P_w)_i^n \right] + 4f \left[\frac{P_i^n + (P_w)_i^n}{2} \right] + f \left(P_i^n \right) \right\}, \quad (44)$$

где

$$f(P) = \frac{1}{\mu_\alpha(P) \cdot B_\alpha(P)}. \quad (45)$$

Определение относительных фазовых проницаемостей

В рассмотренной модели вода появится в продукции добывающей скважины сразу же после превышения текущей водонасыщенности ячейки значения насыщенности связанной водой. Аналогично для газа. Это конечно неверно. Закачиваемой воде необходимо время для того, чтобы пройти расстояние от нагнетательной скважины до добывающей. Для передачи

этого эффекта используется ступенчатое задание функций относительной фазовой проницаемости (ОФП).

ОФП в системе нефть-вода:

$$(k_{rw})_i^n = \begin{cases} 0, (S_w)_i^n < (S_{wc})_i \\ A_i \left[\frac{(S_w)_i^n - (S_{wcr})_i}{1 - (S_{wcr})_i} \right]^{\alpha_i}, (S_w)_i^n \geq (S_{wc})_i \end{cases}, \quad (46)$$

$$(k_{row})_i^n = \begin{cases} B_i, (S_w)_i^n < (S_{wc})_i \\ B_i \left[\frac{1 - (S_{owcr})_i - (S_w)_i^n}{1 - (S_{owcr})_i - (S_{wcr})_i} \right]^{\beta_i}, (S_w)_i^n \geq (S_{wc})_i \end{cases}, \quad (47)$$

где $(S_{wc})_i$ – водонасыщенность на фронте вытеснения нефти водой;

$(S_{wcr})_i$ – насыщенность связанной водой;

$(S_{owcr})_i$ – насыщенность остаточной нефтью при вытеснении водой; коэффициенты A_i , B_i , α_i , β_i – определяются по результатам интерпретации исследований керна и могут зависеть от пористости или проницаемости.

Аналогично ОФП в системе нефть-газ:

$$(k_{rg})_i^n = \begin{cases} 0, (S_g)_i^n < (S_{gc})_i \\ C_i \left[\frac{(S_g)_i^n - (S_{gcr})_i}{1 - (S_{gcr})_i} \right]^{\gamma_i}, (S_g)_i^n \geq (S_{gc})_i \end{cases}, \quad (48)$$

$$(k_{rog})_i^n = \begin{cases} D_i, (S_g)_i^n < (S_{gc})_i \\ D_i \left[\frac{1 - (S_{ogcr})_i - (S_g)_i^n}{1 - (S_{ogcr})_i - (S_{gcr})_i} \right]^{\delta_i}, (S_g)_i^n \geq (S_{gc})_i \end{cases}, \quad (49)$$

где $(S_{gc})_i$ – газонасыщенность на фронте вытеснения нефти газом;

$(S_{gcr})_i$ – насыщенность связанным газом;

$(S_{ogcr})_i$ – насыщенность остаточной нефтью при вытеснении газом;

коэффициенты C_i , D_i , γ_i , δ_i – определяются по результатам интерпретации исследований керна и могут зависеть от пористости или проницаемости.

ОФП нефти при трехфазной фильтрации определяется по второму методу Стоуна [1, 4, 5, 8]:

$$(k_{ro})_i^n = (k_{row})_i^n \left\{ \left[\frac{(k_{row})_i^n}{(k_{row})_i^n} + (k_{rw})_i^n \right] \left[\frac{(k_{rog})_i^n}{(k_{row})_i^n} + (k_{rg})_i^n \right] - (k_{rw})_i^n - (k_{rg})_i^n \right\}, \quad (50)$$

где $(k_{row})_i^n = [k_{row}(S_{wcr})]_i = [k_{rog}(S_g = 0)]_i$ – ОФП по нефти при насыщенности связанной водой в отсутствии газа.

Проверка математической модели

Рассмотрим результаты расчетов по описанной методике на примере 9-точечного элемента разработки реального месторождения Западной Сибири. Будем сравнивать расчеты с помощью симулятора Rubis Kappa Engineering (рис. 1), с расчетами на предлагаемой суперэлементной модели (ОРС-2) (рис. 2). Как видно из рис. 2 – для идеальной (без смещения скважин относительно шаблона) 9-точечной системы разработки сетка суперэлементов является прямоугольной сеткой.

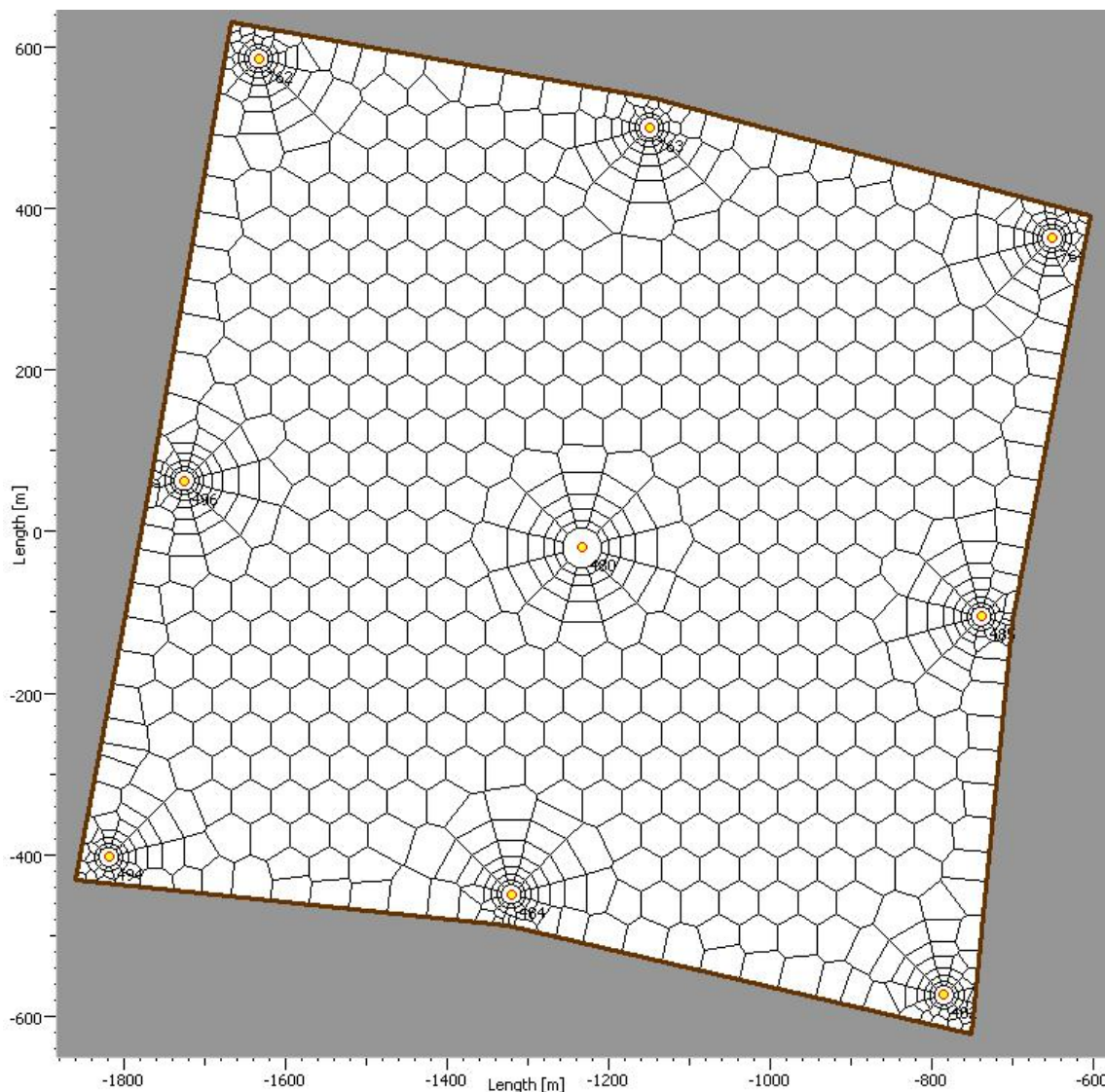


Рис. 1. Расчетная сетка модели в симуляторе Rubis Kappa Engineering

Приняты следующие параметры пласта, флюидов и скважин:

1. Фильтрационно-емкостные свойства: проницаемость – от 7 до 250 мД, средняя 35 мД; пористость – от 0,15 до 0,23 д. ед., средняя 0,17 д. ед.; эффективная толщина – от 4 до 14 м, средняя 8 м.
2. Свойства воды: объемный коэффициент – 1,02 м³/м³; вязкость – 0,36 мПа·с; плотность – 1 056 кг/м³.
3. Свойства нефти: объемный коэффициент – 1,16 м³/м³; вязкость – 0,62 мПа·с; плотность – 847 кг/м³; растворимость газа в нефти – 65 м³/м³; давление насыщения – 98 бар.
4. Начальное давление – 255 бар. Начальная насыщенность водой – 0,335 д. ед.; газом – 0,0 д. ед.

5. Количество скважин – 9 (1 нагнетательная и 8 добывающих). Расстояние между рядами скважин 500 м. Центральная нагнетательная скважина закачивает смесь сухого газа и воды. Пластовое давление в процессе разработки ниже давления смесимости, т. е. смесимости закачиваемого газа и нефти нет. Добывающие скважины управляются дебитом жидкости и эксплуатируются при забойном давлении ниже давления насыщения. Нагнетательные скважины управляются приемистостью. Дебиты и закачка соответствуют фактическим данным. Компенсация отбора закачкой 100 %. Водогазовое отношение 0,005 м³/м³.

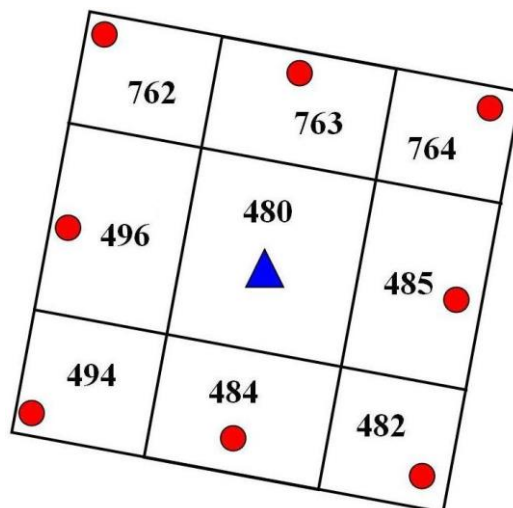


Рис. 2. Суперэлементная расчетная сетка (OPC-2)

На рис. 3 приведены результаты расчетов основных показателей разработки. Общее время разработки – 14 лет. Первые 7 лет для суперэлементной модели являлись «историей», полученной с помощью Rubis. Последующие 7 лет – прогноз. Видно удовлетворительное для инженерных расчетов совпадение «эталонных» кривых, полученных с помощью Rubis, и кривых, рассчитанных с помощью суперэлементной модели OPC-2.

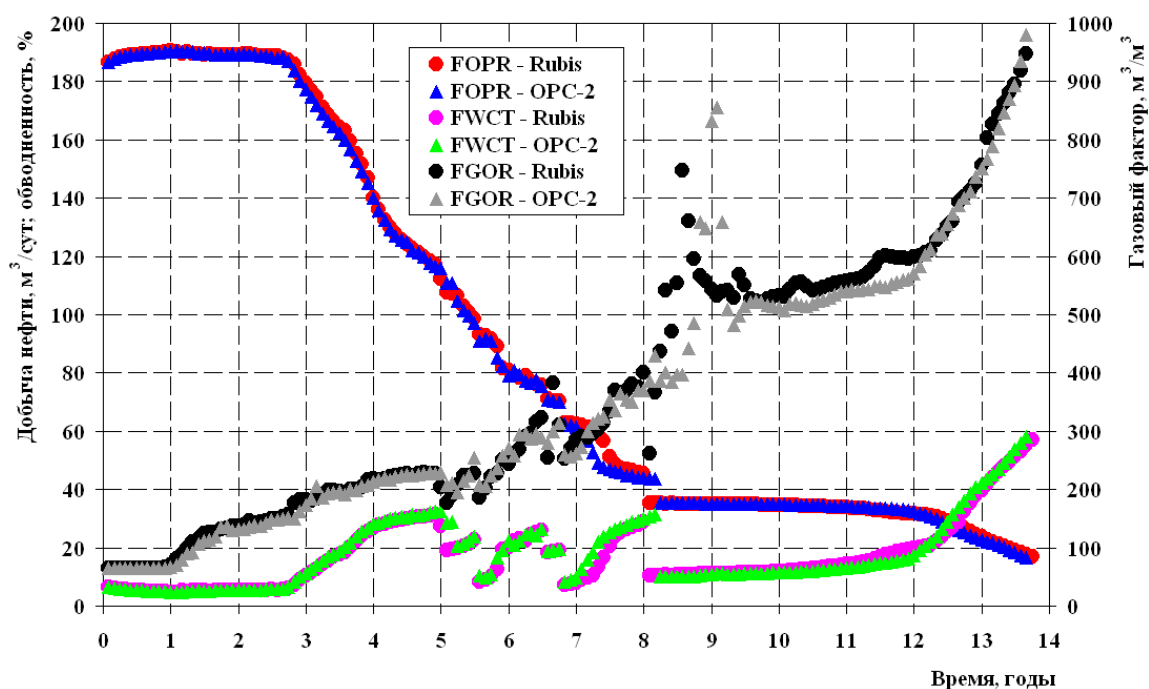


Рис. 3. Основные показатели разработки

FOPR – добыча нефти, FWCT – обводненность, FGOR – газовый фактор

Заключение

Рассмотрена трехфазная модель фильтрации Маскета – Мереса в случае пренебрежения капиллярными и гравитационными силами. Система дифференциальных уравнений сохранения аппроксимирована полностью явным способом на суперэлементной сетке. Из-за того, что размер ячеек суперэлементной сетки сопоставим с расстоянием между скважинами, количество ячеек примерно равно количеству скважин (для однослойной модели), что дает высокую скорость счета. Предложена методика более точного (по сравнению с классическим вариантом) учета работы добывающих скважин при забойном (и пластовом) давлении ниже давления насыщения за счет специальной формы записи источниковых слагаемых. Суперэлементная трехфазная модель реализована в программе ОРС-2. Получены удовлетворительные результаты при сопоставительном тестировании ОРС-2 с коммерческим программным продуктом Rubis Kappa Engineering.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16–29–15135 офи_м.

Литература

1. Азиз Х., Сеттари Э. Математическое моделирование пластовых систем. М. ; Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2004. 416 с.
2. Афанаскин И. В., Вольпин С. Г., Ялов П. В., Ефимова Н. П. Пример суперэлементного моделирования заводнения нефтяного месторождения // Нефтепромысловое дело. 2017. № 4. С. 10–16.
3. Афанаскин И. В., Егоров А. А., Колеватов А. А. Экспресс-моделирование заводнения нефтяных месторождений с помощью концепции суперэлементов // Вестн. кибернетики. 2016. Вып. 2 (22). С. 154–164.
4. Каневская Р. Д. Математическое моделирование гидродинамических процессов разработки месторождений углеводородов. М. ; Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2002. 140 с.
5. Кричлоу Г. Б. Современная разработка нефтяных месторождений. М. : Недра, 1979. 304 с.
6. Мазо А. Б., Булыгин Д. В. Суперэлементы. Новый подход к моделированию разработки нефтяных месторождений // Нефть. Газ. Новации. Самара, 2011. № 11. С. 6–8.
7. Мазо А. Б., Поташев К. А., Калинин Е. И. Суперэлементный метод численного моделирования разработки залежей нефти // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2013. № 1 (12). С. 237–243.
8. Эртекин Т., Абу-Кассем Дж., Кинг Г. Основы прикладного моделирования пластов. М. ; Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2012. 1060 с.

УДК 531.714:519.87

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕДИМЕНТАЦИИ В НЕОДНОРОДНОМ ПОТОКЕ С УЧЕТОМ УДАЛЕНИЯ ВЫДЕЛИВШЕЙСЯ ФАЗЫ ИЗ ОБЛАСТИ ТЕЧЕНИЯ

В. А. Галкин

*Политехнический институт Сургутского государственного университета,
val-gal@yandex.ru*

Рассмотрена математическая модель сепарации компонента дисперсной среды в пространственно неоднородном потоке сливающихся при столкновениях частиц. Наличие неоднородного поля скоростей переноса частиц порождает новый эффект, связанный с аналогом кумулятивных течений, в которых образуются пространственно-временные зоны с интенсивным выделением полимерной структуры, мгновенно удаляющейся из среды (седиментация, основанная на сепарации выделившегося полимера). При этом в математическом описании явления возникают пространственно-временные особенности функций, описывающих концентрации частиц дисперсной среды. Предложен вычислительный алгоритм построения приближений концентраций, выполнены тестовые расчеты и проведено сравнение метода Монте-Карло с повторными испытаниями и расчетами по явной разностной схеме. Предложена процедура подготовки данных на уровне отдельных частиц, приводящая в пределе к решению сходящейся разностной схемы, которая в свою очередь сходится к обобщенному решению задачи Коши для пространственно неоднородного уравнения Смолуховского – кинетической теории коагуляции.

Ключевые слова: метод Монте-Карло с повторными испытаниями, кумулятивные течения, уравнение Смолуховского, обобщенные решения.

SEDIMENTATION MODELING IN NON-UNIFORM FLOW WITH REGARD FOR REMOVING OF PRECIPITATED PHASE FROM FLOW RANGE

V. A. Galkin

Polytechnic Institute, Surgut State University, val-gal@yandex.ru

The mathematical model of components separation of a dispersed medium in a spatially non-uniform flow of merging particles in collisions is considered. The availability of the non-uniform velocity field of particles transport generates a new effect connected to the analog of cumulative flows where space-time zones are formed with an intensive release of the polymeric structure that is instantaneously removed from the medium (sedimentation based on the separation of the precipitated polymer). At the same time, space-time features of functions that describe the concentrations of particles in a dispersed medium arise in the mathematical description of the phenomenon. A computational algorithm for the approximations concentration constructing is proposed, test calculations are performed, and the Monte Carlo method with duplicate tests is compared with calculations of explicit difference scheme. A data preparation procedure of data preparation at the level of individual particles is proposed, leading in the limit to a solution of a convergent difference scheme, which in turn converges to a generalized solution of the Cauchy problem for the spatially non-uniform Smoluchowski equation of kinetic theory of coagulation.

Keywords: Monte Carlo method with duplicate tests, cumulative flows, Smoluchowski equation, generalized solutions.

Введение: коагуляция и седиментация в дисперсных системах

Коагуляция (слияние) частиц является одной из основных причин эволюции пространственно неоднородных дисперсных систем, под которыми понимают механическую смесь среды (газообразной или жидкой) с частицами диспергированной фазы (твердой или жидкой), причем свойства фаз существенно зависят от переноса вещества между различными точками координатного пространства. При этом важно подчеркнуть наличие дисперсии скоростей переноса для частиц, находящихся в различных состояниях (иначе замена системы пространственно-временных координат описание сводится к модели, подобной пространственно однородному случаю).

Пространственно неоднородная коагуляция наблюдается в различных дисперсных системах: в растворах – броуновская коагуляция частиц, блуждающих из-за флуктуаций внешней среды; при слиянии частиц, падающих во внешней среде под действием силы тяжести – гравитационная коагуляция. Следует подчеркнуть, что наличие пространственной неоднородности значительно усложняет исследование таких математических моделей. В частности, это обусловлено новым эффектом (по сравнению с пространственно однородными задачами), а именно, возникновением недифференцируемых особенностей по пространственно-временным переменным у плотности распределения частиц. Эти особенности, в свою очередь, порождают пространственно-временные зоны, в которых соотношение сохранения для оператора столкновений переходит в соотношение диссипации (эти области можно интерпретировать как зоны интенсивного образования осадков, не взаимодействующих с дисперсной фазой – явление седиментации). В указанных областях проявляется кумулятивный эффект течения жидкости, аналогичный возникновению ударной волны в газовой динамике.

Такие процессы оказывают воздействие на рост кристаллов в растворах, газовых пузырях и пор. Серьезное влияние оказывает пространственно неоднородная коагуляция продуктов горения топлива на тягу реактивных двигателей. Явление осаждения может быть использовано в сепараторах фракций дисперсной среды. Процесс пространственно неоднородной коагуляции оказывает воздействие на рост кристаллов в растворах, газовых пузырях и пор в твердом теле. Серьезное влияние оказывает пространственно неоднородная коагуляция продуктов горения топлива на тягу реактивных двигателей. Чтобы густая нефть с большей легкостью поднималась по трубам, надо прежде всего сделать ее более жидкой. Для этого необходимо применить особые растворы.

Указанные явления типичны для нефтехимических процессов при использовании мицеллярных дисперсий. Основными составляющими этих составов являются нефтерастворимые поверхностно-активные вещества: спирт, углеводородный растворитель типа керосина или легких фракций нефти и воды. При закачке их в пласт, они образуют в сочетании с нефтью эмульсию, дисперсную фазу которой составляют частицы композитного состава – мицеллы. При этом возможно уменьшение сил, связывающих эмульсию с пористой нефтесодержащей средой, и тем самым появляется управляющее воздействие на коэффициент извлечения нефти (КИН) из коллектора. Очевидно, что его увеличение – важный экономический фактор. Это является одной из перспективных технологий, основанной на подготовке дисперсной среды с последующей сепарацией. В частности, одной из основных задач для суперкомпьютерных технологий является существенное увеличение извлекаемых запасов углеводородов за счет увеличения коэффициента извлечения нефти и газа. Последнее может быть достигнуто путем выбора оптимальных стратегий в результате предсказательного моделирования динамики нефти в пористой среде при физических воздействиях на пласт, направленных на повышение нефтеотдачи. Даже управление процессами фронтального вытеснения и обеспечение его устойчивости в состоянии потенциально существенно повысить коэффициент извлечения нефти. В России на данный момент коэффициент извлечения нефти по разведанным запасам составляет 37,7 %. Увеличение коэффициента нефтеизвлечения в масштабах России даже на 3–5 % даст дополнительно 3–5 млрд тонн извлекаемых запасов нефти, а это 100–150 млн тонн дополнительной добычи в год [1].

Для получения особо высокодисперсных эмульсий применяется ультразвуковой метод. Эмульсии, полученные из беспримесных жидкостей, обычно неустойчивы, и дисперсная система для двухкомпонентной смеси постепенно расслаивается на две несмешивающиеся жидкости за счет слияния капелек в смеси. Получение устойчивых эмульсий возможно в присутствии веществ, которые, адсорбируясь на поверхности капелек, препятствуют их слиянию и придают системе агрегатную устойчивость. Поэтому процессы коагуляции и управление ими весьма важны для поддержания структурной устойчивости эмульсий, используемых в нефтедобыче. В концентрированных эмульсиях в отличие от разбавленных при превышении пороговой концентрации дисперсной фазы, слияние капелек происходит с значительной скоростью и эмульсия достаточно быстро разделяется на два слоя. Получение устойчивых концентрированных эмульсий возможно только в присутствии специальных эмульгаторов. К эмульгаторам, способным образовывать прочные защитные пленки, относятся высокомолекулярные соединения, например, сапонин, белки (желатин, казеин), каучук, смолы, соли жирных кислот (мыла) и др.

Физический формализм получения уравнений пространственно неоднородной кинетической теории коагуляции описан в [2, 3]. Физическим аспектам явления коагуляции посвящена обширная литература [4, 5].

Основные предположения физического характера, накладываемые на систему коагулирующих частиц, состоят в следующем. Частиц достаточно большое количество, чтобы можно было применять функцию распределения частиц по массам и в координатном пространстве. Считается, что частицы испытывают только парные столкновения и образуют локально хаотическое множество.

Пространственно неоднородные задачи, связанные с переносом частиц, осуществляемым посредством однопараметрической группы сдвигов по пространственной переменной, являются наиболее трудными с математической точки зрения.

Математическая модель возникновения зон седиментации (кумуляции)

Рассмотрим математическую модель процесса коагуляции в дисперсной системе, состоящей из вязкой среды, в которой вдоль оси $Ox = \{x \in \mathbb{R}\}$ под действием внешней силы с постоянной скоростью движутся частицы, которые состоят из объединений мономеров, имеющих массу $\mu_1 > 0$. Частицу, порожденную объединением i мономеров (т. е. ее масса равна $i\mu_1$, $i \in \mathbb{N}$), будем для краткости именовать i -мер, слово *полимер* примем для обозначения бесконечного объединения мономеров. Пусть скорость движения i -мера равна v_i , а при столкновении пары частиц происходит их слияние в единый конгломерат, состоящий из суммарного количества мономеров обеих частиц (*коагуляция*). Для описания эволюции концентрации i -меров $f_i \stackrel{\text{def}}{=} f(i, x, t)$ в такой системе используется кинетическое уравнение Смолуховского:

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} + v_i \frac{\partial f_i}{\partial x} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{i-1} \Phi_{i-j,j} f_{i-j} f_j - f_i \sum_{j=1}^{\infty} \Phi_{i,j} f_j, \quad i \in \mathbb{N}, \quad (1)$$

где $\Phi_{i,j} = \sigma_{i,j} |v_i - v_j|$ – интенсивность слияния i и j -меров; $\sigma_{i,j}$ – сечение захвата, являющееся симметричной, неотрицательной функцией на $\mathbb{N} \times \mathbb{N}$. Оператор столкновений, определяемый правой частью уравнения (1), обозначим $S_i(f)$, $f = \{f_i\}_{i \in \mathbb{N}}$. Первое слагаемое в $S_i(f)$ считаем по определению равным нулю. Выражение для $S_i(f)$ задает локальный баланс между рождением i -меров из-за слияния $i-j$ и j -меров и уничтожением i -меров. Оператор столкновений определяет локальный закон

сохранения количества вещества, заключенного в частицах, состоящих из конечного числа мономеров, ибо для финитных наборов концентраций f справедливо равенство:

$$\sum_{i \in \mathbb{N}} i S_i(f) = 0.$$

Для уравнения (1) рассматривается задача Коши с начальными данными:

$$f(i, x, 0) = \varphi_i(x), \quad x \in \mathbb{R}, \quad i \in \mathbb{N}. \quad (2)$$

Ниже указываются достаточные условия, когда на решении уравнения (1) возникают негладкие особенности по переменным x, t при сколь угодно гладкой начальной функции $\varphi = \{\varphi_i\}_{i \in \mathbb{N}}$.

Интегральной формой задачи (1), (2) является нелинейное интегральное уравнение вольтерровского вида:

$$f|_t = T_t \varphi + \int_0^t T_{t-\tau} \circ S(f)|_\tau d\tau, \quad t \geq 0, \quad (3)$$

где T_t – однопараметрическая группа сдвигов, действие которой определено формулой:

$$T_t(\varphi)(i, x) = \varphi_i(x - v_i t), \quad \varphi = \{\varphi_i\}_{i \in \mathbb{N}}. \quad (4)$$

Уравнение (3) определяет обобщенное решение задачи Коши для уравнения Смолуховского (1).

Примем обозначение $\bar{f} = T_t \varphi$ для набора концентраций при свободном преносе частиц. Положим:

$$\begin{aligned} \bar{I}_i(x, t) &= \sum_{j=1}^{\infty} \Phi_{i,j} \bar{f}(j, x, t), \\ I_i(x, t) &= \sum_{j=1}^{\infty} \Phi_{i,j} f(j, x, t). \end{aligned}$$

Теорема 1. Пусть сечение захвата частиц $\sigma_{i,j}$ ($i, j \in \mathbb{N}$) удовлетворяет неравенствам

$$0 < \inf_{i \times j} \sigma_{i,j} \leq \sup_{i \times j} \sigma_{i,j} < \infty,$$

скорость свободного переноса частиц v_i является строго монотонной функцией аргумента $i \in \mathbb{N}$. Предположим, что начальные концентрации $\{\varphi_i\}_{i \in \mathbb{N}}$ в условии (2) – положительные гладкие по $x \in \mathbb{R}$ функции, имеющие конечные интегралы

$$\int \sum_{j=1}^{\infty} (1 + \Phi_{i,j}) j \varphi_j(x) dx < \infty,$$

и $\varphi_j(x) \rightarrow 0$ при $|x| \rightarrow \infty$. Пусть набор начальных концентраций $\{\varphi_i\}_{i \in \mathbb{N}}$ в каждой точке $x \in \mathbb{R}$ удовлетворяет локальному соотношению сохранения

$$\sum_{i \in \mathbb{N}} i S_i(f|_{t=0}) = 0.$$

Тогда, если существуют точки (x, t) , в которых величина $\bar{I}(x, t) = +\infty$, то независимо от класса гладкости начальных концентраций решение уравнения (1) с этими начальными данными не может быть гладким по (x, t) для всех $t \geq 0$, $x \in \mathbb{R}$.

Замечание 1. В точках, где $\bar{I}(x, t) = +\infty$, решение задачи Коши (1), (2) имеет особенность типа градиентная катастрофа, т. е. производные обращаются в бесконечность. При этом в указанных точках $S_i(f) = -\infty$ и, следовательно, справедливо неравенство:

$$\sum_{i \in \mathbb{N}} i S_i(f) < 0. \quad (5)$$

Значит, локальное соотношение сохранения (4) с течением времени преобразуется в локальное соотношение диссипации (5).

Перед доказательством теоремы 1 сделаем ряд предварительных утверждений.

Лемма 1. Пусть последовательность непрерывных неотрицательных функций $u_i(x, t)$, $t \geq 0$, $x \in \mathbb{R}$, $i \in \mathbb{N}$ подчиняется неравенствам:

$$u_i(x, t) \leq T_t u_i(., 0) + C_i \int_0^t \sum_{j=1}^{i-1} T_{t-\tau} (u_{i-j}(., \tau) u_j(., \tau)) d\tau, \quad i \in \mathbb{N}, \quad (6)$$

где $\{C_i\}_{i \in \mathbb{N}}$ – монотонно возрастающая последовательность неотрицательных чисел. Положим по определению сумму в правой части неравенства при $i=1$ тождественно равной нулю. Если начальные функции $u_i(x, 0)$ удовлетворяют неравенствам:

$$u_i(x, 0) \leq F_0 = \text{const} < \infty, \quad x \in \mathbb{R}, \quad i \in \mathbb{N},$$

то справедливы соотношения:

$$u_i(x, t) \leq F_0 \exp(F_0 i C_i t), \quad x \in \mathbb{R}, \quad i \in \mathbb{N}, \quad t \geq 0. \quad (7)$$

Доказательство. Утверждение леммы получается методом математической индукции, применяемым по индексу $i \in \mathbb{N}$.

Лемма 2. Пусть выполнены условия предыдущей леммы и в дополнение к ним функции $u_i(x, 0) \rightarrow 0$ при $x \rightarrow \infty \quad \forall i \in \mathbb{N}$. Тогда $u_i(x, t) \rightarrow 0$, $x \rightarrow \infty$, при каждом $i \in \mathbb{N}$ равномерно относительно изменения значений t на любом конечном промежутке в $\mathbb{R}_1^+$.

Доказательство. Утверждение леммы получается методом математической индукции по номеру $i \in \mathbb{N}$.

Лемма 3. Пусть $\{f_i\}_{i \in \mathbb{N}}$ – гладкое неотрицательное решение задачи Коши (1), (2), соответствующее начальным данным, для которых выполнены условия теоремы 1. Тогда при $t \geq 0$ справедливы следующие неравенства:

$$\int_{\mathbb{R}} \sum_{i \in \mathbb{N}} f_i(x, t) dx \leq \int_{\mathbb{R}} \sum_{i \in \mathbb{N}} \varphi_i(x) dx = N_0, \quad (8)$$

$$\int_0^t \sum_{j \in \mathbb{N}} |a - v_j| f_j(x + a\tau, \tau) d\tau \leq 2N_0 \quad \forall a \in \mathbb{R}_1. \quad (9)$$

Замечание 2. Неравенства (8), (9) имеют простой физический смысл. Оценка (8) означает, что в коагулирующей системе число частиц с ростом времени уменьшается, а оценка (9) показывает, что через сечение потока коагулирующих частиц, движущееся со скоростью a вдоль оси Ox , может пройти не более $2N_0$ частиц за время t при монотонной функции v_i , поскольку каждая частица проходит через это сечение не более двух раз.

Доказательство. Получим сначала неравенство (8). Суммируя в (1) по индексу $1 \leq i \leq M$, имеем:

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{i=1}^M f_i(x, t) + \frac{\partial}{\partial x} \sum_{i=1}^M v_i f_i(x, t) \leq 0,$$

ибо $\sum_{i=1}^M S_i(f) \leq 0 \quad \forall M \in N$. Интегрируя это неравенство по времени, получаем:

$$\sum_{i=1}^M f_i(x, t) + \frac{\partial}{\partial x} \sum_{i=1}^M v_i \int_0^t f_i(x, \tau) d\tau \leq \sum_{i \in N} \phi_i(x).$$

Дальнейшее интегрирование по переменной x при $|x| \leq A$ приводит к соотношению:

$$\int_{-A}^A \sum_{i=1}^M f_i(x, t) dx + \sum_{i=1}^M v_i \int_0^t [f_i(A, \tau) - f_i(-A, \tau)] d\tau \leq N_0.$$

Воспользовавшись результатом леммы 2, перейдем к пределу при $A \rightarrow +\infty$. Таким образом,

$$\int_{\square_1} \sum_{i=1}^M f_i(x, t) dx \leq N_0.$$

Переходя к пределу $M \rightarrow \infty$ на основании леммы Б. Леви [6], получаем окончательно неравенство (8).

Теперь установим справедливость оценки (9). Поскольку функция $\{v_i\}_{i \in \square}$ монотонная, то без ограничения общности можно считать ее монотонно возрастающей (в противном случае следует сделать замену переменных $x \mapsto -x$ в уравнении (1)). Итак, при монотонно возрастающей функции v_i в тождестве (1) сделаем замену переменных:

$$t \mapsto t, \quad x \mapsto x + at, \quad a = \text{const},$$

тогда для функций

$$\tilde{f}_i(x, t) \stackrel{\text{def}}{=} f_i(x + at, t), \quad i \in \square$$

имеет место тождество

$$\frac{\partial}{\partial t} \tilde{f}_i + (v_i - a) \frac{\partial}{\partial x} \tilde{f}_i = S_i(\tilde{f}_i), \quad i \in \square. \quad (10)$$

Обозначим i_0 наибольшее значение индекса i , для которого $v_i < a$. Тогда суммированием по номеру i получаем неравенство:

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{i=1}^{i_0} \tilde{f}_i(x, t) + \frac{\partial}{\partial x} \sum_{i=1}^{i_0} (v_i - a) \tilde{f}_i(x, t) \leq 0.$$

После интегрирования обеих частей этого неравенства по времени на промежутке $(0, t)$ и по пространственной переменной на интервале $(x, +\infty)$, учитывая лемму 2, имеем

$$\int_0^t \sum_{i=1}^{i_0} (a - v_i) \tilde{f}_i(x, \tau) d\tau \leq \int_x^{+\infty} \sum_{i \in \square} \varphi_i(\xi) d\xi = N_0^+. \quad (11)$$

Повторим те же рассуждения для сумм по номеру $1 \leq i \leq M$ в соотношении (10), интегрируя теперь по пространственной переменной на промежутке $(-\infty, x)$. Таким образом, получаем:

$$\int_0^t \sum_{i=1}^M (v_i - a) \tilde{f}_i(x, \tau) d\tau \leq \int_{-\infty}^x \sum_{i \in \square} \varphi_i(\xi) d\xi = N_0^-.$$

Полагая $M > i_0$ и учитывая (11), приходим к неравенству:

$$\int_0^t \sum_{i=i_0+1}^M (v_i - a) \tilde{f}_i(x, \tau) d\tau \leq N_0^+ + N_0^- = N_0. \quad (12)$$

Сочетая неравенства (11), (12) и переходя к пределу $M \rightarrow \infty$, устанавливаем справедливость неравенства:

$$\int_0^t \sum_{i \in \square} |v_i - a| \tilde{f}_i(x, \tau) d\tau \leq 2N_0.$$

Возвратимся в этом соотношении к исходным функциям f_i и тем самым получаем (9). Лемма доказана.

Доказательство теоремы 1. Предположим, что при условиях теоремы существует гладкое решение задачи (1), (2) при всех $t \geq 0$, $x \in \square$. Отбрасывая в правой части тождества (1) неотрицательные слагаемые, приходим к неравенству:

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} + v_i \frac{\partial f_i}{\partial x} \geq -f_i \sum_{j=1}^{\infty} \Phi_{i,j} f_j, \quad i \in \square,$$

и, таким образом,

$$f_i(x, t) \geq \bar{f}_i(x, t) \exp \left[- \int_0^t I_i(\xi, \tau) \Big|_{\xi=x-v_i} (t-\tau) d\tau \right],$$

$$i \in \square, \quad t \geq 0.$$

Воспользовавшись неравенством (9) из леммы 3, получаем оценку интеграла:

$$\int_0^t I_i(\xi, \tau) \Big|_{\xi=x-v_i} (t-\tau) d\tau \leq 2N_0, \quad i \in \square,$$

$$t \geq 0, \quad x \in \square,$$

которая в сочетании с предыдущим неравенством приводит к соотношению

$$f_i(x, t) \geq \bar{f}_i(x, t) \exp(-2 \sup_{i,j \in \square} \sigma_{i,j} N_0), \quad i \in \square, \quad t \geq 0, \quad x \in \square. \quad (13)$$

В силу положительности начальных данных f имеем положительность функций $\bar{f}_i$, $i \in \mathbb{N}$, и, значит, $f_i > 0$ при $t \geq 0$. Кроме того, подставляя правую часть оценки (13) в выражение для $I_i(x, t)$, имеем неравенство:

$$I_i(x, t) \geq c_1 \bar{I}_i(x, t),$$

где постоянная $c_1 > 0$ не зависит от $i \in \mathbb{N}$. Итак, в точках, где значения $\bar{I} = +\infty$, значения оператора столкновений

$$S_i(f(x, t)) = -\infty$$

из-за строгой положительности и ограниченности величин f_i . Тем самым доказано, что в указанных точках значение характеристической производной

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} + v_i \frac{\partial f_i}{\partial x} = -\infty, \quad i \in \mathbb{N},$$

т. е. возникает градиентная катастрофа, причем в этих точках

$$\sum_{i \in \mathbb{N}} S_i(f) = -\infty.$$

Теорема доказана.

Возникновение особенностей решения уравнения (1), установленное в теореме 1, обусловлено тем, что значения скорости свободного переноса частиц $\{v_i\}_{i \in \mathbb{N}}$ различные при бесконечном наборе индексов $i \in \mathbb{N}$. В противном случае утверждение теоремы не имеет места, поскольку задача становится практически пространственно однородной (за исключением конечного набора индексов i), и указанный эффект, связанный с перемешиванием частиц из различных точек пространства, взятых в бесконечном количестве, не возникает. Таким образом, рассмотренное явление связано с существенной пространственной неоднородностью кинетической системы и основано на дисперсии скоростей свободного переноса частиц.

Остановимся на построении начальных данных для теоремы 1. Отметим, что значения $\bar{I}$ отыскиваются по формуле:

$$\bar{I}_i(x, t) = \sum_{j=1}^{\infty} \sigma_{i,j} |v_i - v_j| \varphi_j(x - v_j t).$$

Пусть функции $\{\varphi_i\}_{i \in \mathbb{N}}$ являются гладкими, неотрицательными, финитными, причем $\bar{I}_i(x, 0) < \infty \quad \forall i$. Фиксируем $x_0 \in \mathbb{R}$, $t_0 > 0$ и положим, значения начального распределения подчиняются условию:

$$\varphi_i(x_0 + v_i t_0) = 1, \quad i \in \mathbb{N},$$

считая при этом последовательность v_i строго монотонно возрастающей; ширину носителя функции φ_i подберем так, чтобы сходились все интегралы, указанные в формулировке теоремы 1. Очевидно, что при таком выборе начальных данных в точке (x_0, t_0) значение $\bar{I}_i(x_0, t_0) = +\infty$. Естественно, от финитности φ_i можно легко отказаться, заменяя это требование на строгую положительность и достаточно быстрое стремление к нулю $\varphi_i(x)$ при $x \rightarrow \infty$. Для ограниченных монотонных скоростей свободного переноса частиц можно указать на-

чальные данные, удовлетворяющие условиям теоремы 1, когда функция $\bar{I} = +\infty$ на линии, выходящей из (x_0, t_0) и трансверсальной к характеристическим направлениям уравнения (1).

Подчеркнем еще раз, что приведенная конструкция основана на дисперсии скоростей свободного переноса для бесконечного набора индексов $i \in \mathbb{N}$. Возникающие при этом особенности спектров обусловлены взаимодействием свободного переноса и столкновений частиц, что связано с нарушением соотношения сохранения.

Имитационная модель

Множество пространственных координат Ox разобьем на ячейки $D_l = [x_l, x_{l+1})$, $x_l = lh$, $l \in \mathbb{N}$, $h > 0$, среди которых размещены частицы, занумерованные натуральными числами $1 \leq i \leq N$, $N \geq 1$. Каждому номеру i соответствует величина $m_i^{(l)}(t)$, которая равна массе i -й частицы, если она находится в момент времени t в ячейке D_l , и $m_i^{(l)}(t) = 0$ в противном случае. Если $m_i^{(l)}(t) = 0$ для всех ячеек, то частица с номером i отсутствует в системе. Условимся, если частица присутствует в системе, то она может находиться в данный момент времени только в одной ячейке. Таким образом, в каждый момент времени состояние системы задается распределением масс $M(t) = \{m^{(l)}(t)\}_{l \in \mathbb{N}}$, где $m^{(l)}(t) = (m_1^{(l)}(t), m_2^{(l)}(t), \dots, m_N^{(l)}(t))$.

Пусть значения времени t принимают дискретные значения $t_n = n\tau$, $n \in \mathbb{N}^+$, $\tau > 0$.

Частицы, помещенные в ячейку D_l в момент времени t_n , могут участвовать в парных взаимодействиях, приводящих к их коагуляции. Акты парных столкновений и коагуляции разыгрываются следующим образом.

Рассмотрим множество Δ , состоящее из пар номеров (i, j) , $1 \leq i < j \leq N$. В каждой ячейке D_l в момент времени t_n разыгрываются независимые случайные величины $\pi_l^{(s)}(t_n)$ со значениями в Δ так, что $P\{\pi_l^{(s)}(t_n) = (i, j)\} = 1/C_N^2$, $1 \leq s \leq Q(N)$. Возможные пары сталкивающихся частиц в ячейке D_l в момент времени t_n выберем как значения набора $\{\pi_l^{(s)}(t_n)\}_{s=1}^{Q(N)}$, накладывая дополнительное ограничение: если хотя бы один из номеров, входящих в пару $\pi_l^{(s)}(t_n)$ при $s \geq 2$, входит в одну из пар $\pi_l^{(1)}(t_n), \dots, \pi_l^{(s-1)}(t_n)$, то для пары $\pi_l^{(s)}(t_n)$ коагуляция в ячейке D_l в момент времени t_n не происходит. Тем самым исключаются многократные взаимодействия для каждой частицы внутри ячеек.

Возможность коагуляции для выбранных вышеуказанным способом пар номеров сталкивающихся частиц определим розыгрышем совокупности независимых случайных величин $\eta_{(i,j)}^{(l)}(t_n)$, $l \in \mathbb{N}$, $(i, j) \in \Delta$, принимающих два значения: 0 и 1. Значение 0 означает запрет коагуляции, а 1 – наличие коагуляции для пары частиц с номерами (i, j) в ячейке D_l в момент времени t_n . Розыгрыш этих значений подчиним следующим правилам. Положим, что $\eta_{(i,j)}^{(l)}(t_n) = 0$, если $m_i^{(l)}(t_n)m_j^{(l)}(t_n) = 0$, т. е. при отсутствии, по крайней мере, одной из частиц в паре коагуляция не происходит. Если $m_i^{(l)}(t_n)m_j^{(l)}(t_n) > 0$, то значения случайной величины $\eta_{(i,j)}^{(l)}(t_n)$ задаются условной функцией распределения:

$$P\left\{\eta_{(i,j)}^{(l)}(t_n) = 1\right\} = \Phi_{m_i^{(l)}(t_n), m_j^{(l)}(t_n)},$$

$$P\left\{\eta_{(i,j)}^{(l)}(t_n) = 0\right\} = 1 - \Phi_{m_i^{(l)}(t_n), m_j^{(l)}(t_n)},$$

где $0 \leq \Phi_{k_1, k_2} = \Phi_{k_2, k_1} \leq 1$ – вероятность коагуляции сталкивающейся пары частиц с массами k_1 и k_2 .

Если пара $(i, j) \in \Delta$ выбрана и значение $\eta_{(i, j)}^{(l)}(t_n) = 1$, то значение вектора состояния $m^{(l)}(t_n)$ преобразуется по следующему правилу:

$$m_\alpha^{(l)}(t_n) \mapsto \bar{m}_\alpha^{(l)}(t_n) = m_\alpha^{(l)}(t_n), \quad \alpha \neq i,$$

$$m_i^{(l)}(t_n) \mapsto \bar{m}_i^{(l)}(t_n) = m_i^{(l)}(t_n) + m_j^{(l)}(t_n)$$

$$m_j^{(l)}(t_n) \mapsto \bar{m}_j^{(l)}(t_n) = 0.$$

Если же $\eta_{(i, j)}^{(l)}(t_n) = 0$, то значения $m_\alpha^{(l)}(t_n)$, $1 \leq \alpha \leq N$ остаются неизменными. Указанная процедура выполняется для всех пар выбранных номеров последовательным перебором $\pi_1^{(l)}(t_n), \dots, \pi_{Q(N)}^{(l)}(t_n)$.

После проведения перечисленных розыгрышей во всех ячейках, содержащих частицы, переходим к выборочному вероятностному пространству [7, 8], в котором все построенные выше случайные величины являются независимыми без изменения их функций распределения.

Обозначим $F_{i, k}^{(l)}(t_n) = P\{m_i^{(l)}(t_n) = k\}$. Для пары $\pi = (i, j) \in \Delta$ положим $\min \pi = i$, $\max \pi = j$.

Рассмотрим числа заполнения ячейки D_l частицами массы $k \in \square$:

$$N_k^{(l)}(t_n) \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{i=1}^N \delta_{k, m_i^{(l)}(t_n)}.$$

Вышеуказанной процедуре розыгрыша актов коагуляции сталкивающихся частиц в ячейке D_l соответствует следующее преобразование чисел заполнения $N_k^{(l)}(t_n) \mapsto \bar{N}_k^{(l)}(t_n)$:

$$\begin{aligned} \bar{N}_k^{(l)}(t_n) = & N_k^{(l)}(t_n) + \sum_{(i, j) \in \Delta} \sum_{s=1}^{Q(N)} \delta_{\pi_l^{(s)}(t_n), (i, j)} \prod_{q=1}^{s-1} (1 - \delta_{\min \pi_l^{(q)}(t_n), i}) \times \\ & \times (1 - \delta_{\max \pi_l^{(q)}(t_n), i}) (1 - \delta_{\min \pi_l^{(q)}(t_n), j}) (1 - \delta_{\max \pi_l^{(q)}(t_n), j}) \times \\ & \times \eta_{(i, j)}^{(l)}(t_n) \left\{ \sum_{\alpha+\beta=k} \delta_{\alpha, m_i^{(l)}(t_n)} \delta_{\beta, m_j^{(l)}(t_n)} - \delta_{k, m_i^{(l)}(t_n)} \sum_{\beta=1}^{\infty} \delta_{\beta, m_j^{(l)}(t_n)} - \delta_{k, m_j^{(l)}(t_n)} \sum_{\alpha=1}^{\infty} \delta_{\alpha, m_i^{(l)}(t_n)} \right\}. \end{aligned}$$

Все суммы здесь состоят из конечного числа ненулевых слагаемых.

Пространственный перенос

После завершения розыгрыша актов коагуляции во всех ячейках, содержащих частицы, осуществляется перемещение частиц между ячейками. Положим, что $v_k \in \square$ – скорость пространственного переноса частицы массы $k \in \square$. Размер пространственных ячеек h и шаг по времени τ подчиним условию $\tau h^{-1} = 1$. Тогда частицы массы k за время τ перемещаются из ячейки D_l в ячейку D_{l+v_k} . Тем самым определяется состояние системы в

момент времени t_{n+1} . Очевидно, $N_k^{(l)}(t_{n+1}) = \bar{N}_k^{(l-v_k)}(t_n)$.

Далее вновь разыгрываются акты коагуляции, осуществляется пространственный перенос и т. д. Таким образом, полностью определена эволюция системы для всех $t_n \geq 0$.

Обозначим величиной $\langle N_k^{(l)}(t_n) \rangle$ среднее число частиц массы k в ячейке D_l в момент времени $t_n \geq 0$. Положим

$$u_{k,N}^{(l)}(t_n) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\langle N_k^{(l)}(t_n) \rangle}{Nh}$$

– средняя концентрация частиц массы k в ячейке D_l в момент времени t_n .

Теорема 2. Пусть вероятность слияния частиц Φ_{k_1,k_2} является финитной функцией, т. е. $\Phi_{k_1,k_2} = 0$ при $k_1 \geq M_0$ или $k_2 \geq M_0$. Тогда средние концентрации $u_{k,N}^{(l)}(t_n)$ подчиняются разностному уравнению

$$u_{k,N}^{(l)}(t_{n+1}) = u_{k,N}^{(l-v_k)}(t_n) + \tau S_k^{(M_0)}(u_{\bullet,N}^{(l-v_k)}(t_n)) + \tau O(h^{-2}(N-1)^{-1}),$$

$$N \geq 2,$$

где оценка O является равномерной относительно t_n , $S_k^{(M_0)} = I_k^{(M_0)} S_k(I^{(M_0)} \cdot u)$, где $I_k^{(M_0)}$ – индикатор натуральных чисел, не превосходящих M_0 .

Следствие. Пусть выполнены условия теоремы 2 и существует $\lim_{N \rightarrow \infty} u_{k,N}^{(l)}(0) = u_k^{(l)}(0)$.

Предположим, что $\frac{Q(N)}{N} \rightarrow \infty$ при $N \rightarrow \infty$. Тогда при каждом $t_n \geq 0$ существует $\lim_{N \rightarrow \infty} u_{k,N}^{(l)}(t_n) = u_k^{(l)}(t_n)$, подчиняющийся разностному уравнению:

$$u_k^{(l)}(t_{n+1}) = u_k^{(l-v_k)}(t_n) + \tau S_k^{(M_0)}(u_{\bullet}^{(l-v_k)}(t_n)). \quad (14)$$

Теорема 3. Пусть начальные функции (2) являются гладкими, а начальные значения в разностном уравнении (14) согласованы с (2) так, что

$$u_k^{(l)}(0) = \phi_k(x_l) \geq 0, \quad 1 \leq k \leq M_0. \quad (15)$$

Тогда при условии $\tau h^{-1} = 1$ разностная схема (14), (15) сходится к единственному гладкому неотрицательному решению задачи Коши:

$$\frac{\partial u_{k,M_0}(x,t)}{\partial t} + v_k \frac{\partial u_{k,M_0}(x,t)}{\partial x} = S_k^{(M_0)}(u_{\bullet,M_0}(x,t)), \quad x \in \square, \quad t \geq 0, \quad 1 \leq k \leq M_0, \quad (16)$$

$$u_{k,M_0}(x,0) = u_k^0(x) \quad 1 \leq k \leq M_0, \quad x \in \square. \quad (17)$$

Методами работ [9, 10] можно показать, что в случае выполнения условий

$$0 \leq \Phi_{k_1,k_2} = \Phi_{k_2,k_1} \leq 1, \quad k_1, k_2 \in \square,$$

$$\Phi_{k,k} = 0, \quad k \in \square,$$

из последовательности решений задачи Коши (16), (17) можно выделить подпоследовательность, слабо сходящуюся к обобщенному решению задачи Коши (1), (2).

Аналогичным образом за счет выбора соотношения $h\tau^{-1} \in \square$ вышеуказанные результаты можно распространить на скорости переноса с рациональными значениями, а далее за счет непрерывной зависимости решений задачи (16), (17) от v_k – на все действительные значения скорости переноса.

Тестирование модели пространственно неоднородной медленной коагуляции

Моделирование пространственно неоднородной коагуляции реализовывалось на основе программы NUSMOL. На рис. 1, 2 приведены расчеты в случае вероятности слияния пары частиц $\Phi=1$, шаг по времени $\tau=0.02$, шаг по пространственной переменной $h=0.02$, скорость пространственного переноса $v_k=k$. В системе 25 000 частиц, на каждом шаге по времени в каждой ячейке разыгрывалось 30 000 повторных испытаний. Выведены значения концентраций при значениях $k=1, 2$ на отрезке времени от 0.0 до 0.7 (слева). Справа выведена пространственная развертка значений концентраций в расчетной области от 0 до 2. Белые точки – результат розыгрыша Монте-Карло, красные точки – расчет по разностной схеме решения задачи Коши для пространственно-неоднородного уравнения Смолуховского (1). На верхнем графике представлена суммарная концентрация частиц. Графики временной развертки концентраций при значениях $k=1, 2$ приведены для точки наблюдения $x=1.3$.

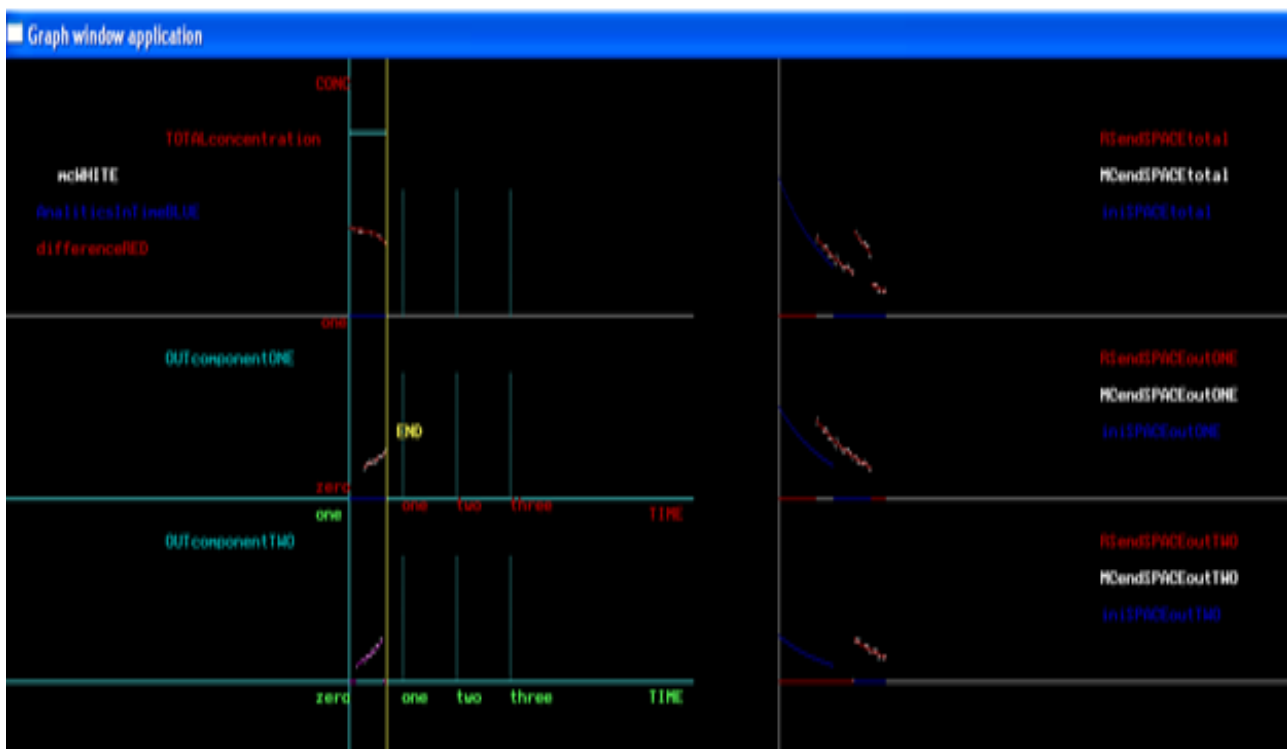


Рис. 1. Расчет по программе NUSMOL для пространственно неоднородной коагуляции

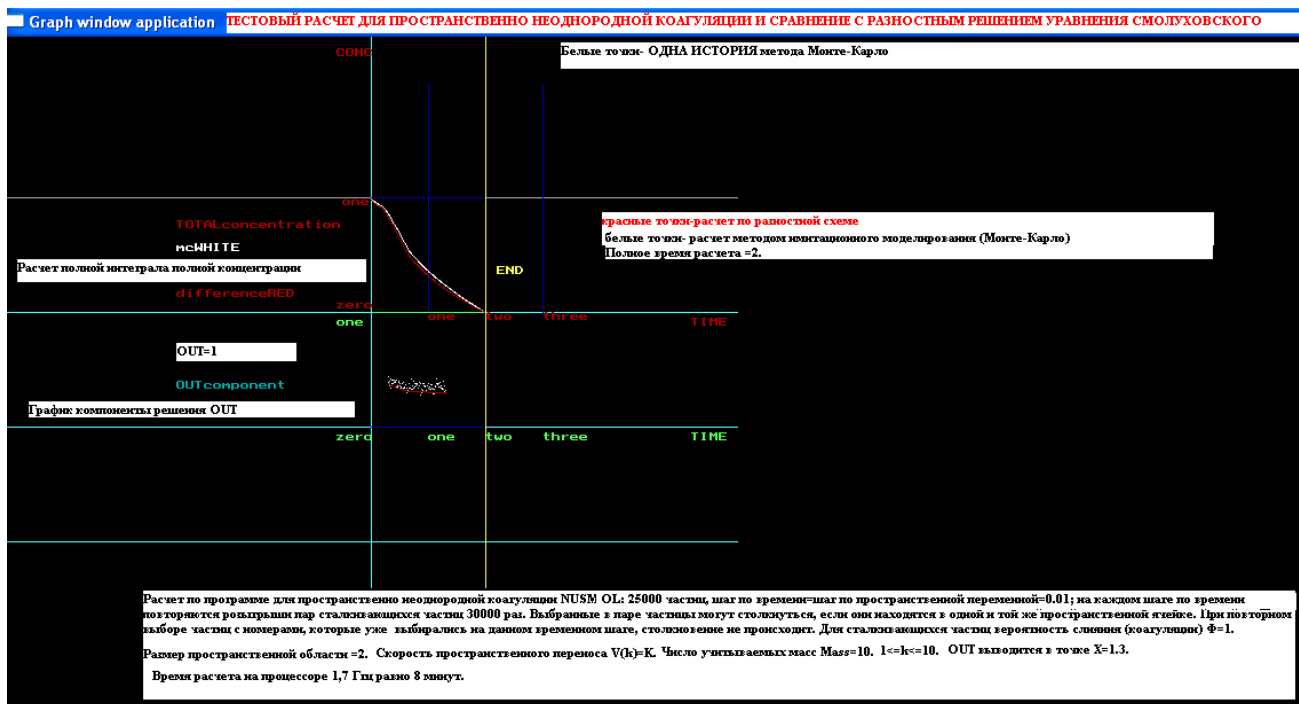


Рис. 2. Расчет по программе NUSMOL для пространственно неоднородной коагуляции

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 15-41-00013 –урал_a.

Литература

1. Шпильман А. В. Геологическое строение и нефтегазоносность баженовской свиты Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции // Математика и информационные технологии в нефтегазовом комплексе. Избранные труды. Сургут, 2017. С. 146–153.
2. Волощук В. М., Седунов Ю. С. Процессы коагуляции в дисперсных системах. Л. : Гидрометеиздат, 1975. 320 с.
3. Волощук В. М. Кинетическая теория коагуляции. Л. : Гидрометеиздат, 1984.
4. Иванов И., Платицанов Д. Коллоиды. Л. : Химия, 1975. 152 с.
5. Иванов Н. В., Пискунов В. Н. Моделирование процессов переноса и осаждения аэрозольных частиц методом Монте-Карло // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Математическое моделирование физических процессов. 1991. Вып. 2. С. 73–78.
6. Колмогоров А. Н., Фомин С. В. Элементы теории функций и функционального анализа. М. : Наука, 1972. 496 с.
7. Розанов Ю. А. Теория вероятностей, случайные процессы и математическая статистика. М. : Наука, 1985. 320 с.
8. Галкин В. А. Сходимость разностных схем и метода непосредственного моделирования к решениям уравнения Смолуховского кинетической теории коагуляции // Доклады РАН. 2004. № 1. С. 4–11.
9. Галкин В. А. Обобщенное решение уравнения Смолуховского для пространственно неоднородных систем // ДАН СССР. 1987. Т. 293. № 1. С. 74–77.
10. Галкин В. А. Уравнение Смолуховского. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2001. 336 с.

УДК 796.01:612.746.4

ГИПОТЕЗА Н. А. БЕРНШТЕЙНА И СТАТИСТИЧЕСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ВЫБОРОК ПАРАМЕТРОВ ТРЕМОРОГРАММ

В. В. Еськов, В. М. Еськов, Ю. В. Вохмина

Сургутский государственный университет, firing.squad@mail.ru

В рамках статистического подхода рассматривается статистическая неустойчивость подряд получаемых выборок одной и той же биосистемы, находящейся в неизменном гомеостазе. Показывается, что матрицы парных сравнений выборок параметров x_i всего вектора состояния биосистемы $x = x(t) = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ демонстрируют неустойчивость статистических функций распределения $f(x)$ (т. е. $f_j(x_i) = f_{j+1}(x_i)$). Одновременно демонстрируется статистическая устойчивость числа k совпадающих (статистически) пар сравнения выборок x_i . При этом вероятность P получить две совпадающие подряд выборки x_i крайне мала ($P \leq 0,05$) для любых повторяющихся процессов гомеостатических систем.

Ключевые слова: неустойчивость выборок, матрицы парных сравнений, тремор.

N. A. BERNSTEIN HYPOTHESIS AND STATISTICAL SAMPLINGS INSTABILITY OF TREMOROGRAPH'S PARAMETERS

V. V. Eskov, V. M. Eskov, Yu. V. Vokhmina

Surgut State University, firing.squad@mail.ru

The statistical instability of successive samplings of the same biological system in continuing homeostasis is studied within the statistical approach. It is shown that matrices of pairwise comparisons of parameters samplings x_i of biosystem state vector $x = x(t) = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ demonstrate the instability of statistical functions distribution $f(x)$ (i.e., $f_j(x_i) = f_{j+1}(x_i)$). At the same the statistical stability is demonstrated by the number k and statistically matched pairs of samples x_i . The probability P of obtaining two coincident successive samplings x_i is extremely low ($P \leq 0.05$) for any repetitive processes of homeostatic systems.

Keywords: samplings instability, pairwise comparison matrices, tremor.

Введение

Выдающийся биомеханик 20-го века Н. А. Бернштейн [18] 70 лет назад (1947 г.) высказал гипотезу о «повторении без повторений». Однако за этот долгий период в естествознании и математике практически никто не пытался проверить эту гипотезу не только в биомеханике, но и во всем естествознании в целом. Год спустя W. Weaver [29] представил научному миру *системы третьего типа* (далее – СТТ), живые системы, но в отношении СТТ до настоящего времени также нет формального математического аппарата. Появление теории динамического хаоса Лоренца также не внесло ясность в наши представления об особых свойствах живых систем, СТТ-complexity [1–10].

Два нобелевских лауреата (I. R. Prigogine [28] и M. Gell-Mann [26]) представляли *complexity* как объекты динамического хаоса Лоренца, но это было глубоким заблуждением [19–25]. Для аттракторов Лоренца характерно равномерное распределение, когда две соседние выборки любого компонента x_i вектора состояния сложной системы $x = x(t) = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ в m -мерном фазовом пространстве состояний (ФПС) могут показать статистическое совпадение. В этом случае их статистические функции распределения $f(x)$ совпадают, т. е. $f_j(x_i) = f_{j+1}(x_i)$. В этом случае эти две j -я и $j+1$ -я выборки можно отнести к одной генеральной совокупности

(в дальнейшем мы для упрощения (кратности) будем говорить о совпадении двух соседних выборок сложной биосистемы – СТТ) [11–15, 27, 30].

До настоящего времени в биологии, медицине, экологии, психологии и многих других (неточных) науках ученые были убеждены, что для биосистемы в одном (неизменном) гомеостазе всегда будет выполняться для j -й и $j+1$ -й выборки x_i их равенство статистических функций $f(x)$ (т. е. должно быть $f_j(x_i) = f_{j+1}(x_i)$). Однако, реальное поведение любых параметров организма человека x_i (его гомеостаза) этого продемонстрировать не может. Мы имеем статистическую неустойчивость СТТ-*complexity* и $f_j(x_i) \neq f_{j+1}(x_i)$ для любого x_i биосистемы, находящейся в неизменном гомеостазе. Одинаковое состояние биосистемы (гомеостаз) не может демонстрировать устойчивость x_i , две соседние выборки (в одном, неизменном состоянии организма человека) не совпадают (статистически) с вероятностью $P \geq 0,95$ (в биомеханике обычно $P \geq 0,99$). Получить совпадение сразу трех выборок подряд (т. е. $f_j(x_i) = f_{j+1}(x_i) = f_{j+2}(x_i)$) имеет вероятность $P < 10^{-5}$ и менее. Это означает окончание применения статистических методов в биомедицине, психологии, экологии и других науках о живых системах (включая и науки о мозге, т. е. при изучении нейросетей мозга нет статистических повторений) [11–17] из-за статистической неустойчивости выборок x_i .

Какие тогда законы необходимо применять к биосистемам (СТТ-*complexity*), если и динамический хаос не работает? Можно ли вообще использовать статистические и детерминистские (функциональный анализ) модели в отношении СТТ и если можно, то как? Ответы на эти вопросы на примере биомеханики (в организации произвольных движений – тремора) мы представляем в настоящем сообщении.

Статистическая неустойчивость СТТ-*complexity*

Н. А. Бернштейн 70 лет назад декларировал «повторение без повторения», но доказательств этому и статистического описания неустойчивости СТТ-*complexity* им не было представлено [1]. Он доказывал тогда, что в организации движений участвует как минимум 5 систем и их роль непрерывно (и хаотически) изменяется. Тридцать лет назад (в связи с построением компартментно-кластерной теории нейросетей мозга [20–23]) мы начали исследование эффекта «без повторений», в основе которого лежат многократные повторения регистрации биопотенциалов нервов и мышц, а также регистрация треморограмм (ТМГ) и теппинграмм (ТПГ) у одного и того же испытуемого, находящегося в одном, неизменном гомеостазе [19–25, 27, 30].

Согласно центральной доктрине биомедицины – две подряд зарегистрированные выборки любых параметров x_i гомеостаза человека (находящегося в неизменном гомеостазе) должны совпадать [5–15]. Например, европейская ассоциация кардиологов рекомендует регистрировать кардиоинтервалы (КИ) или электрокардиограммы не менее 5 минут. При этом мы получаем выборку из 300 КИ и она считается репрезентативной (характеризует работу сердца пациента). Однако в действительности этого нет, мы не можем получить подряд две статистически одинаковые выборки КИ (при большом числе повторов n регистрации КИ, $n = 300$), т. е. чтобы $f_j(x_i) = f_{j+1}(x_i)$. С вероятностью $p \geq 0.95$ мы будем иметь неравенство $f_j(x_i) \neq f_{j+1}(x_i)$ и это доказывает статистическую неустойчивость КИ, ТМГ, ТПГ и других параметров организма человека [9–18]. До настоящего времени биомедицина работала с уникальными (неповторимыми) выборками параметров гомеостаза x_i человека [14–17].

В качестве примера мы представляем характерную матрицу (из нескольких тысяч нами рассмотренных подобных) парных сравнений 15-ти выборок ТМГ, которые получены подряд у одного испытуемого, находящегося в одном (неизменном) гомеостазе. Регистрировалось положение конечности (пальца) по вертикали (x_1) за интервал времени $t = 5$ сек с периодом квантования τ получаемого аналогового сигнала с датчика расстояния $x_1 \tau = 0,01$ сек. Таким образом, каждая выборка содержала по 500 точек и эти 15 выборок сравнивались попарно. Результат такого статистического сравнения (использовался критерий Вилкоксона) представлен в виде матрицы (табл. 1), которая имеет всего 105 независимых пар сравнения (она симметрична и диагональные элементы отбрасываются).

Из табл. 1 следует, что мы имеем $k = 3$ – число пар выборок x_i , которые (эти две) можно отнести к одной генеральной совокупности (будем называть их статистически одинаковыми). Тогда вероятность p совпадения выборок x_i в данном примере $P = 3/105 < 0,03$. Напомним, что в биологии используется доверительная вероятность $P_1 = 0,95$, которая требует, например, попадания в доверительный интервал с частотой (в эксперименте при повторениях опыта) $P^* \geq 0,95$. У нас обратная зависимость, с частотой $P_1 > 0,97$ две любые выборки не совпадают из общей серии экспериментов. Еще более сложная ситуация с повторами. В нашем примере (табл. 1) мы имеем совпадение подряд получаемых выборок с частотой $P_2 < 0,01$. В этом случае (с $P_2 < 0,01$) мы можем говорить о том, что $f_j(x_i) = f_{j+1}(x_i)$, т. е. статистической неустойчивости в подряд получаемых выборках x_i .

Таблица 1

Матрица парного сравнения треморограмм испытуемого ФДЮ (без нагрузки, число повторов $N = 15$), использовался критерий Вилкоксона (значимость различий выборок $P < 0,05$, число совпадений $k = 3$)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00		0,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,69		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,70
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00
13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00
14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00
15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,70	0,00	0,00	0,00	

При таких частотах P говорить о возможности повторения опыта (подряд и произвольно) – бессмысленно (обычно для ТМГ $P_2 \leq 0,01$!) [20–25]. С чем тогда работает биология и медицина, с уникальными (неповторяющимися подряд) выборками x_i ? С позиции расчета матриц парных сравнений выборок x_i , получаемых в одинаковом эксперименте (с одним испытуемым, находящимся в неизменном гомеостазе), мы произвели многократные измерения ТМГ (в неизменном гомеостазе). Были получены серии опытов по $N = 15$ матриц (подобных табл. 1) с 15-ю выборками x_i в каждой такой матрице сравнения выборок ТМГ. Рассмотрим статистический итог таких исследований.

Статистическая закономерность повторения k в неизменном гомеостазе

Если у одного и того же человека повторять по 15 серий регистрации ТМГ (с 15-ю выборками ТМГ в каждой серии), то выясняются статистические закономерности в регистрируемых значениях k в каждой серии экспериментов. Значение числа k совпадений выборок x_i в каждой матрице (подобной табл. 1) группируются вокруг некоторого среднего значения $\langle k_i \rangle$, которое характеризует данного испытуемого, находящегося в данном гомеостазе. При изменении гомеостаза (например, охлаждение конечности или при статической физической нагрузке в $F = 3H$) мы будем получать другие значения $\langle k_2 \rangle$.

В табл. 2 мы представляем один из результатов таких многократных повторных измерений ТМГ у одного испытуемого, находящегося в одном неизменном состоянии (гомеостазе). Здесь (табл. 2) представлены результаты 15-ти серий расчета выборок ТМГ (по 15 выборок в одной серии) для испытуемого без нагрузки на конечность (палец, $F_1 = 0$) и при нагрузке

ке в 3 ньютона ($F_2 = 3H$). Очевидно различие в величинах среднего значения $\langle k_1 \rangle = 2,93$ при $F_1 = 0H$ и при нагрузке $F_2 = 3H$, когда $\langle k_2 \rangle = 5,67$.

Таблица 2

Число совпадений (k) выборок ТМГ в матрицах парного сравнения треморограмм испытуемого ФДЮ (использовался критерий Вилкоксона, $P < 0,05$ при $N = 15$ повторях измерений ТМГ)

	Без нагрузки	В условиях нагрузки 300 г
1	2	5
2	2	8
3	1	8
4	2	6
5	1	7
6	4	6
7	4	4
8	4	4
9	3	2
10	9	5
11	3	10
12	1	5
13	2	5
14	5	4
15	1	6
$\langle k \rangle$	2,93	5,67
$\sigma, \pm$	2,13	1,99

Подчеркнем, что значение $\langle k_1 \rangle$ и $\langle k_2 \rangle$ зависят от физического состояния испытуемого и от самого испытуемого (физически тренированный человек всегда показывает $k_{тр} < k_{нтр}$, где $k_{нтр}$ – число k у нетренированного испытуемого). Таким образом, при многократных повторениях одного и того же опыта с одним испытуемым мы не наблюдаем статистической устойчивости выборок ($f_j(x_i) \neq f_{j+1}(x_i)$ произвольно), но числа k совпадений пар выборок x_i в матрицах парного сравнения могут демонстрировать определенную устойчивость, и мы можем работать с сериями экспериментов для проверки гипотезы Н. А. Бернштейна в биомеханике. Однако, такая процедура весьма трудоемкая (требует много времени) и вряд ли она будет использована в биомеханике, психологии, экологии и других науках о живых системах. Для практических целей сейчас мы разработали аналог принципа неопределенностей Гейзенберга (квантовая механика) [1–5, 19–25]. В этом случае мы переходим от равенства к неравенству и работаем с вариационными размахами регистрируемых переменных x_i , описывающих гомеостаз организма человека [6–13]. Однако это уже другая область науки, которая уходит из стохастики и переходит к неопределенностям 1-го и 2-го типа для любых СТТ-complexity [19, 27, 30] и которые основаны на моделях в рамках компартментно-кластерной теории биосистем [21–25].

Выводы

1. Гипотеза Н. А. Бернштейна в биомеханике перешла в эффект Еськова – Зинченко, когда наблюдается статистическая неустойчивость для подряд получаемых выборок x_i в неизменном гомеостазе (для одного человека). В этом случае получать статистическое совпадение подряд получаемых выборок x_i (т. е. чтобы $f_j(x_i) = f_{j+1}(x_i)$) можно с частотой $P_1^* \leq 0,01$ для тремора и $P_2^* \leq 0,04$ для теппинга. Мы имеем статистическую неустойчивость

гомеостатических систем и выборки x_i являются уникальными (а для уникальных систем современная детерминистско-стохастическая наука не применима, по утверждению I. R. Prigogine [28]).

2. При многократных повторях регистрации выборок x_i в одинаковом эксперименте (испытуемый находится в неизменном гомеостазе) можно регистрировать статистическую устойчивость средних значений $\langle k \rangle$ числа статистических совпадений выборок x_i в получаемых матрицах парного сравнения выборок. В этом случае $\langle k \rangle$ характеризует гомеостаз конкретного человека, находящегося в особых (конкретных) условиях. При изменении гомеостаза изменяется и $\langle k \rangle$, что можно использовать в биомеханических исследованиях (когда выборки x_i – уникальны).

Литература

1. Баженова А. Е., Повторейко В. В., Басова К. А., Картополенко Р. О. Эффект Еськова – Зинченко в описании хаотической динамики параметров нервно-мышечной системы // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2017. № 1. С. 50–56.
2. Белощенко Д. В., Баженова А. Е., Щипицин К. П., Королев Ю. Ю. Эффект Еськова – Зинченко в организации произвольных движений человека в режиме повторения // Вестн. новых мед. тех. 2017. Т. 24. № 1. С. 29–35.
3. Белощенко Д. В., Майстренко Е. В., Живаева Н. В., Алиев Н. Ш. Хаотическая динамика параметров нервно-мышечной системы у мужчин при многократных повторениях // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2017. № 1. С. 5–11.
4. Белощенко Д. В., Якунин В. Е., Потетюрин Е. С., Королев Ю. Ю. Оценка параметров электромиограмм у женщин при разном статическом усилии в режиме повторения // Клиническая медицина и фармакология. 2017. Т. 3. № 1. С. 26–31.
5. Берестин Д. К., Глазова О. А., Камалтдинова К. Р., Гимадиев Б. Р. Изменение квазиаттракторов треморограмм испытуемых при воздействии холодового стресса // Вестн. новых мед. тех. Электронное издание. 2017. № 3. Публикация 1–6. URL: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2017-3/1-6.pdf> (дата обращения: 19.09.2017). doi: 10.12737/article_59c4b40a7a8642.40010321.
6. Берестин Д. К., Курманов И. Г., Самсонов И. Н., Колосова А. И. Квазиаттракторы треморограмм при влиянии различных статических нагрузок // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2017. № 3. С. 83–89. doi: 10.12737/article_59df74fb6b9b71.44443762.
7. Берестин Д. К., Шейдер А. Д., Курманов И. Г., Самсонов И. Н. Стохастический анализ треморограмм при воздействии холодового стресса на испытуемых различной степени тренированности // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2017. № 4. С. 59–65.
8. Болтаев А. В., Газя Г. В., Хадарцев А. А., Синенко Д. В. Влияние промышленных электромагнитных полей на хаотическую динамику параметров сердечно-сосудистой системы работников нефтегазовой отрасли // Экология человека. 2017. № 8. С. 3–7.
9. Гавриленко Т. В., Горбунов Д. В., Гимадиев Б. Р., Чертищев А. А. Граница применимости теоремы Гленсдорфа-Пригожина в описании биомеханических систем // Вестн. новых мед. тех. Электронное издание. 2017. № 1. Публикация 1–9. URL: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2017-1/1-9.pdf> (дата обращения: 22.03.2017). doi: 12737/25235.
10. Гавриленко Т. В., Горбунов Д. В., Чертищев А. А. Теорема Гленсдорфа – Пригожина и эффект Еськова – Зинченко в оценке параметров треморограмм // Вестн. новых мед. тех. 2017. Т. 24. № 2. С. 16–21. doi:10.12737/article_5947ca1ae38667.3077216.
11. Галкин В. А., Филатова О. Е., Журавлева О. А., Шелим Л. И. Новая наука и новое понимание гомеостатических систем // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2017. № 1. С. 75–86.
12. Денисова Л. А., Белощенко Д. В., Шейдер А. Д., Горбунов Д. С., Королев Ю. Ю. Эффект Еськова – Зинченко в анализе нервно-мышечной системы человека // Вестн. новых

мед. тех. Электронное издание. 2017. № 4. Публикация 1–3 URL: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2017-4/1-3.pdf> (дата обращения: 21.12.2017).

13. Мирошниченко И. В., Баженова А. Е., Белощенко Д. В., Потетюрина Е. С. Эффект Еськова – Зинченков в условиях локального холодового воздействия // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2017. № 2. С. 13–17.

14. Филатова Д. Ю., Веракса А. Н., Берестин Д. К., Стрельцова Т. В. Стохастическая и хаотическая оценка состояния нервно-мышечной системы человека в условиях холодового воздействия // Экология человека. 2017. № 8. С. 15–20.

15. Филатова О. Е., Майстренко Е. В., Болтаев А. В., Газя Г. В. Влияние промышленных электромагнитных полей на динамику сердечно-сосудистых систем работников нефтегазового комплекса // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21. № 7. С. 46–51.

16. Широков В. А., Томчук А. Г., Роговский Д. А. Стохастический и хаотический анализ вертеброневрологических показателей пациентов при остеохондрозе позвоночника в условиях севера // Клиническая медицина и фармакология. 2017. Т. 3. № 1. С. 34–38.

17. Яхно В. Г., Белощенко Д. В., Баженова А. Е., Башкатова Ю. В. Парадокс Еськова – Филатовой в оценке параметров биосистем // Вестн. новых мед. тех. 2017. Т. 24. № 3. С. 20–26. doi:10.12737/article_59c49ca69df199.85201052.

18. Bernstein N. A. The coordination and regulation of movements. Oxford : Pergamon Press, 1967.

19. Betelin V. B., Eskov V. M., Galkin V. A., Gavrilenko T. V. Stochastic Volatility in the Dynamics of Complex Homeostatic Systems // Doklady Mathematics. 2017. Vol. 95. No. 1. P. 92–94.

20. Eskov V. V., Gavrilenko T. V., Eskov V. M., Vochmina Yu. V. Phenomenon of statistical instability of the third type systems – complexity // Technical Physics. 2017. Vol. 62. № 11. P. 1611–1616.

21. Eskov V. M., Bazhenova A. E., Vochmina U. V., Filatov M. A., Ilyashenko L. K. Bernstein hypothesis in the description of chaotic dynamics of involuntary movements of person // Russian Journal of Biomechanics. 2017. Vol. 21. № 1. P. 14–18.

22. Eskov V. M., Eskov V. V., Gavrilenko T. V., Vochmina Yu. V. Formalization of the Effect of “Repetition without Repetition” discovered by N. A. Bernshtein // Biophysics. 2017. Vol. 62. № 1. P. 143–150.

23. Eskov V. M., Eskov V. V., Vochmina Y. V., Gorbunov D. V., Ilyashenko L. K. Shannon entropy in the research on stationary regimes and the evolution of complexity // Moscow University Physics Bulletin. 2017. № 72 (3). P. 309–317.

24. Filatova O. E., Eskov V. V., Filatov M. A., Ilyashenko L. K. Statistical instability phenomenon and evaluation of voluntary and involuntary movements // Russian Journal of Biomechanics. 2017. Vol. 21. № 3. P. 224–232.

25. Gavrilenko T. V., Eskov V. M., Khadartsev A. A., Khimikova O. I., Sokolova A. A. The new methods in gerontology for life expectancy prediction of the indigenous population of Yugra. // Advances in gerontology. 2014. № 27 (1). P. 30–36.

26. Gell-Mann M. Fundamental Sources of Unpredictability // Complexity. 1997. Vol. 3. № 1. P. 13–19.

27. Khadartsev A. A., Nesmeyanov A. A., Eskov V. M., Filatov M. A., Pan W. Fundamentals of chaos and self-organization theory in sports // Integrative medicine international. 2017. Vol. 4. P. 57–65.

28. Prigogine I. The End of Certainty: Time, Chaos, and the New Laws of Nature. N. Y.: Free Press, 1997. 64 p.

29. Weaver W. Science and Complexity. Rockefeller Foundation, New York City // American Scientist. 1948. Vol. 36. P. 536–544.

30. Zilov V. G., Eskov V. M., Khadartsev A. A., Eskov V. V. Experimental Verification of the Bernstein Effect “Repetition without Repetition” // Bulletin of Experimental Biology and Medicine. 2017. № 1. P. 1–5.

УДК 622.276.031:531.72.5:519.87

ЗАДАЧА СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ СИСТЕМ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ДВУХФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

Э. Н. Мусакаев^{1,2,3}, С. П. Родионов^{1,2,3}, В. П. Косяков^{1,2,3}

¹ Тюменский филиал института теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук

² ООО «Юни-КОНКОРД»

³ Тюменский государственный университет,
musakaev91@gmail.com, rodionovsp@bk.ru, hammer-rav@mail.ru

В данной работе предложена методика структурно-параметрической идентификации систем, описываемых моделями однофазной и двухфазной фильтрации в пористой среде с наличием сильных неоднородностей, а именно: сформулированы некоторые принципы, которым необходимо следовать при построении структуры модели, рассмотрен алгоритм для обнаружения трещин и экранирующих разломов с использованием только промысловых данных. Показано удовлетворительное совпадение результатов, полученных на эталонной модели и на модели, построенной с применением предложенной методики структурно-параметрической идентификации.

Ключевые слова: модель, фильтрация, пористая среда, структурно-параметрическая идентификация.

PROBLEM OF STRUCTURE AND PARAMETER IDENTIFICATION AT SIMULATION OF TWO-PHASE FILTRATION IN POROUS MEDIA

E. N. Musakaev^{1,2,3}, S. P. Rodionov^{1,2,3}, V. P. Kosyakov^{1,2,3}

¹ Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Tyumen site, Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences

² ООО Uni-CONCORD

³ Tyumen State University,
musakaev91@gmail.com, rodionovsp@bk.ru, hammer-rav@mail.ru

The article proposes a technique for the structure and parameter identification of systems described by models of single-phase and two-phase filtration in a porous medium with the presence of strong heterogeneities. There are some formulated principles that need to be followed during constructing the model structure. The paper also includes an algorithm for detecting fractures and sealing faults using only production data. A good agreement of the results obtained on the reference model and on the model constructed with the use of the proposed structure and parameter identification technique is shown.

Keywords: model, filtration, porous medium, structural-parameter identification.

Введение

Важным этапом математического моделирования такого сложного объекта как нефтяное месторождение, является адаптация параметров используемой фильтрационной модели к истории его разработки. Возникающие на этом этапе математические трудности связаны с большим числом адаптируемых параметров, которые имеют сложные связи с прогнозируемыми показателями разработки месторождения, и кроме того, часто обладают большой неопределенностью. Другой проблемой является плохая обусловленность используемой систе-

мы дискретизированных конечно-разностных уравнений фильтрации, приводящая к снижению качества прогнозных величин, таких как дебит жидкости и дебит нефти. Если численная и/или математическая модель содержит слишком много неизвестных параметров (т. е. является слишком сложной), то, после выполнения параметрической адаптации, такая модель не обладает устойчивостью прогноза [1, 2]. Поэтому актуальной становится задача структурной идентификации модели фильтрации, т. е. задача выбора фильтрационной модели оптимальной сложности, которая, с одной стороны, описывала бы процесс достаточно точно, а с другой – обладала бы хорошими прогнозными свойствами.

В большинстве работ по синтезу математических моделей их структура, как правило, постулируется (выбирается) априори с точностью до некоторого множества неизвестных параметров. В дальнейшем это множество является основным объектом исследования. Доминирующим подходом при выборе структуры модели в настоящее время является статистический подход, когда решение принимается на заданном классе моделей-претендентов [3].

В данной работе показаны некоторые принципы структурной идентификации систем на основе однофазной и двухфазной моделей фильтрации в пористой среде, а именно: был рассмотрен алгоритм поиска трещин и экранирующих разломов лишь на основе промысловых данных. Основные расчеты производились на фильтрационной модели пласта, позволяющей рассчитать потоки жидкости между скважинами; апробация результатов расчета проводилась с использованием эталонной модели.

Методика структурно-параметрической идентификации

Фильтрационная модель нефтяного пласта обычно содержит большое количество расчетных ячеек. Поэтому заполнение необходимых массивов данных о свойствах породы и жидкостей требует, во-первых, решать проблему интерполяции и экстраполяции данных измерений на скважинах на межскважинное пространство, а во-вторых, решать проблему усреднения или масштабирования данных, полученных на масштабах зерна и геофизических исследований, на масштаб расчетных блоков [4].

В условиях высокой неопределенности исходных данных и большой погрешности измерений (особенно это касается межскважинного пространства) нарушается принцип «простоты», который в реалиях математического моделирования сложных объектов может звучать так: «Модель должна быть настолько простой насколько возможно и, настолько сложной насколько необходимо» [5].

Interwell model – фильтрационная модель потоков жидкости между скважинами. Представим гидродинамическую модель нефтяного месторождения, разрабатываемого нагнетательными и добывающими скважинами, как модель с парными связями между скважинами (рис. 1). Как показано на рис. 1а красными линиями, скважины (или любые объекты с заданными границами, например, участки) имеют «объем дренирования» V_i . Фильтрация флюидов между скважинами с номерами i и j характеризуется двумя параметрами: проводимостью T_{ij} и объемом дренирования $V_{p,ij}$, внутри которого проводимость определяет потоки флюидов. Определим проводимости между скважинами следующим образом:

$$T_{i,j} = \frac{B_{ij}K_{ij}H_{ij}}{L_{ij}\mu_{ij}}, \quad (1)$$

где K – абсолютная проницаемость на границе между скважинами;
 B – ширина стенки, через которую фильтруется жидкость;
 H – среднеарифметическая эффективная толщина коллектора;
 L – расстояние между скважинами;
 μ – вязкость жидкости.

Вязкость определяется через начальную водонасыщенность:

$$\mu = S_{mw}\mu_w + (1 - S_{mw})\mu_o,$$

где S_{mw} – начальная водонасыщенность;

μ_w – вязкость воды;

μ_o – вязкость нефти.

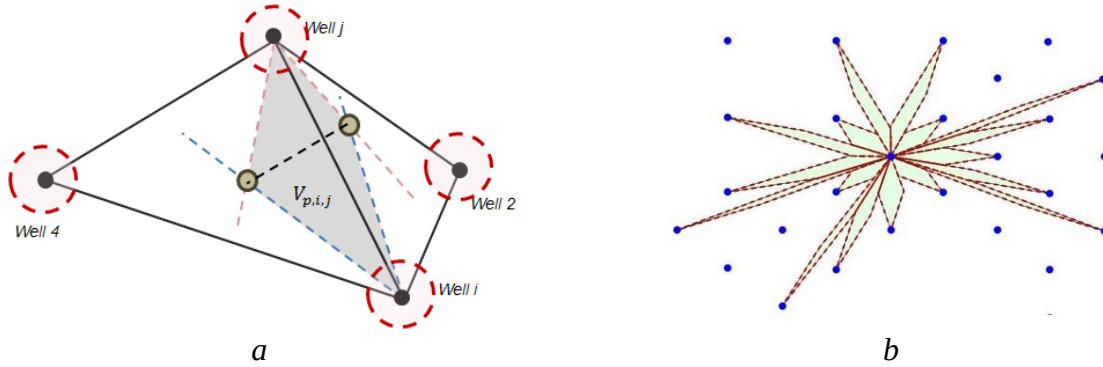


Рис. 1. Схема построения связей между скважинами и дренируемых объемов:
 а – построение дренируемого объема $V_{p,i,j}$ для пары скважин «i-j»; б – для множества связанных скважин

Система уравнений материального баланса. Для идентификации потоков жидкости между скважинами с использованием значений дебитов жидкости и забойных давлений на скважинах применяется система уравнений материального баланса для однородной жидкости [6], которая имеет следующий вид:

$$\beta_i V_i \frac{dP_i}{dt} = k_i Q_{3,i} - Q_{ж,i} + \sum_{j=1}^{n_i} T_{i,j} (P_i - P_j) - \lambda_{пв,i} (P_i - P_{пв,i}). \quad (2)$$

Здесь и далее индексом i внизу ($i = 1, \dots, N$) отмечены величины, относящиеся к i -ой скважине: P_i – среднее пластовое давление; $Q_{ж,i}$ и $Q_{3,i}$ – соответственно объемы добытой жидкости и закачанной воды; β_i – эффективный коэффициент сжимаемости смеси жидкостей и горной породы; k_i – коэффициент полезной закачки воды, равный доле закачанной воды, которая поступает непосредственно в расчетный пласт; $\lambda_{пв,i}$ – коэффициент, определяющий интенсивность притока подошвенной воды; n_i – количество скважин, связанных с i -ой скважиной; через $P_{пв,i}$ обозначено среднее давление в области подошвенной воды.

Далее проводится дискретизация системы уравнений (2) и записывается в матричном виде:

$$\beta_i V_i \frac{dP_i}{dt} = k_i Q_{3,i} - Q_{ж,i} + \sum_{j=1}^{n_i} T_{i,j} (P_i - P_j) - \lambda_{пв,i} (P_i - P_{пв,i}), \leftrightarrow AP^{n+1} = b, \quad (3)$$

где $\Delta t = t^n - t^{n-1}$, ($n = 1, \dots, N_T$) – шаг по времени;

n – верхний индекс, обозначающий переменную в момент времени t^n ;

A – симметричная матрица размерности $N \times N$ с диагональными элементами $(A)_{i,i} = \frac{\beta_i V_i}{\Delta t} + \sum_{j=1}^{n_i} T_{i,j}$ и недиагональными $(A)_{i,j} = -T_{i,j}$; $b = \frac{\beta_i V_i}{\Delta t} P^n + Q_{3,i}^{n+1} - Q_{ж,i}^{n+1}$ – вектор-столбец размерности N .

Представленная система линейных алгебраических уравнений может быть решена с использованием одного из итерационных методов.

Параметрическая идентификация. Задача идентификации параметров модели по промысловым данным относится к классу обратных задач. Если при решении прямой задачи

(3) определяются пластовые давления при заданных параметрах пласта $(\beta, k, \lambda_{\text{пв}}, T)$, то в обратных задачах находится причинная составляющая наблюдаемых событий с использованием некоторых косвенных данных или априорных знаний о структуре пласта.

Задача идентификации параметров модели к промысловым данным ставится и решается в оптимизационной постановке. Решением задачи будет являться такое значение вектора управляющих параметров $\vec{u} = \vec{u}_{\text{opt}}$, при котором целевая функция $J(\vec{u})$ имеет глобальный минимум $J(\vec{u}_{\text{opt}}) \rightarrow \min$.

В качестве управляющих параметров представим безразмерные множители перед проводимостями, характеризующие степень связи между скважинами, т. е.:

$$\vec{u} = \alpha_{ij}, \quad (4)$$

$$\tilde{T}_{i,j} = \alpha_{ij} T_{i,j}, \quad (5)$$

где $\alpha_{ij} \in [0, \alpha_{\text{max}}]$. Если $\alpha_{ij} = 0$, то связь между скважинами i и j (перетоков жидкости) отсутствует.

Целевую функцию представим в виде меры отклонения фактических и расчетных значений давления в течение истории разработки:

$$J_p(\vec{u}) = \frac{\sum_{n=1}^l |P_{\text{факт}}^n - P_{\text{модель}}^n(\vec{u})|}{\sum_{n=1}^l P_{\text{факт}}^n}, \quad (6)$$

где l – число временных шагов;

$\vec{u}$ – вектор управляющих параметров;

$P_{\text{факт}}^n (n = 1, \dots, l)$ – значения пластового давления, рассчитанное с использованием данных промысловой истории в момент времени $t = t^n$;

$P_{\text{модель}}^n(\vec{u})$ – аналогичные значения пластового давления, определяемые из решения уравнений (2) при значении вектора управляющих параметров $\vec{u}$.

Путем идентификации множителей на проводимости (4), получают адаптированные значения интенсивности потоков жидкости между скважинами (5), где значения (1) рассчитываются на основе входных данных.

Количество идентифицируемых параметров зависит от матрицы связей, определяемой вручную или генерируемой автоматически.

Структурная идентификация и регуляризирующие функционалы. При традиционном подходе к моделированию нефтяного месторождения с помощью коммерческих гидродинамических симуляторов число параметров, которые можно определить из имеющейся геолого-промысловой информации, много меньше количества параметров пласта, необходимых для расчета. Поэтому решение задачи идентификации *не уникально* или, другими словами, существует не единственный набор параметров, при котором целевой функционал имеет минимум. Усложнение модели путем добавления в нее новых параметров, учитывающих новые особенности реального объекта, может привести к желаемой минимизации разницы между наблюдаемыми и расчетными данными. С другой стороны, это приводит и к проблеме не уникальности при решении задачи параметрической идентификации. Прогноз с помощью такой численной и/или математической модели после параметрической адаптации будет неустойчив или вовсе неверным [5].

В связи с этим актуальной становится задача *структурной идентификации* модели фильтрации, т. е. задача выбора фильтрационной модели оптимальной сложности, которая, с одной стороны, описывала бы процесс достаточно точно, а с другой – обладала бы хорошими прогнозными свойствами.

Решением задачи структурной идентификации будет являться такая модель оптимальной сложности $M_{\text{opt}} \in M_{\text{class}}$, которая подходит под следующие условия:

1. Модель *удовлетворительно* описывает промышленные данные (качественная адаптация на историю разработки).

2. Модель дает устойчивый прогноз.

Первое условие выполняется в большинстве случаев благодаря параметрической идентификации, для выполнения второго условия важно учесть следующие пункты:

1. Необходимо выделять обучающую и независимую контрольную выборки данных для отбора наилучших моделей.

2. Необходимо выбирать модель оптимальной сложности.

Рассмотрим каждый пункт более подробно и более конкретно к рассматриваемой задаче.

1. Период разработки месторождения T_{all} разделяется на период «обучения» T_o и период «экзамена» T_e ,

$$T_{all} = T_o + T_e.$$

На интервалах, относящихся к периоду «обучения», производится параметрическая идентификация и, при помощи формулы (6), будет получено значение функционала $J_o(\vec{u}_{opt})$. Теперь, зная $\vec{u} = \vec{u}_{opt}$ и решая прямую задачу (3) на периоде «экзамена», получим значение функционала J_e . Общий функционал будет тогда равен:

$$J_{all} = J_o + \gamma J_e, \quad (7)$$

где γ – весовой коэффициент на период «экзамена».

2. Для учета сложности выбранной модели используем байесовский информационный критерий (BIC):

$$BIC = L \cdot \ln \frac{SSE}{L} + k \cdot \ln L, \quad (8)$$

где SSE – сумма регрессионных остатков;

L – количество наблюдаемых величин;

k – параметр сложности модели.

Формирование класса моделей-претендентов $M_{class}(I_{apriori})$, из множества которых будет производиться выбор модели оптимальной сложности M_{opt} , обычно происходит за счет априорной информации $I_{apriori}$, общих соображений специалиста; и здесь ключевую роль начинает играть опыт, интуиция человека, что позволяет значительно сузить круг физико-математических моделей до приемлемого, и рассматривать ограниченный набор структур. По мере решения задачи идентификации, подгонки различных параметров модели, накапливается опыт по данному вопросу, производится сравнение различных структур и растет понимание «истинной» системы [7], как она функционирует, вручную выстраиваются «связи» моделей, например, при описании сложного реального объекта сначала простыми моделями, потом более сложными.

Некоторым образом, формализовать эту процедуру структурно-параметрической идентификации можно с помощью статистического подхода. Статистический подход подразумевает использование не одной «лучшей» по значению функционала модели, а набора лучших моделей. Анализ этих данных позволяет вырабатывать правила отбора моделей.

Приведем общую блок-схему структурно-параметрической идентификации (рис. 2):

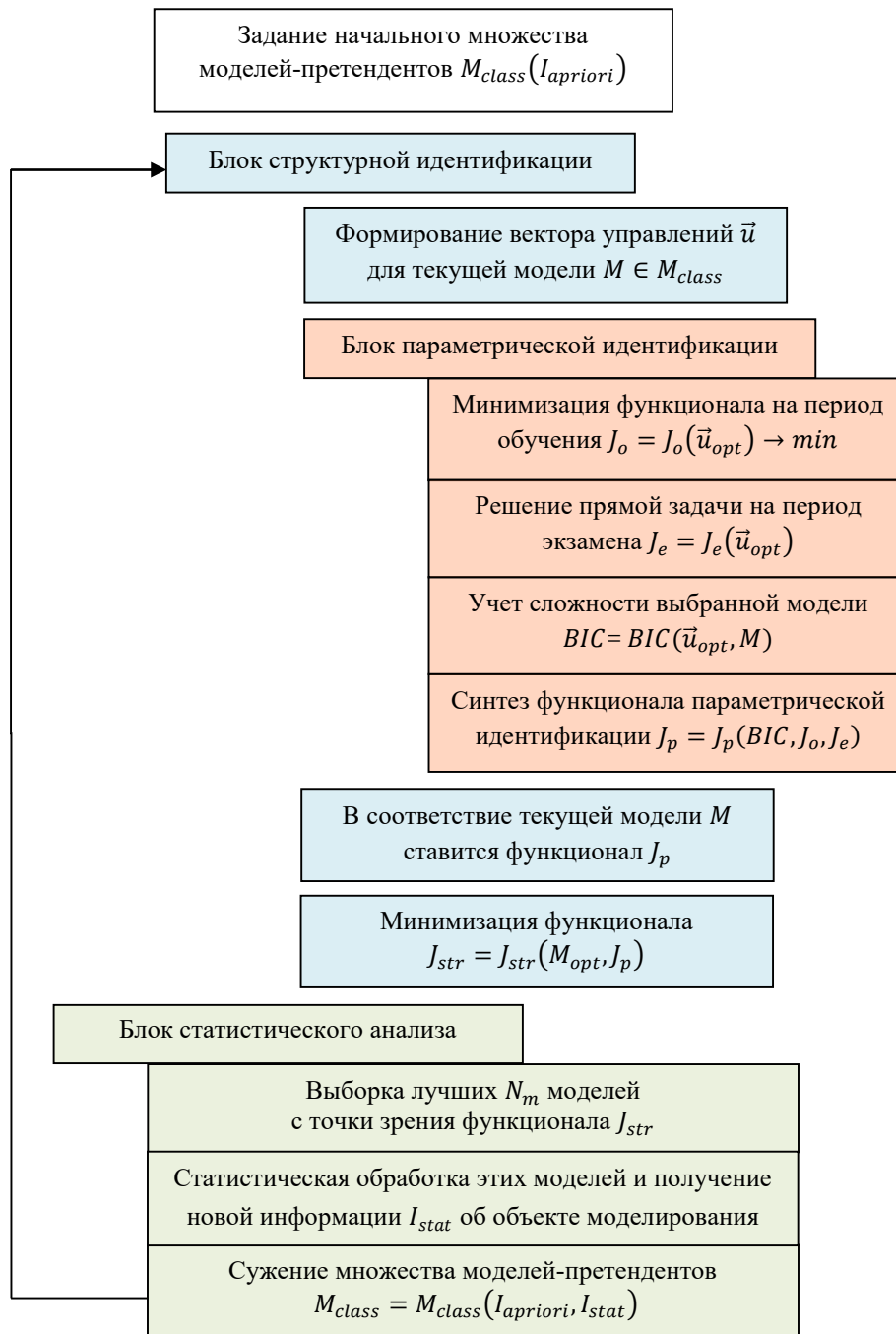


Рис. 2. Блок-схема метода структурно-параметрической идентификации

Пример применения методики структурно-параметрической идентификации

Применение представленной выше теории продемонстрируем на конкретной синтетической модели нефтенасыщенного пласта, сравнивая результаты моделирования на гидродинамическом симуляторе с результатами, полученными на модели с парными связями между скважинами.

Фильтрационная модель, построенная для расчетов на гидродинамическом симуляторе, будет считаться исходной или «истинной»; качество структурно-параметрической идентификации на настраиваемой модели «Interwell model» будет оценено с помощью «истинной» модели. Для «истинной» модели будет известен весь необходимый массив данных о

свойствах породы и жидкостей, настраиваемая модель в качестве входных данных будет использовать лишь данные по скважинам: промысловые данные и данные РИГИС. Задачей будет идентификация связей между скважинами на настраиваемой модели с применением методики параметрической и структурной идентификации и, таким образом, определение расположения трещины и экрана в исходной модели.

Постановка задачи. Имеется нефтенасыщенный участок (рис. 3–4), который разрабатывается 9 скважинами (5 нагнетательных и 4 добывающие). На участке имеется трещина, расположенная от нагнетательной скважины № 1 до области добывающей скважины № 6. Также имеется протяженная непроницаемая зона, «экран». Параметры задачи указаны в табл. 1.

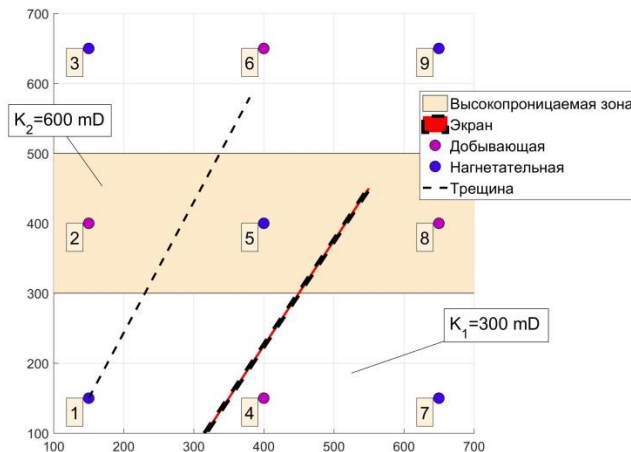


Рис. 3. Геометрическое расположение неоднородности коллектора на участке

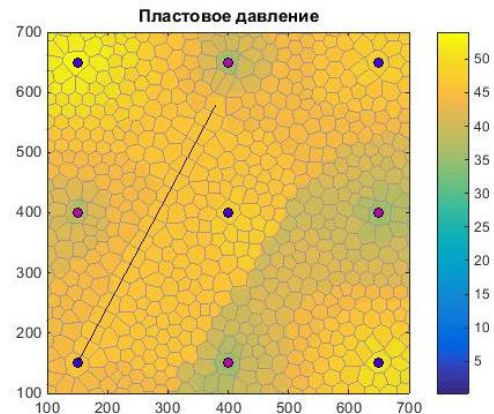


Рис. 4. Распределение пластового давления на участке

Таблица 1

Параметры

Параметр	Значение
Размер участка	600х600 м
Пористость	0.3
Толщина пласта	10 (м)
Вязкость воды	1 сПз
Вязкость нефти	10 сПз
Критические насыщенности воды и нефти	0.25, 1
Начальная водонасыщенность	0.25.
Период разработки	10 лет
Шаг сетки	~23 (м)

Таким образом, имея столь неоднородную модель по геометрическому строению участка, необходимо провести идентификацию интенсивности потоков жидкости между скважинами с помощью «Interwell model», по этим данным определить расположение экрана и трещины.

Постановка задачи для Interwell model. Вернемся к рассматриваемой синтетической модели нефтенасыщенного пласта (рис. 3). В качестве фактических данных будут использоваться объемы добытой жидкости $Q_{\text{ж}} = Q_{\text{нефть}} + Q_{\text{вода}}$, закачанной жидкости Q_3 , среднее пластовое давление P по скважинам в области их «ареала дренирования» $V_i, i = 1 \dots 9$ (рис. 3). Определим V_i как цилиндр с центром в месторасположении скважины и с радиусом $r = 40$ м. Таким образом, поровый объем равен:

$$V_i = \pi m h r^2 = \pi \cdot 0.3 \cdot 10 \cdot 40^2 \approx 1.5 \cdot 10^4 \text{ (м}^3\text{)}. \quad (9)$$

Подошвенная вода в настраиваемой модели (2) отсутствует ($\lambda_{\text{пв},i} = 0$), вся закачанная вода идет в расчетный пласт ($k_i = 1$), эффективная сжимаемость постоянна ($\beta_i = 1.25 \cdot 10^{-5}$).

Полагаем, что матрица A (3) включает только «сильные» связи, т. е. связи только между добывающей и нагнетательной скважинами, а более слабыми связями между добывающими скважинами мы пренебрегаем. Таким образом, начальный вектор управлений (4) для 9 скважин включает в себя $N_c = 20$ связей.

Результаты

Параметрическая идентификация. Проведем параметрическую идентификацию сразу для $N_c = 20$ связей. Результаты работы алгоритма параметрической идентификации приведены ниже на рис. 5. Для удобства чтения на рис. 5б представлены только отфильтрованные значения:

$$T_{ij} \geq T_{\min},$$

где в качестве порогового значения принималось $T_{\min} = 10 \frac{\text{м}^3}{\text{атм} \cdot \text{мес}}$.

Анализируя рис. 5б, видно, что сильная связь «1–6» может указывать на наличие трещины, а отсутствие связей «1–4», «4–5» показывает, что здесь возможен экран. Однако, есть и некоторые «некорректные» связи: «1–8», «5–8», «4–9», которые не позволяют однозначно говорить о наличии столь протяженного экрана. Значения функционалов (7), (8) представлены в общей табл. 2.

С точки зрения отклонения расчетных значений от фактических (7) найденное значение $\vec{u} = \vec{u}_{\text{opt}}$, однако, с точки зрения адекватного отображения действительности результат параметрической идентификации сразу всех связей неудовлетворителен. Необходимо проводить структурную идентификацию.

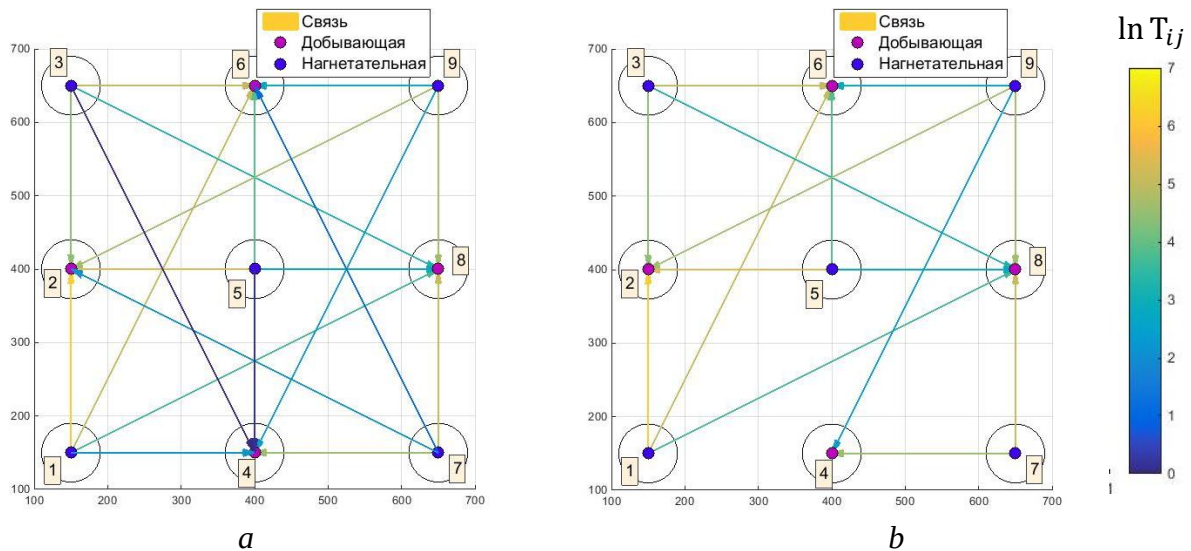


Рис. 5. Адаптированные значения T_{ij} при $N_c = 20$:
 а – показаны все значения; б – отфильтрованные $T_{ij} \geq T_{\min}$

Структурно-параметрическая идентификация. Разработан алгоритм структурной идентификации на основе генетического алгоритма, где в качестве управляющих параметров выбирается вектор $\vec{m\bar{n}}$, определяющий отсутствие или наличие связей между скважинами в матрице A . Элементы вектора $\vec{m\bar{n}}$ могут принимать только 2 значения: либо 0, либо 1. Длина

вектора может изменяться в интервале $(1, \max(N_c)]$, в нашем случае $(1, 20]$. Если элемент вектора $\overline{mn}$ равен 0, то соответствующая связь отсутствует. Формирование матрицы связей $A = A'(\overline{mn}, \overline{mn}_0)$ включает в себя априорные знания $I_{apriori} = \overline{mn}_0$ о наличии/отсутствии связей, в рассматриваемом примере таковыми знаниями будет пренебрежение связями между добывающими скважинами и между нагнетательными скважинами.

Тогда решением задачи структурной идентификации будет такой вектор $\overline{mn}_{opt}$, при котором целевой функционал структурной идентификации минимален $J_{str}(\vec{u}_{opt}(\overline{mn}_{opt}, \overline{mn}_0)) \rightarrow \min$. Целевой функционал по структурной идентификации может быть определен формулами (7), (8) или их синтезом.

Применив алгоритм структурной идентификации к нашей задаче, были получены результаты для лучшей с точки зрения функционала модели (рис. 6).

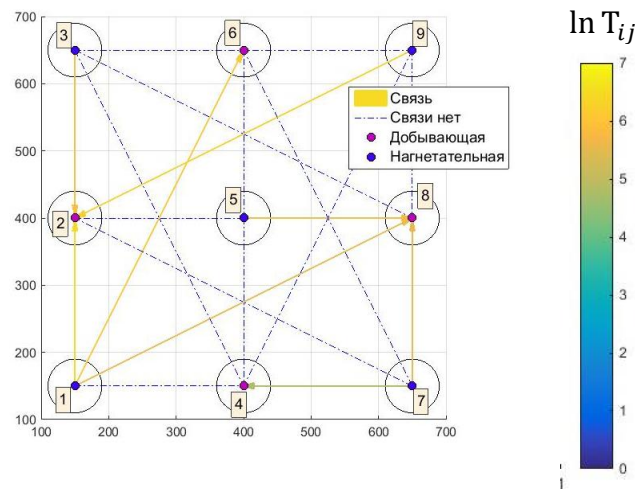


Рис. 6. Адаптированные значения T_{ij} при $N_c = 9$

Статистический подход к структурной идентификации. Также был проведен статистический анализ 10 лучших моделей с точки зрения функционала J_{all} : для каждой связи была получена величина вероятности ее появления в $N_m = 10$ лучших моделях:

$$\overline{mn}_{stat} = \frac{\sum_{i=1}^{N_m} \overline{mn}_i}{N_m},$$

где $i = 1, \dots, N_m$ обозначает порядковый номер модели.

В качестве критериев отбора моделей используются следующие неравенства:

1. $0 \leq mn_{stat,j} \leq p_{min}$ – j-ой связи нет;
2. $p_{min} < mn_{stat,j} < p_{max}$ – j-ая связь возможна;
3. $p_{max} \leq mn_{stat,j} \leq 1$ – j-ая связь есть.

Значения p_{min} , p_{max} выбирались экспертно, $p_{min} = 0.4$, $p_{max} = 0.8$. Если выбрать такие критерии отбора моделей, то получается следующее правило отбора (рис. 7): 7 связей из 20 признаются устойчивыми и точно определенными ($p_{max} \leq mn_{stat,j} \leq 1$), 6 связей из 20 определяются как несуществующие ($0 \leq mn_{stat,j} \leq p_{min}$), про оставшиеся 7 из 20 связей ничего точно сказать нельзя ($p_{min} < mn_{stat,j} < p_{max}$). Из рисунка видно, что единственная точно определенная длинная связь – это связь «1–6», где расположена трещина. Область, где располагается «экран», определяется повышенной плотностью отсутствия связей, однако, есть связь «1–8», которая возможна, вероятность ее появления равна 0.6.

Таким образом, за одну итерацию статистического подхода к структурной идентификации были определены 13 из 20 связей, которые отражают действительность (наличие экрана и трещины в модели). Далее, для получения значений этих связей, проведем 2-ю итерацию структурной идентификации, только теперь размерность вектора управляющих параметров $\overline{mn}$ равна 7, а не 20. Остальные 13 из 20 связей идут в качестве априорной информации $\overline{mn}_0$.

В результате работы алгоритма структурной идентификации была получена модель (рис. 8).

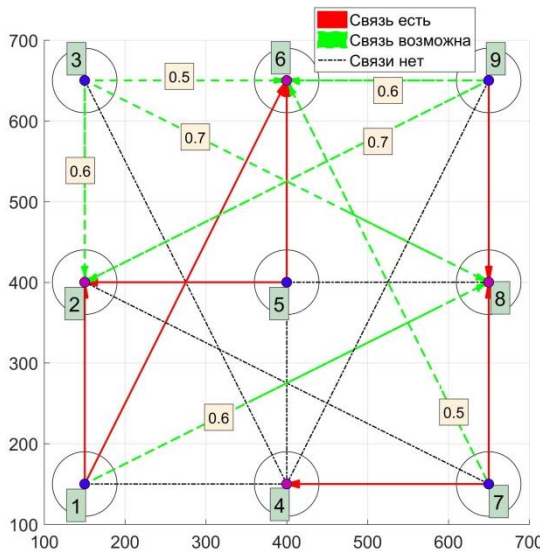


Рис. 7. Результат статистической обработки 10 лучших по значению функционала моделей $p_{min} = 0.4, p_{max} = 0.8$

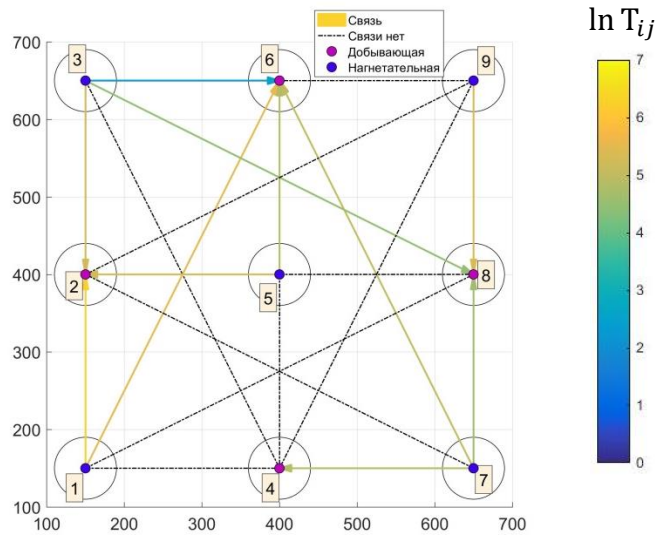


Рис. 8. Адаптированные значения T_{ij} при $N_c = 11$

Все 11 связей адекватно описывают реальность (рис. 3), что можно считать успешным завершением структурной и параметрической идентификации. Результаты пошаговой структурной идентификации с точки зрения функционалов (7), (8) для каждой из посчитанных моделей (рис. 5, рис. 6, рис. 8) приведены ниже (табл. 2).

Таблица 2

Результаты пошаговой структурной идентификации

№ модели	Кол-во связей N_c	BIC	J_{all}
1	20	2290	3.24
2	9	2698	3.16
3	11	2392	3.07

Заключение

Для построения фильтрационной модели нефтяного месторождения, позволяющей не только адекватно описывать историю разработки, но и хорошо прогнозировать промысловые показатели, необходима не только параметрическая, но и структурная идентификация. Показано, что для структурной идентификации фильтрационной модели в условиях недостатка априорной информации в целевой функционал, относящийся к истории разработки, требуется вводить дополнительные слагаемые. В настоящей работе предложена методика структурно-параметрической идентификации сеточной модели фильтрации при наличии трещин и экранирующих разломов с использованием только промысловых данных. Методика включа-

ет в себя предложенные принципы структурной идентификации при построении сеточной модели нефтяного месторождения, а также новые выражения для целевого функционала. В результате вычислительных экспериментов с использованием предложенной методики структурно-параметрической идентификации фильтрационной модели установлено, что данная методика может быть использована для выбора модели участка нефтяного месторождения, обладающей наилучшими прогнозными свойствами.

Литература

1. Мирзаджанзаде А. Х., Хасанов М. М., Бахтизин Р. Н. Моделирование процессов нефтегазодобычи. Нелинейность, неравновесность, неопределенность. М. ; Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2004. 368 с.
2. Сергеев В. Л., Наймушин А. Г., Нгуен К. Х. Адаптивная идентификация эволюционных процессов нефтегазодобычи на основе интегрированных систем феноменологических моделей // Изв. Томск. политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2014. Т. 324. № 1. С. 177–183.
3. Карабутов Н. Н. Структурная идентификация систем: Анализ динамических структур. М. : МГИУ, 2008. 160 с.
4. Каневская Р. Д. Математическое моделирование гидродинамических процессов разработки месторождений углеводородов. М. ; Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2002. 140 с.
5. Rafiee M. M. Model Selection and Uniqueness Analysis for Reservoir History Matching : Ph.D. thesis. Freiberg University of Mining and Technology, 2010. 112 p.
6. Косяков В. П., Ширшов Я. В., Мусакаев Э. Н. Вычислительная технология расчета материального баланса на нефтяном месторождении // Нефтепромысловое дело. 2015. № 11. С. 30–35.
7. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. М. : Наука, 1991. 432 с.

УДК 519.175.4:004.421.5:004.7

СЛУЧАЙНЫЕ ГРАФЫ ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНОГО СВЯЗЫВАНИЯ С ДОБАВЛЕНИЕМ ПОЛНЫХ ПОДГРАФОВ

Е. Б. Юдин

Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН, udinev@asoiu.com

Предлагается расширение модели случайных графов с нелинейным правилом предпочтительного связывания путем учета возможностей добавления в сеть целых сообществ. Эти сообщества моделируются полными графами. Такое расширение модели естественным образом обосновывается известными процессами в социальных сетях. В работе выводятся математические соотношения, которые позволяют рассчитать распределение степени связности вершин $\{Q_k\}$ сгенерированного графа. Также выводятся уравнения, позволяющие при заданном распределении степени связности узлов реальной сети подобрать параметры генерации, учитывающих процесс добавления сообществ. Полученные результаты проверяются путем генерации больших графов.

Ключевые слова: графы предпочтительного связывания, сетевые сообщества, число клик.

PREFERENTIAL ATTACHMENT RANDOM GRAPHS WITH COMPLETE SUBGRAPHS INCREMENT

E. B. Yudin

*Sobolev Institute of Mathematics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
udinev@asoiu.com*

The model extension of nonlinear preferential attachment random graphs considering possibilities of adding entire communities in the network is proposed. The added communities are represented by entire graphs. Such an extension of model is naturally based on existing processes on social networks. Mathematical relations are derived. These relations allow calculating the degree distribution of vertices $\{Q_k\}$ of a generated graph. Equations are also derived which allow, for a given node degree distribution of real network getting generation properties considering the process of adding communities. The results obtained are verified by generating large graphs.

Keywords: preferential attachment graphs, online communities, number of clicks.

Введение

Изучаемые Теорией сетей (Network Science) структуры имеют разную природу, но схожие свойства, среди которых исследователи выделяют следующие:

- распределение степеней связности узлов сети является степенным;
- сети имеют небольшой, часто уменьшающийся с увеличением размера сети, диаметр (правило «шести рукопожатий»);
- в сетях присутствуют сообщества (некоторые группы узлов, имеющих больше связей между собой, чем с узлами из других сообществ).

В качестве моделей больших сетей часто используют случайные графы предпочтительного связывания [1]. Эти модели растущих сетей позволяют генерировать графы, реализующие:

- заданное распределение степени связности вершин;
- заданное распределение степени связности вершин и заданный коэффициент кластеризации [2–5];
- заданные распределение степени связности вершин и совместное распределение концевых степеней ребер [6].

Схему генерации графов предпочтительного связывания удобно рассматривать на примере случайного графа с нелинейным правилом предпочтительного связывания (НППС). Генерация графа с НППС (рис. 1) представляет собой итерационный процесс. На каждом шаге этого процесса к существующему графу добавляется приращение – вершина со случайным числом ребер, свободные концы которых присоединяются к i -й вершине существующего графа с вероятностью, пропорциональной некоторой функции предпочтения $f(k_i)$, зависящей от степени связности k_i вершины графа:

$$p_i = \frac{f(k_i)}{\sum_{i=1}^n f(k_i)}.$$

Если число ребер в приращении является константой m , а функция предпочтения линейна: $f(k_i) = k_i$, то мы получим известный граф Барабаши – Альберт (БА) [1], в котором моделируется принцип «богатый становится богаче» (чем больше степень связности вершины, тем больше вероятность присоединения к ней). Если функция предпочтения логарифмическая: $f(k_i) = \log(k_i)$, то моделируется закон Вебера – Фихнера, в соответствии с которым интенсивность ощущения пропорциональна логарифму интенсивности раздражителя, в данном случае степени связности k_i вершины.

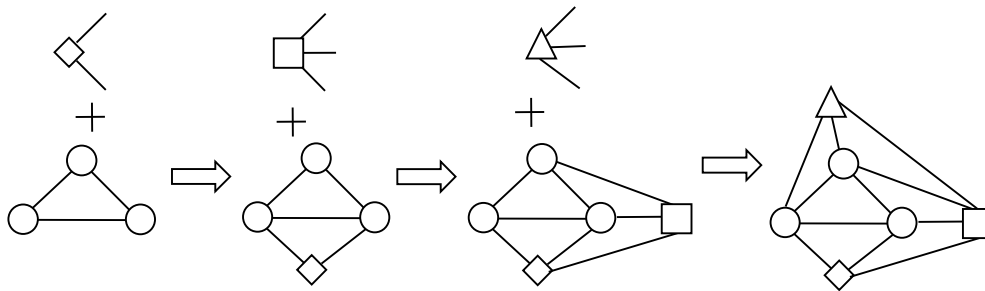


Рис. 1. Генерация графов с НППС

Примечание: к графу-затравке добавляются вершины со случайным числом ребер. На рисунке добавляется вершина с двумя ребрами, затем дважды с тремя

Однако в графах предпочтительного связывания (особенно это касается наиболее исследованного графа предпочтительного связывания – графа БА) сообщества, как правило, отсутствуют, в некотором смысле такие графы являются однородными. Даже для небольшого размера полных подграфов (клик), содержащих всего лишь три вершины, в графах БА количество таких «треугольных» клик существенно меньше по сравнению с их количеством в реальных сетях с соизмеримым числом узлов и ребер [3]. Тем более это справедливо для числа клик большего размера. В данной работе предлагаются графы предпочтительного связывания, в котором эта проблема решается. В этих графах предполагается, что сообщество добавляется в сеть целиком, тем самым моделируется этап «добавления сообщества» [7]. Добавляемое сообщество представляет собой заданное число n узлов, любые два узла из которых связаны между собой.

Графы с добавлением полных подграфов

Графы с добавлением полных подграфов представляет собой модифицированную версию графов с НППС. Пусть на каждом шаге выращивания графа с вероятностью γ поступает полный граф, содержащий n связанных между собой вершин (n -ада), с вероятностью $(1 - \gamma)$ – обычное приращение графа – монада (рис. 2). Число добавляемых ребер у вершины монады определяется в соответствии с дискретным распределением $\{r_k^{(1)}\}$, у каждой из вершин n -ады

часть ребер являются частью полного подграфа, а часть – разыгрывается в соответствии с распределением $\{r_k^{(n)}\}$, у всех вершин n -ады число добавляемых ребер одинаково. Свободные концы ребер монады присоединяются к графу независимо, в соответствии с вероятностью:

$$p_i = \frac{f(k_i)}{\sum_{j=1}^N f(k_j)}, \quad i = 1, \dots, N, \quad (1)$$

где N – число вершин графа.

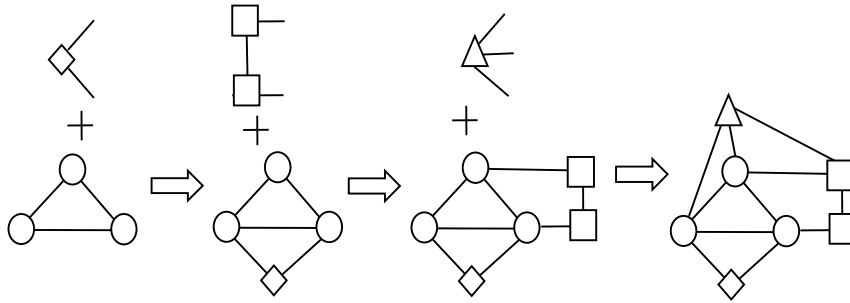


Рис. 2 Генерация графа с НППС с добавлением сообществ, на каждом шаге генерации графа добавляется двухвершинное приращение (диада) с вероятностью γ или одновершинное приращение (монада) с вероятностью $(1-\gamma)$

У каждой вершины n -ады μ ребер присоединяются к одной и той же вершине, разыгрываемой по формуле (1). Остальные свободные концы ребер n -ады присоединяются к существующим вершинам графа с вероятностью (1) независимо.

Можно записать для предлагаемого графа следующие свойства.

1. В среднем за один шаг поступает $(1 + (n-1)\gamma)$ вершин.

2. Обозначим среднее число ребер монады $m^{(1)}$, тогда $m^{(1)} = \sum_{k=1}^t i \cdot r_i^1$, где t – максимальное значение степени связности монады.

3. Среднее число ребер n -ады $(n \cdot m^{(n)} + n(n-1)/2)$, свободных (не входящих в клику размером n) ребер $n \cdot m^{(n)}$, где $m^{(n)}$ – среднее число свободных ребер каждой из вершин n -ады.

4. За один шаг к графу добавляется в среднем $\gamma \cdot (n \cdot m^{(n)} + m^{(n)} \cdot (n-1)/2) + (1-\gamma) \cdot m^{(1)}$ ребер.

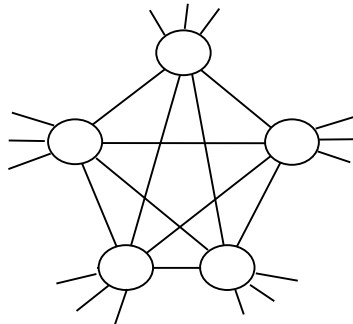


Рис. 3. Полный граф с пятью вершинами в качестве приращения (пентада)

Примечание: разыгранных свободных ребер три, входящих в клику – десять

Поставим следующие задачи:

1. В рамках предложенной модификации модели графов с НППС вывести уравнения, которые позволят рассчитать распределение степени связности (РСС) вершин $\{Q_k\}$, сгенерированного графа.

2. В рамках предложенной модификации модели графов с НППС вывести уравнения, позволяющие при заданном РСС узлов реальной сети подобрать параметры генерации, учитывающих процесс добавления сообществ.

Вывод распределения степени связности вершин

Разобьем множество всех вершин имеющегося графа на подмножества A_k (слои) вершин, содержащие вершины с одинаковой связностью k ($k = m, m+1, \dots$). Вероятность Q_k слоя A_k определим как вероятность выбора вершины именно из слоя A_k при случайном (равновероятном) выборе любой из N вершин имеющегося графа: $Q_k = |A_k| / N$, где $|A_k|$ – число вершин со связностью k .

Финальное значение P_k вероятности $\sum_{i \in A_k} p_i$ того, что для связывания с ребром новой вершины будет выбрана вершина слоя A_k , можно получить из формулы (1):

$$\sum_{i \in A_k} p_i = \frac{\sum_{i \in A_k} f(k_i)}{\sum_{j=1}^N f(k_j)} = \frac{f(k)|A_k|}{\sum_{l \geq g} f(l)|A_l|} = \frac{f_k |A_k| / N}{\sum_{l \geq g} f_l |A_l| / N} \sim \frac{Q_k f_k}{\sum_{l \geq g} Q_l f_l} = \frac{Q_k f_k}{\langle f \rangle} = P_k.$$

Таким образом, вероятность P_k выбора слоя A_k можно вычислить как

$$P_k = \frac{Q_k f_k}{\langle f \rangle}, \quad (2)$$

где $\langle f \rangle = \sum_{l \geq g} Q_l f_l$ – среднее значение функции предпочтения.

Рассмотрим, как изменяется $|A_k|$ при поступлении монады:

1. Если поступает монада, то $|A_k|$ с вероятностью r_k увеличится на 1. В среднем $|A_k|$ за счет этого увеличивается на $1 \cdot r_k^{(1)} + 0 \cdot (1 - r_k^{(1)}) = r_k^{(1)}$.

2. Кроме того, в среднем $m^{(1)}P_k$ ребер монады связываются с вершинами слоя A_k и эти вершины уходят в слой A_{k+1} , т. е. A_k уменьшается в среднем на $m^{(1)}P_k$.

3. В среднем $m^{(1)}P_{k-1}$ ребер монады связываются с вершинами слоя A_{k-1} и эти вершины уходят в слой A_k , т. е. A_k увеличивается в среднем на $m^{(1)}P_{k-1}$.

Итого при добавлении монад:

$$\Delta_1 = r_k^{(1)} + m^{(1)}P_{k-1} - m^{(1)}P_k. \quad (3)$$

Рассмотрим, как изменяется $|A_k|$ при поступлении n -ады (рис. 4).

1. Вершины n -ады с вероятностью $r_{k+1-n}^{(n)}$ попадают в слой A_k , это дает увеличение $|A_k|$ на $n \cdot r_{k+1-n}^{(n)}$.

2. Для каждой из вершин n -ады справедливо, что μ исходящих из нее ребер связываются с вероятностью P_{k-n} с вершинами слоя A_{k-n} и эти вершины переходят в слой A_k . Это дает увеличение $|A_k|$ на μP_{k-n} .

3. В среднем μ сопряженных n -ок ребер связываются с вершинами слоя A_k и эти вершины переходят в слой A_{k+n} . Это дает уменьшение $|A_k|$ на μP_k .

4. Свободные ребра n -ады связываются с вершинами слоя A_{k-1} с вероятностью P_{k-1} . Таких одиночных ребер $n \cdot m^{(n)} - n \cdot \mu$. Увеличение $|A_k|$ составляет $(n \cdot m^{(n)} - n \cdot \mu) P_{k-1}$.

5. Свободные ребра n -ады связываются с вершинами слоя A_k с вероятностью P_k . Уменьшение $|A_k|$ составляет $(n \cdot m^{(n)} - n \cdot \mu) P_k$.

Итого получаем:

$$\Delta_2 = n \cdot r_{k+1-n}^{(n)} + \mu P_{k-n} - \mu P_k + (n \cdot m^{(n)} - n \cdot \mu) P_{k-1} - (n \cdot m^{(n)} - n \cdot \mu) P_k. \quad (4)$$

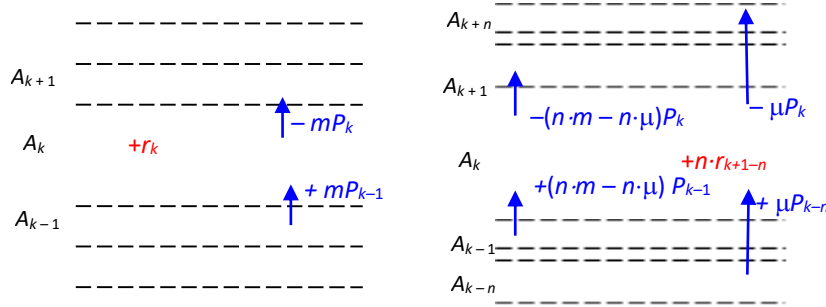


Рис. 4. Схема изменения числа вершин в слое A_k при добавлении монады (слева) и n -ады (справа)

На каждом шаге выращивания графа модуль поступает с вероятностью γ , обычное приращение – с вероятностью $(1 - \gamma)$. С учетом этого:

$$\begin{aligned} \Delta|A_k| &= (1 - \gamma)\Delta_1 + \gamma \cdot \Delta_2 = (1 - \gamma)(r_k^{(1)} + m^{(1)}P_{k-1} - m^{(1)}P_k) + \\ &+ \gamma(n \cdot r_{k+1-n}^{(n)} + \mu P_{k-n} - \mu P_k + (n \cdot m^{(n)} - n \cdot \mu)P_{k-1} - (n \cdot m^{(n)} - n \cdot \mu)P_k). \end{aligned}$$

Приравняв долю вершин в слое A_k до выполнения шага выращивания графа к соответствующей доле A_{k+1} после выполнения этого шага, получаем следующее уравнение баланса:

$$\frac{|A_k|}{N} = \frac{|A_k| + \Delta|A_k|}{N + ((1 - \gamma) + \gamma \cdot n)}.$$

Что можно переписать как

$$\begin{aligned} \frac{|A_k|}{N} &= \frac{|A_k| + r_k^{(1)} + m^{(1)}P_{k-1} - m^{(1)}P_k - \gamma \cdot r_k^{(1)} - \gamma \cdot m^{(1)}P_{k-1} + \gamma \cdot m^{(1)}P_k}{N + ((1 - \gamma) + \gamma \cdot n)} + \\ &+ \frac{\gamma \cdot n \cdot r_{k+1-n}^{(n)} + \gamma \cdot \mu \cdot P_{k-n} - \gamma \cdot \mu \cdot P_k + \gamma \cdot (n \cdot m^{(n)} - n \cdot \mu)P_{k-1} - \gamma \cdot (n \cdot m^{(n)} - n \cdot \mu)P_k}{N + ((1 - \gamma) + \gamma \cdot n)}. \end{aligned}$$

Полученное уравнение перепишем следующим образом:

$$\begin{aligned} |A_k| N + |A_k| \cdot ((1 - \gamma) + \gamma \cdot n) &= N |A_k| + N (r_k^{(1)} + m^{(1)}P_{k-1} - m^{(1)}P_k - \gamma \cdot r_k^{(1)} - \gamma \cdot m^{(1)}P_{k-1} + \\ &+ \gamma \cdot m^{(1)}P_k + \gamma \cdot n \cdot r_{k+1-n}^{(n)} + \gamma \cdot \mu \cdot P_{k-n} - \gamma \cdot \mu \cdot P_k + \gamma (n \cdot m^{(n)} - n \cdot \mu)P_{k-1} - \gamma (n \cdot m^{(n)} - n \cdot \mu)P_k) = \\ &= N \cdot |A_k| + N \cdot (r_k^{(1)}(1 - \gamma) + \gamma \cdot n \cdot r_{k+1-n}^{(n)} + (m^{(1)}(1 - \gamma) + \gamma \cdot n \cdot m^{(n)} - \gamma \cdot n \cdot \mu) \cdot P_{k-1} + \\ &+ \gamma \cdot \mu \cdot P_{k-n} + (m^{(1)} \cdot (\gamma - 1) - \gamma \cdot n \cdot m^{(n)} + \gamma(n - 1) \cdot \mu) P_k). \end{aligned}$$

Сократим одинаковые члены $|A_k|N$ и разделим равенство на N . В результате выражение $|A_k|((\gamma - 1) + \gamma \cdot n)$ в левой части превращается в $Q_k((\gamma - 1) + \gamma \cdot n)$, а множители N в правой

части сокращаются. Заменяя все P_k в правой части равенства их выражением $P_k = \frac{Q_k f_k}{\langle f \rangle}$, получаем уравнение баланса для Q_k :

$$Q_k \cdot \left(1 + \gamma(n-1) - \frac{f_k(m^{(1)}(\gamma-1) - \gamma \cdot n \cdot m^{(n)} + \gamma(n-1)\mu)}{\langle f \rangle} \right) = \\ = \frac{(r_k^{(1)}(1-\gamma) + \gamma \cdot n \cdot r_{k+1-n}^{(n)})\langle f \rangle + (m^{(1)}(1-\gamma) + \gamma \cdot n \cdot m^{(n)} - \gamma \cdot n \cdot \mu - \gamma \cdot m^{(1)})Q_{k-1} + \gamma \cdot \mu \cdot Q_{k-n}}{\langle f \rangle}.$$

В явной форме для Q_k можно записать выражение:

$$Q_k = \frac{(r_k^{(1)}(1-\gamma) + \gamma \cdot n \cdot r_{k+1-n}^{(n)})\langle f \rangle + (m^{(1)}(1-\gamma) + \gamma \cdot n \cdot m^{(n)} - \gamma \cdot n \cdot \mu) f_{k-1} Q_{k-1} + \gamma \cdot \mu \cdot f_{k-n} Q_{k-n}}{\langle f \rangle + \langle f \rangle \gamma(n-1) + f_k [m^{(1)} \cdot (1-\gamma) + \gamma \cdot n \cdot m^{(n)} - \gamma(n-1) \cdot \mu]}, \quad (5)$$

где $k = g, g+1, \dots, M$, $\langle f \rangle = \sum_{k \geq g} f_k Q_k$.

Если нет n -ад, т. е. $\gamma = 0$, то получим известную формулу [8]:

$$Q_k = \frac{r_k^{(1)} \langle f \rangle + m^{(1)} \cdot f_{k-1} Q_{k-1}}{\langle f \rangle + m^{(1)} \cdot f_k}.$$

Если нет монад, т. е. $\gamma = 1$, при $n = 2$ получим:

$$Q_k = \frac{2 \cdot r_{k-1}^{(2)} \langle f \rangle + (2m^{(n)} - 2\mu) \cdot f_{k-1} Q_{k-1} + \mu \cdot f_{k-2} Q_{k-2}}{2\langle f \rangle + 2f_k \cdot m^{(2)} - f_k \mu}.$$

Калибровка графа по распределению степеней вершин

В задаче калибровки графа требуется найти параметры $\{r_k^{(1)}\}, \{r_k^{(n)}\}, \{f_k\}, \gamma, \mu$ при которых граф будет иметь заданное РСС вершин $\{Q_k\}$. Эту задачу можно решить, используя уравнение (5).

Выражая из (5) f_k , получаем рекуррентное соотношение:

$$f_k = \frac{[r_k^{(1)}(1-\gamma) + \gamma \cdot n \cdot r_{k+1-n}^{(n)}]\langle f \rangle}{a \cdot Q_k} - \frac{[\langle f \rangle + \langle f \rangle \gamma(n-1)]Q_k}{a \cdot Q_k} + \\ + \frac{[(m^{(1)}(1-\gamma) + \gamma \cdot n \cdot m^{(n)} - \gamma \cdot n \cdot \mu) f_{k-1} Q_{k-1} + \gamma \mu f_{k-n} Q_{k-n}]\langle f \rangle}{\langle f \rangle \cdot a \cdot Q_k}, \quad (6)$$

где $a = m^{(1)} \cdot (1-\gamma) + \gamma \cdot n \cdot m^{(n)} - \gamma(n-1) \cdot \mu$.

Соотношением (6) определяется определяющая функцию предпочтения последовательность $\{f_k\}$, каждый член которой имеет общий мультипликативный множитель $\frac{\langle f \rangle}{a}$.

Причем следует заметить, что последовательности $\{f_k\}$ и $\{Cf_k\}$, которые отличаются множителем $C > 0$, эквивалентны, учитывая формулу (1). Следовательно, мы можем приравнять

множитель $\frac{\langle f \rangle}{a}$ в правой части соотношения (6) к единице (определяя тем самым равенство $\langle f \rangle = a$) и записать это соотношение в более компактном виде:

$$f_k = \frac{r_k^{(1)}(1-\gamma) + \gamma n r_{k+1-n}^{(n)} - (1+\gamma(n-1))Q_k}{Q_k} + \frac{(m^{(1)}(1-\gamma) + \gamma n m^{(n)} - \gamma n \mu) f_{k-1} Q_{k-1} + \gamma \mu f_{k-n} Q_{k-n}}{\langle f \rangle \cdot Q_k}. \quad (7)$$

Учитывая, что в результате сделанного выбора мы имеем равенство $\langle f \rangle = a$, параметра $a = m^{(1)} \cdot (1-\gamma) + \gamma \cdot n \cdot m^{(n)} - \gamma(n-1) \cdot \mu$, получаем следующее рекуррентное соотношение:

$$f_k = \frac{r_k^{(1)}(1-\gamma) + \gamma \cdot n \cdot r_{k+1-n}^{(n)} - (1+\gamma(n-1))Q_k}{Q_k} + \frac{(m^{(1)}(1-\gamma) + \gamma \cdot n \cdot m^{(n)} - \gamma \cdot n \cdot \mu) f_{k-1} Q_{k-1} + \gamma \mu f_{k-n} Q_{k-n}}{[m^{(1)} \cdot (1-\gamma) + \gamma \cdot n \cdot m^{(n)} - \gamma(n-1) \cdot \mu] \cdot Q_k}, \quad (8)$$

где $k = g, g+1, \dots, M$.

Формула (8) является решением задачи калибровки графа. Она позволяет для реализации заданного РСС $\{Q_k\}$ получить бесконечно много последовательностей весов $\{f_k\}$, фактически задающих функцию предпочтения $f(k)$, в зависимости от того, какие параметры $\{r_k\}$, γ , μ и m будут выбраны.

Численные эксперименты

Полученные формулы можно проверить экспериментально путем использования электронных таблиц.

На рис. 5 в среде электронных таблиц представлен результат калибровки графа, когда в качестве приращения использовались диады (связанные пары вершин). При этом требовалось реализовать следующее распределение степени связности вершин в генерируемом графе:

$$Q_k = \frac{12}{k(k+1)(k+2)},$$

что соответствует распределению степени связности вершин графа БА с параметром $m = 2$ (при использовании графу предпочтительного связывания с одновершинным приращением).

В процессе калибровки по формуле (8) получены значения функции предпочтения $f(k)$. Результаты были проверены пересчетом по формуле (5) с параметрами $\gamma = 1$, $n = 2$, $\mu = 1$.

Как можно видеть, результаты расчетов в электронной таблице приводят к получению искомого распределения.

На рис. 4 приведены результаты генерации графа с заданными параметрами после добавления 50 тыс. приращений, в качестве графа затравки использовался полный граф, содержащий 4 вершины. Отклонение статистических оценок первых десяти значений распределения степени связности, полученных путем генерации графа, находятся в пределах статистической погрешности.

На рис. 6 представлена калибровка графа с использованием пентад (полных графов в приращении, содержащих 5 вершин) и монад. Вероятность появления пентад $\gamma = 0.01$. В качестве базового распределения степеней связности вершин взято сглаженное распределение, полученное по данным о сети автономных систем Интернет (доступного по электронному адресу <http://www-personal.umich.edu/~mejn/netdata/as-22july06.zip>).

	A	B	C	D	E	F	G	H	O	P	Q	R	S	T
13	в приращении				k	Qk(k)	f(k)	Qk(fk)						
14	i	r(i)			теор		по нов формуле			Результаты генерации графа мю = 1 гамма=1				
18	0	0			0	0	0	0						
19	1	0			1	0	1	0						
20	2	1			2	0	2	0						
21	3	0			3	0,526316	3	\$2*(2-1)*\$E\$10-\$		Вершин	100004			
22					4	0,143541	4	0,14354067		Ребер	250006			
23					5	0,109091	5	0,109090909		m	2,49996			
24					6	0,059467	6	0,059466849		k	n(k)	Qk(k)		
25					7	0,040615	7	0,040614733		0	0	0		
26					8	0,027218	8	0,027217864		1	0	0		
27					9	0,019454	9	0,019453755		2	0	0		
28					10	0,014198	10	0,014197763		3	52580	0,525779		
29					11	0,010675	11	0,010675327		4	14376	0,143754		
30					12	0,008192	12	0,008192061		5	11001	0,110006		
31					13	0,006409	13	0,00640894		6	6051	0,060508		
32					14	0,005095	14	0,005094946		7	3984	0,039838		
33					15	0,004109	15	0,004108631		8	2706	0,027059		
34					16	0,003355	16	0,003354968		9	1946	0,019459		
35					17	0,00277	17	0,002770303		10	1427	0,014269		
36					18	0,00231	18	0,002310465		11	1025	0,01025		
37					19	0,001944	19	0,001944357		12	769	0,00769		
38					20	0,00165	20	0,001649628		13	614	0,00614		
39					21	0,00141	21	0,001409971		14	536	0,00536		
40					22	0,001213	22	0,001213307		15	405	0,00405		
41					23	0,001051	23	0,001050568		16	317	0,00317		

Рис. 5. Проверка полученных формул для графа БА с параметром $m = 4$

[illegible]

Рис. 6. Калибровка случайного графа с использованием электронных таблиц

На рис. 6 представлено сглаженное распределение для степени связности вершин исследуемой сети автономных систем и распределение для степени связности вершин сгенерированного графа. Как можно видеть на рис. 7, при малых значениях локальной степени связности распределения совпадают, при больших значениях выборка отсутствует (отсюда

большие отклонения), поскольку генерируется граф небольшого размера. Заметим также, что теоретическое распределение для генерируемых графов соответствует сглаженному распределению.

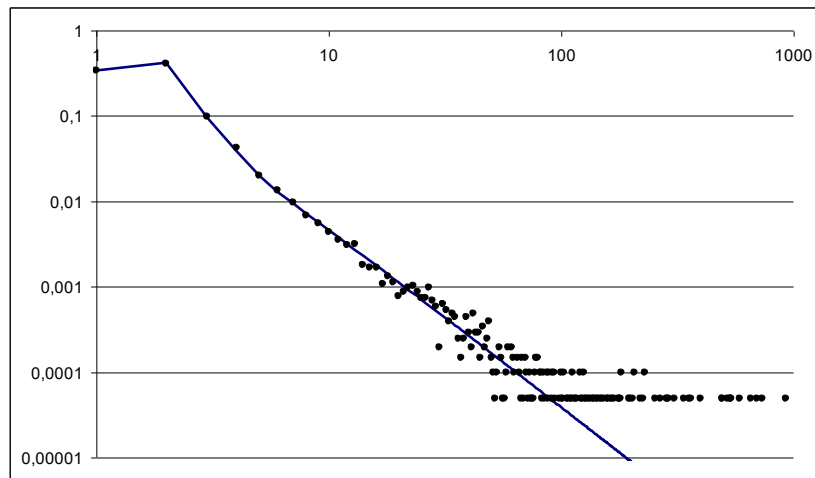


Рис. 7. Сглаженное распределение степени связности узлов в сети автономных систем (линия) и в реализации случайного графа того же размера с использованием пентад (маркеры)

Заключение

Несмотря на многочисленные публикации по анализу сообществ в реальных сетях, число работ, решающих более фундаментальные вопросы о моделировании механизмов возникновения сообществ, немного. Так, в работах [9, 10] предлагаются геометрические графы предпочтительного связывания (где геометрия задает степень подобия, влияющую на предпочтение присоединения, и определяющую форму сообществ), в работах [11, 12], предлагается «генерировать» графы как отдельные слабосвязанные между собой компоненты (которые тоже можно рассматривать как сообщества). В данной работе предложен случайный граф, с помощью которого моделируется добавление сообществ как единого целого. Такому процессу можно найти интерпретацию в социальных сетях. Так, при появлении очередной учебной группы, в подсеть добавляются новые узлы (представляющие собой студентов), которые сразу же становятся связанными между собой (об этом свидетельствуют исследования, в том числе [13]: студенты, как правило, связываются в подсети с другими студентами из своей учебной группы).

Дальнейшее развитие предложенной модели может состоять в учете и других процессов, происходящих в сетях. Так в работах [14, 15] путем анализа динамики изменений структуры сети выявляются такие процессы как разрушения сообществ (разбиение на несколько меньших или полное уничтожение сообщества), связь возраста сообщества и его размера.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 16-31-60023 мол_а_дк.

Литература

1. Barabási A. L., Albert R. Emergence of scaling in random networks // Science. 1999. Vol. 286. P. 509–512.
2. Dorogovtsev S. N., Mendes J. F. F., Samukhin A. N. Generic scale of the “scale-free” growing networks // Phys. Rev. Vol. 63. 2001.
3. Klemm K., Eguíluz V. Highly clustered scale-free networks // Phys. Rev. Vol. 65. 2002.
4. Jackson M. O., Rogers B. W. Meeting strangers and friends of friends: How random are social networks? // Am. Econ. Rev. 2007. № 97 (3). P. 890–915.

5. Zadorozhnyi V. N., Yudin E. B. Structural properties of the scale-free Barabasi – Albert graph // Automation and Remote Control. 2012. № 73 (4). P. 702–716. doi: 10.1134/S0005117912040091.
6. Zadorozhnyi V. N., Yudin E. B. Dynamic equations of node degrees in growing networks with connection losses // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). 2016. art. no. 7819111. P. 1–5. doi: 10.1109/Dynamics.2016.7819111.
7. Palla G., Barabási A.-L., Vicsek T. Quantifying social group evolution // Nature. 2007. № 446. P. 664–667.
8. Задорожный В. Н. Случайные графы с нелинейным правилом предпочтительного связывания // Проблемы управления. 2011. № 6. С. 2–11.
9. Zuev K., Boguñá M., Bianconi G., Krioukov D. Emergence of Soft Communities from Geometric Preferential Attachment // Scientific Reports. 2015. № 9421. doi:10.1038/srep09421.
10. Dorodnykh A., Ostroumova Prokhorenkova L., Samosvat E. Preferential placement for community structure formation // In International Workshop on Algorithms and Models for the Web-Graph. Springer, 2017. P. 75–89.
11. Klemm K., Eguiluz V. M. Growing scale-free network with small world behavior // Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys. 2002. № 65.
12. Zadorozhnyi V. N., Yudin E. B., Yudina M. N. Analytical and numerical methods of calibration for preferential attachment random graphs // International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON ; S. Seifullin Kazakh Agrotechnical University Astana; Kazakhstan; 29–30 June 2017. Astana, 2017. doi: 10.1109/SIBCON.2017.7998461.
13. Юдина М. Н. Узлы в социальных сетях: меры центральности и роль в сетевых процессах // Омский научный вестник. 2016. № 4 (148). С. 161–165.
14. Chi Y., Song X., Zhou D., Hino K., and Tseng B. L. Evolutionary spectral clustering by incorporating temporal smoothness // KDD '07: Proceedings of the 13th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, ACM. N.Y., USA, 2007. P. 153–162.
15. Lin Y.-R., Chi Y., Zhu S., Sundaram H., and Tseng B. L. Facetnet: a framework for analyzing communities and their evolutions in dynamic networks // WWW '08: Proceedings of the 17th International Conference on the World Wide Web, ACM. N.Y., USA, 2008. P. 685–694.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 004.94:551.576

МЕТОДЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПОГОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ИМИТАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Н. А. Агафонов, А. М. Гиацингов, А. В. Родителев

*Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт
системных исследований РАН,
agafonovkolja@gmail.com, algts@inbox.ru, avrod_94@mail.ru*

При моделировании внекабинного пространства в авиационных тренажерных комплексах, зачастую, необходимо воспроизводить эффекты, возникающие при полетах в облаках. При этом нужно обеспечить работу подсистемы визуализации в режиме реального времени с частотой смены кадров не менее 25 в секунду. В работе проанализированы подходы к визуализации облачности: использование skybox, процедурное моделирование, моделирование на основе клеточного автомата, использование шума Перлина совместно с билбордами и вокселями. Выявлены основные недостатки, такие как невозможность пролета сквозь облака, низкая реалистичность и высокая ресурсоемкость. Показано, что среди всех, подход с использованием шума Перлина совместно с билбордами дает наиболее реалистичные результаты и обеспечивает работу подсистемы визуализации в масштабе реального времени с заданной частотой кадров.

Ключевые слова: визуализация, имитационные системы, облачность, шум Перлина, процедурное моделирование.

VISUALIZATION METHODS OF WEATHER EVENTS IN SIMULATION SYSTEMS

N. A. Agafonov, A. M. Giatsintov, A. V. Roditelev

*System Research Institute, Russian Academy of Sciences,
agafonovkolja@gmail.com, algts@inbox.ru, avrod_94@mail.ru*

It is necessary to simulate the events that occur during cloud flying when modeling outside world in flight simulators. In addition to that, visualization system should work in real-time with no less than 25 frames per second. This article presents an analysis of different types of cloud visualization: procedural modelling, modelling with the use of cellular automaton, skyboxes, the Perlin noise used in conjunction with billboard and voxel rendering. Major disadvantages of these methods are presented, such as computational complexity, lack of realism and inability to fly through the clouds. It is demonstrated that the use of the Perlin noise in conjunction with billboards provides better performance of the visualization system and more realistic results.

Keywords: visualization, simulation systems, clouded sky, Perlin noise, procedural modeling.

Введение

В настоящее время, в связи со значительной сложностью технических систем, при эксплуатации возникает риск возникновения нештатных и опасных для жизни ситуаций, появляется потребность в тренажерно-обучающих системах. Тренажерно-обучающая система оператора сложной технической системы (далее – ТОС) – техническое средство для подготовки операторов сложных технических систем, отвечающее требованиям методик подготовки, обеспечивающее получение знаний, навыков и умений, реализующее модель таких систем и осуществляющее контроль над действиями обучаемого, а также для исследований

[1]. ТОС могут применяться для формирования индивидуальных профессиональных навыков и умений, а также отработки групповых операций. Подсистема визуализации ТОС обеспечивает отображение результатов моделирования внешней среды и объекта управления с помощью устройств отображения информации. Подсистема должна обеспечивать воспроизведение визуальной картины с достаточно подробным содержанием, позволяющим операторам ТОС успешно выполнять поставленные задачи. Визуализация погодных явлений – неотъемлемая часть при создании авиационных ТОС [2]. При моделировании внекабинного пространства зачастую необходимо воспроизводить эффекты, возникающие при полетах в облаках. В руководстве ИКАО 9625, описаны требования, предъявляемые к визуализации внекабинного пространства. Должны воспроизводиться следующие эффекты: переменная плотность облаков, многослойная облачность, включая отдельные, рассеянные и разорванные облака, а также сплошная облачность, которая частично или полностью препятствует обзору поверхности земли, постепенный выход из облаков и переход к видимости окружающей обстановки. Так же немаловажным условием является дальность прорисовки облаков. В реальных условиях, видимость может достигать десятков километров. При этом необходимо обеспечить работу подсистемы визуализации в режиме реального времени с частотой смены кадров не менее 25 в секунду [3]. Для решения данной задачи, вначале необходимо проанализировать типы облаков и способы их визуализации.

Виды облаков. Метеорологи классифицировали облака в зависимости от их внешнего вида. Каждый из этих типов имеет латинское название, такое как «stratocumulus (слоисто-кучевые)». Эти названия формируются из следующих корней: кучевые облака (cumulus) – плотные, днем ярко-белые облака со значительным вертикальным развитием. Высота нижней границы обычно от 800 до 1500 м, иногда – 2–3 км и более. Толщина составляет 1–2 км, иногда – 3–5 км. Верхние части кучевых облаков имеют вид куполов или башен с округлыми очертаниями. Слоистые облака (stratus) образуют однородный слой, сходный с туманом, но расположенный на некоторой высоте (чаще всего от 100 до 400 м, иногда 30–90 м). Обычно они закрывают все небо, но иногда могут наблюдаться в виде разорванных облачных масс. Перистые (cirrus) – отдельные, тонкие, нитеобразные облака в виде белых тонких волокон или чуть сероватых вытянутых гряд и клочьев, часто имеющие вид бородки пера, обыкновенно белого цвета; иногда располагаются полосами, пересекающими небесный свод подобно меридианам [4].

Основным источником света в дневное время служит солнце, как результат – цвет облаков в большей степени зависит от солнца. Вот почему мы видим белые облака в полдень и красные на закате. Однако не только солнце влияет на цвета облаков. Они так же зависят от цвета неба и земли. Ночью основным источником света становится луна, когда она видима.

Skybox. Существует несколько подходов к визуализации облаков, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Один из подходов основан на использовании Skybox – панорамная текстурой, которая находится за всеми объектами в сцене, чтобы визуализировать небо. Это шесть текстур, представляющие шесть видимых направлений вдоль основных осей. Если Skybox создан правильно, изображения создают непрерывный окружающий образ без швов, который можно рассматривать «изнутри» в любом направлении. Таким образом, Skybox – это простой способ повысить реалистичность сцены с минимальной нагрузкой на видеокарту. С помощью данного подхода можно реализовать реалистичное облачное небо, но он не приемлем для авиационных тренажеров, поскольку невозможно выполнение пролета сквозь облака.

Визуализация облачного неба с использованием моделей. В данном подходе облачность формируется с помощью шаблонов: для облаков различного типа дизайнеры подготавливают соответствующее количество моделей, составленных из заданного числа частиц. Затем из этих моделей либо на основе случайного распределения, либо вручную формируется облачный слой. Существенным недостатком такого метода является ограниченное число моделируемых типов облачной поверхности.

Процедурное моделирование для создания кучевых облаков использует пирокластические сферические примитивы. Такие примитивы можно получить путем фрактального смещения вершин сферы либо на случайную величину (2D смещение), либо на случайный вектор (3D смещение). Обычно в качестве функции фрактального смещения используется так называемое фрактальное броуновское движение. Важной особенностью процедурного моделирования является отсутствие ограничений в степени детализации. Таким образом, доступно любое желаемое разрешение моделирования. Процедурное моделирование позволяет представить объект в аналитической форме. Отсюда основной недостаток – вычислительные затраты возрастают с увеличением сложности аналитической записи модели. В то же время не существует и ограничений, в количестве вариаций получаемых моделей.

Моделирование на основе клеточного автомата. Метод основывается на двух процессах: моделирование и рендеринг. Пространство моделирования разделено на воксели. Воксели – аналоги двумерных пикселей для трехмерного пространства и соответствуют ячейкам, используемым в клеточном автомате. Каждая ячейка имеет три логические переменные: пар/влажность (hum) определяет, достаточно ли воды для формирования облака; облачность (cld) показывает, содержит ли ячейка часть облака; активация (act) указывает, что фазовый переход готов к осуществлению. Состояние каждой переменной будет равно 0 или 1. Эволюция облаков моделируется путем применения простых правил перехода на каждом временном шаге. Правила перехода описывают образование, угасание и реакцию на ветер. Так как состояние равно 0 или 1, правила могут быть выражены булевыми операциями. Изображения генерируются в процессе рендеринга с использованием результатов моделирования. Для каждого вокселя, исходя из правил, определяется наличие или отсутствие облака. Затем облака визуализируются с использованием метода объемного рендеринга. Процесс рендеринга состоит из двух шагов. Первый шаг вычисляет интенсивность света, достигающего центра каждого вокселя. Тени от облаков также вычисляются на этом этапе [5]. На следующем шаге генерируется изображение.

Данный подход обеспечивает визуализацию в режиме реального времени. Однако при таком подходе наблюдается средняя реалистичность выходных изображений.

Подход к визуализации облаков с помощью шума Перлина. Это градиентный шум, состоящий из набора псевдослучайных единичных векторов (направлений градиента), расположенных в определенных точках пространства и интерполированных функцией сглаживания между этими точками. Для генерации шума Перлина в одномерном пространстве необходимо для каждой точки этого пространства вычислить значение шумовой функции, используя направление градиента (или наклон) в указанной точке. Алгоритм шума Перлина можно масштабировать для одно-, двух- и трехмерного вида. Более того, в алгоритм можно ввести четвертое временное измерение, позволяя алгоритму динамически изменять текстуры во времени [6]. Используя шум Перлина, можно процедурно генерировать трехмерные карты облачности, тем самым мы имеем значительное число вариаций облаков.

Использование билбордов. Билборд – это полигон, все время направленный на наблюдателя. В данном подходе облачная поверхность представляет собой трехмерную решетку, в узлах которой находятся билборды. С помощью шума Перлина, путем складывания октав шума, генерируется трехмерная карта облачности. На основе этой карты выставляются позиции билбордов. После чего к каждому билборду применяется небольшая текстура, соответствующая части облака. Для корректного отображения облачной поверхности, необходимо производить сортировку билбордов от дальнего к ближнему относительно позиции камеры. Так же возможно применение следующих оптимизаций: облачная поверхность делится на сектора, и выполняется проверка, какие из секторов попадают в область видимости камеры. Видимые сектора сортируются от дальнего к ближнему, а не входящие в область видимости отсекаются. Также необходимо отсекают сектора полностью скрытые за другими секторами. Так же для всех билбордов в видимых секторах необходимо рассчитать цвет с уче-

том источников света, плотности и рассеяния. Данный подход дает хорошие показатели реалистичности и обеспечивает работу в режиме реального времени.

Визуализация с помощью вокселей. Отличием данного подхода от предыдущего является использованием вокселей вместо билбордов. Таким образом, небо представляется трехмерной решеткой, в узлах которой находятся воксели. С помощью шума Перлина генерируется трехмерная карта облачности, далее на основе этой карты идет выставление позиций вокселей. После чего, при помощи трассировки лучей света, рассчитывается цвет вокселей с учетом источников света, плотности облаков и рассеяния света. Данный подход дает более детализированный результат в сравнении с билбордами, но является более ресурсозатратным и сложен в оптимизации.

Повышение производительности прорисовки облаков. Важную роль в достижении реалистичности отображаемых облаков играет освещение. При традиционном (forward rendering) подходе расчет освещения производится следующим образом: для каждой вершины в трехмерной сцене и каждого пикселя конечного изображения, выводимого на экран, последовательно производится расчет влияния каждого источника света в сцене, т. е. этапы расчета освещения и геометрической обработки выполняются для каждого пикселя. Кроме того, расчеты будут произведены даже для скрытых и перекрывающихся поверхностей, а также для тех пикселей, которые могут не попасть в итоговое изображение. Соответственно, при большом количестве источников света производительность подсистемы визуализации может быть существенно снижена.

Для повышения производительности разрабатываемой подсистемы применяют метод так называемой отложенной визуализации, в частности, отложенного освещения. Основной идеей является отделение этапа геометрической обработки от этапа освещения трехмерной сцены. Прорисовка изображения осуществляется в несколько этапов. Вся геометрия сцены прорисовывается один раз, при этом, сохраняется информация о цвете, нормалях и глубине прорисовки для каждого пикселя в промежуточный G-Buffer, который используется на последующих этапах прорисовки [7]. Далее, используя информацию о цвете, глубине и нормалях, сохраненную в G-Buffer, производится расчет освещения. Затем итоговое изображение копируется в кадровый буфер. Всего этапов четыре: этап геометрической обработки, этап освещения, этап постобработки и заключительный этап [8].

Однако прорисовка трехмерных сцен при помощи отложенной визуализации также имеет множество ограничений. Во-первых, существуют значительные проблемы с отображением полупрозрачных объектов из-за того, что в G-Buffer сохраняется информация только о ближайшем к виртуальной камере трехмерной объекте. Во-вторых, ограничено применение аппаратного сглаживания изображения (Multisample Anti-aliasing – MSAA) из-за сложности реализации. В-третьих, отложенная визуализация характеризуется значительным расходом видеопамяти, который увеличивается при повышении разрешения итогового изображения, а также значительным объемом данных, передаваемых по шине данных при прорисовке каждого кадра.

В настоящее время существует несколько методов, устраняющих некоторые недостатки отложенной визуализации с сохранением ее преимуществ. Одним из таких методов является тайловая (плиточная) визуализация, которая может применяться как с традиционным подходом к освещению трехмерной сцены, так и с отложенным [9]. Отложенная визуализация с помощью тайлов позволяет уменьшить объем передаваемых данных по шине, но увеличивает общий объем вычислений, связанных с освещением. С учетом мощностей современных графических адаптеров, применение отложенной визуализации с помощью тайлов обеспечивает значительное увеличение производительности системы визуализации, по сравнению с «чистой» отложенной визуализацией.

Принцип тайловой визуализации состоит в группировании пикселей итогового изображения, которое будет отображено на экране, в прямоугольные участки (тайлы), а также использовании значения глубины каждого пикселя для определения дополнительных зон види-

мости – усеченных пирамид (View Frustum). Соответственно, тайлы, в которых находятся пиксели со схожими значениями глубины, например, в данных пикселях отображается один и тот же трехмерный объект, определяют достаточно небольшой объем трехмерного пространства. В то же время, для тайлов, пиксели, которых существенно отличаются по значениям глубины, дальняя граница ограничивающего объема тайла должна совпадать с максимальным значением глубины его пикселей. Это снижает эффективность отсечения обрабатываемых источников света, и приводит к прямой зависимости производительности от выводимого изображения [10]. Данный аспект особенно нежелателен в приложениях, работающих в режиме реального времени (не менее 25 кадров в секунду), так как становится практически невозможно гарантировать стабильность частоты смены кадров системы визуализации.

Заключение

С помощью описанных подходов возможна визуализация облачного неба, однако не все из них подходят для авиационных ТОС. В подходе с использованием skybox не реализуется пролет сквозь облака. Использование моделей дает слишком малое количество вариаций облаков. Моделирование на основе клеточного автомата дает низкие показания реалистичности. Среди всех подходов, методы с использованием шума Перлина позволяют добиться требуемых результатов, при этом обеспечивается визуализация в режиме реального времени.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 17-07-00169 А.

Литература

1. Гиацинтов А. М., Мамросенко К. А., Решетников В. Н. Инструментальные средства предтренажерной и тренажерной подготовки операторов сложных технических систем [Электронный ресурс] // Программные продукты, системы и алгоритмы. 2014. № 1. С. 1–3. URL: <http://swsys-ru/simulator-training-operators.html> (дата обращения: 08.07.2015).
2. Мамросенко К. А., Решетников В. Н. Моделирование подстилающей поверхности в имитационных системах // Программные продукты и системы. 2015. № 4. С. 70–74.
3. Мамросенко К. А. Имитационно-тренажерные и обучающие распределенные системы // Программные продукты и системы. 2008. № 3. С. 32–35.
4. Решетников В. Н., Мамросенко К. А. Основы построения тренажерно-обучающих систем сложных технических комплексов // Программные продукты и системы. 2011. № 3. С. 86–90.
5. Андреев А. О., Дукальская М. В., Головина Е. Г. Облака: происхождение, классификация, распознавание. СПб. : РГГМУ, 2007. 228 с.
6. Dobashi Y., Kaneda K., Yamashita H., Okita T., Nishita T. A Simple, Efficient Method for Realistic Animation of Clouds. N.Y. : ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co, 2000. P. 19–28.
7. Боресков А. Steps3D – Tutorials – Deferred Shading. [Электронный ресурс]. URL: <http://steps3d.narod.ru/tutorials/ds-tutorial.html> (дата обращения: 08.07.2015).
8. Alamia M. Coding Labs: Simple OpenGL Deferred Rendering Tutorial [Электронный ресурс]. URL: http://www.codinglabs.net/tutorial_simple_def_rendering.aspx (дата обращения: 08.07.2015).
9. Olsson O., Assarsson U. Tiled Shading // J. Graph. GPU Game Tools. 2011. Т. 15. № 4. С. 235–251.
10. Гиацинтов А. М., Мамросенко К. А. Отображение трехмерных объектов с использованием кластерной визуализации // Программные продукты и системы. 2016. № 4. С. 69–72.

УДК 004.056.2:77

ПРОБЛЕМА ИДЕНТИФИКАЦИИ ФАЛЬСИФИКАЦИИ ЦИФРОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Г. А. Аптюкова, А. В. Никифоров, Т. В. Гавриленко

*Сургутский государственный университет,
aptjukova@rambler.ru, klgdante@gmail.com, taras.gavrilenko@gmail.com.*

В настоящее время благодаря разнообразному инструментарию программ очень просто модифицировать файлы. В данной статье авторами рассматриваются проблемы идентификации подлинности фото-, видео- или аудиофайлов.

Ключевые слова: цифровое изображение, фотография, видеозапись, фальсификация, идентификация.

IDENTIFICATION PROBLEM OF DIGITAL IMAGE ADULTERATION

G. A. Aptjukova, A. V. Nikiforov, T. V. Gavrilenko

*Surgut State University,
aptjukova@rambler.ru, klgdante@gmail.com, taras.gavrilenko@gmail.com.*

There are various tools currently helping to easily alter files. This paper considers genuineness identification problems of photo, video and audio files.

Keywords: digital image, photograph, video, adulteration, identification.

Развитие цифровых технологий повлекло за собой изменение формы жизни, трансформацию социальных отношений с новыми способами коммуникации, такими как социальные сети. Например, статистика показывает, что каждый день в Instagram публикуется 85 млн фото и видео [1].

Возрастающее количество производимых фотографий и видео связано с доступностью и распространением различных устройств для их создания: смартфоны, фотоаппараты, видеокамеры, веб-камеры, видеорегистраторы и т. д. Создание фотографии перестало быть чем-то, требующим специальных познаний и навыков, став неотъемлемой составляющей жизни современного человека.

Вместе с постоянным совершенствованием устройств для создания фотографий, совершенствуются и инструменты обработки изображений, которые имеют свою негативную сторону, поскольку упрощают процесс подделки изображений сторонними лицами.

Фальсификация цифрового изображения может производиться в политических, рекламных, зачастую корыстных целях. Известны примеры фальсификаций исторических фотографий (рис. 1) [2].



Рис. 1. Фальсификация исторических фотографий

Ретуширование фотографий можно встретить и на фотографиях современных мировых изданий. На рис. 2 в Иране запускают ракеты. На фальсифицированной фотографии одна из ракет дорисована (рис. 2) [3].



Рис. 2. Фальсификация современных фотографий

Фото-, видеозаписи могут служить поводом к возбуждению дела об административном правонарушении. К примеру, каждый гражданин Российской Федерации вправе обратиться с жалобой в ГИБДД на нарушителя правил дорожного движения, при этом доказательством нарушения является фотография или видеозапись. Существующие программные средства позволяют в цифровом изображении перенести объект, в данном случае автомобиль, на другой фон, к примеру, на тротуар. И такая фальсифицированная фотография, направленная в ГИБДД, в соответствии со статьей 12.19 Кодекса Российской Федерации об административных правонарушениях повлечет наложение административного штрафа в размере одной тысячи рублей на владельца автомобиля.

При этом, установленный Федеральным законом от 2 мая 2006 года № 59-ФЗ «О порядке рассмотрения обращений граждан Российской Федерации» и приказом МВД России от 12 сентября 2013 года № 707 «Об утверждении Инструкции об организации рассмотрения обращений граждан в системе Министерства внутренних дел Российской Федерации» порядок рассмотрения обращений граждан не предусматривает проверку фотографий на подлинность.

В данном случае, проведение фототехнической экспертизы будет нецелесообразно для владельца автотранспорта, поскольку стоимость экспертизы значительно превышает стоимость административного штрафа. Доказательством недостоверности фото-, видеозаписи будет опять же фотография или видеозапись, что автомобиль в указанный период времени находился в другом месте.

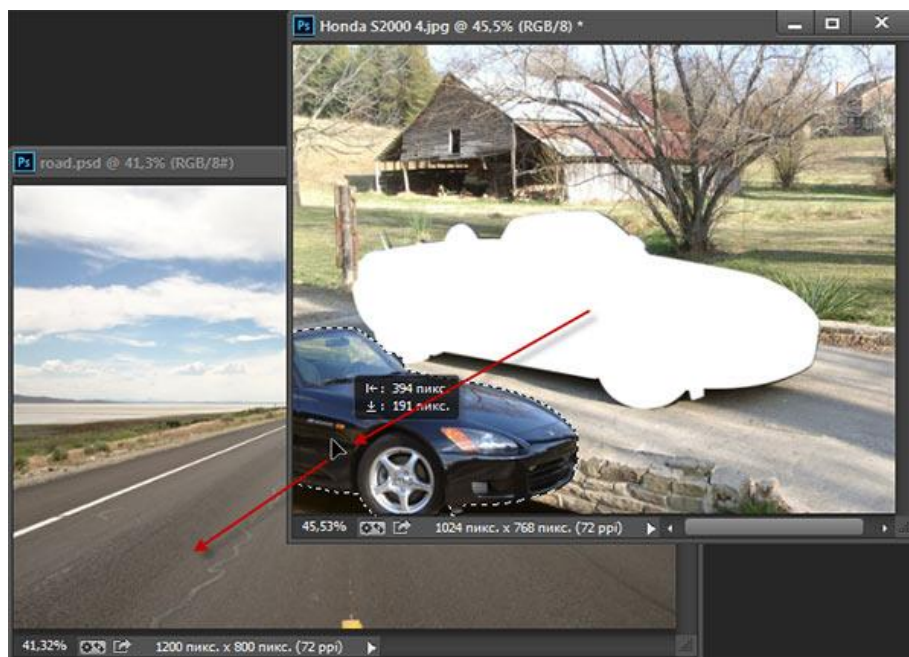


Рис. 3. Наложение автомобиля на другое изображение в Photoshop [4]

Записи с видеорегистратора автомобиля могут быть также изменены. На рис. 4 пример изменения видеозаписи, где убран дорожный знак «Уступите дорогу». Без знака перекресток становится равнозначным [5].



Рис. 4. Изменение видеозаписи

Компания Nvidia разработала алгоритм, использующий элементы искусственного интеллекта и способный значительно видеоизменять фотографии и видео. Эксперимент провели на роликах, полученных с автомобильных видеорегистраторов. Так, одно из исходных видео снималось зимой, а на обработанной версии алгоритм успешно превратил зиму в лето (рис. 5). Еще одно демонстрационное видео показывает, как день превратился в ночь (рис. 6) [6].

Для того, чтобы недобросовестные граждане не смогли отредактировать, изменить время и координаты съемки с видеорегистратора, будет создано приложение, на разработку которого правительство России выделит 2,5 млрд рублей. Правительство одобрило внесение в Госдуму проекта закона, который позволит гражданам самостоятельно фиксировать нарушения ПДД с помощью мобильного приложения. Материалы будут передаваться по мобильной связи в МВД для возбуждения дела [7].

Фотографии, изготовленные в ходе проведения следственных действий и оформленные в соответствии с требованиями действующего законодательства, могут иметь доказательственное значение в уголовном процессе. Каждое лицо, вовлеченное в процесс раскрытия и расследования преступления должно помнить и осознавать, что фотографии, фигурирующие по делу, могут быть фальсифицированы или подвергнуты сомнению [8].



Рис. 5. Изменение сезона на видео



Рис. 6. Искусственный интеллект меняет видео

И здесь ситуация обратная – есть доказательство виновности или невиновности в виде фото, видео- или аудиоинформации, но оно исключается из рассмотрения в деле, поскольку не удостоверяется подлинность представленных доказательств.

Именно фотографии являются основным доказательством, которое рассматривается страховыми компаниями в процессе возмещения ущерба застрахованных объектов. На сегодняшний день чаще всего с фальсификациями сталкивается сфера автомобильного страхования. Мошенники с помощью графических редакторов могут создать вполне реальное доказательство того, что их автомобиль разбит в ДТП. И наоборот, страхование разбитого автомобиля «задним числом», когда для страхования предоставляются фотографии автомобиля, измененные графическими редакторами в первоизданном виде (рис. 7) [9].

В 2011 г. для выявления фотомошенничества международной группой разработчиков, входящих в компанию SMTDP Tech, была создана программа Picture Manipulation Inspector. Однако этот проект не взлетел: вскоре выяснилось, что большинство страховых компаний собирают данные в непригодном для анализа формате (как правило, фото слишком сильно сжаты), а, чтобы организовать процедуру верификации, надо сначала перестроить всю систему работы с данными. В итоге бизнес по проверке документов для автостраховщиков так и не был запущен.

Для идентификации подлинности фото-, видео- или аудиофайлов классические способы, используемые в криптографии, не подходят. Это связано с тем, что при пересылке фото-,

видео- или аудиофайла через Интернет, происходит перекодирование исходного файла. Процесс перекодирования применяется для более эффективной передачи файла через Интернет. Однако после пересылки мы получаем не оригинальный файл, а его измененную копию. Далее на примере фотографии будет разобрано, какие проблемы создает перекодирование при идентификации фотографии и как оно влияет на характеристики исходного изображения.



Рис. 7. Страхование автомобиля задним числом

Первая проблема, возникающая при перекодировании, состоит в том, что оригинальная фотография имеет палитру типа RGBA, а после пересылки по Интернету палитра меняется на HSLA или другую. И как следствие последовательность байт кодирующая, один и тот же цвет, изменяется. Это изменение приводит к различным значениям хэш-суммы. Поэтому становится невозможным применение алгоритма расчета хэш-суммы для подтверждения подлинности.

Вторая проблема заключается в изменении кодов цветов на границе соприкосновения. В качестве примера возьмем коды двух цветов с оригинальной фотографии (рис. 1). Первый код: RGBA (255,198,24,1) и второй код: RGBA (255,24,214,1). Два этих цвета соприкасаются друг с другом на границе. Границу соприкосновения можно представить в виде прямой или кривой линии (рис. 8).

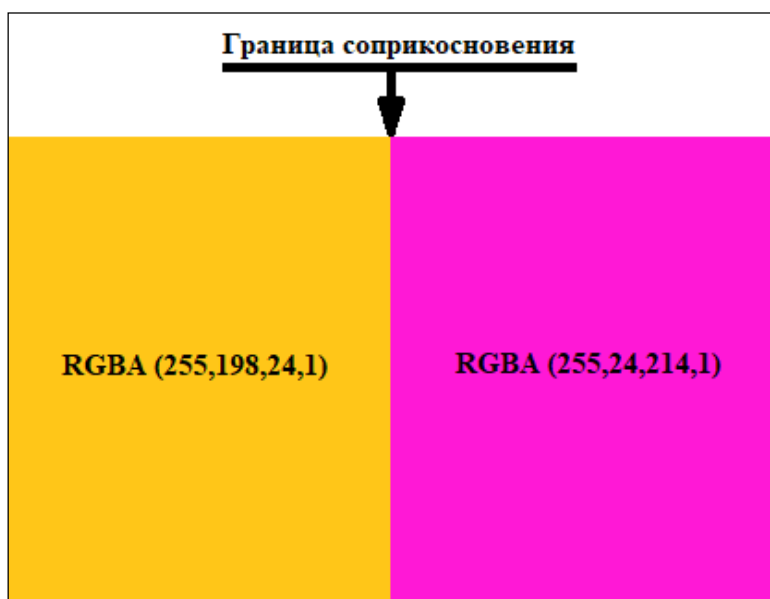


Рис. 8. Граница соприкосновения цветов

После пересылки и перекодирования фотографии по Интернету происходит изменение кодов цветов на границе соприкосновения. Первый код: RGBA (250,198,24,1) и второй код: RGBA (255,29,214,1). Становится очевидно, что один или несколько параметров, задающих цвет, были изменены в ходе перекодирования. Если изменяется только один параметр, то происходит создание нового оттенка на границе. При изменении нескольких параметров, то на границе соприкосновения может получиться даже новый цвет. Но для человеческого глаза все эти изменения останутся незамеченными. Достоверно рассчитать хэш-сумму также будет невозможно, так как в последовательности байт произошли изменения, не являющиеся посторонним вмешательством.

Третья проблема – это изменение общего размера исходного файла. Эта проблема является следствием первых двух. Возможное изменение типа палитры и количества байт, отводимых под один цвет, приводит к увеличению общего размера файла. Появляющиеся новые цвета на границе соприкосновения создают новые коды цветов, которые требуется хранить в исходном файле. Это также приводит к увеличению общего размера файла. Нельзя использовать хэш-сумму для идентификации подлинности фотографии, так как количество исходных байт для расчета хэш-суммы постоянно изменяется.

Из-за выше перечисленных проблем классические методы криптографии не будут корректно работать для определения достоверности фотографий. Поэтому требуется разработать новые методы идентификации, которые бы учитывали данные проблемы в процессе анализа фотографий на достоверность.

Литература

1. Интернет-статистика 2017 года: мобильный трафик, электронная коммерция, социальные сети, реклама и поисковые системы [Электронный ресурс]. URL: <https://sdvv.ru/articles/elektronnaya-kommertsiya/internet-statistika-2017-goda-mobilnyy-trafik-elektronnaya-kommertsiya-sotsialnye-seti-reklama-i-poi/> (дата обращения: 10.12.2017).
2. Глумов Н. И., Кузнецов А. В. Обнаружение на изображениях искусственных изменений локального происхождения // Автометрия. 2011. Т. 47. № 3. С. 4–12.
3. Самые известные фотофальсификации (51 фото + текст) [Электронный ресурс]. URL: <https://dezinfo.net/foto/6917-samyie-izvestnyie-fotofalsifikacii-51-foto-tekst.html> (дата обращения: 23.01.2018).
4. Наложение автомобилей на другое изображение в Photoshop [Электронный ресурс], URL: <https://rugraphics.ru/photoshop/nalozhenie-avtomobiley-na-drugoe-izobrazhenie> (дата обращения: 23.01.2018).
5. Улыбнитесь, вас снимает камера фиксации // Доброе утро. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.1tv.ru/shows/dobroe-utro/reportazh/ulybnites-vas-snimaet-kamera-fiksacii-dobroe-utro-fragment-vypuska-ot-18-10-2017> (дата обращения: 23.01.2018).
6. Nvidia научила искусственный интеллект подделывать фотографии и видео [Электронный ресурс]. URL: <https://hitech.newsru.com/article/05dec2017/nvidia> (дата обращения: 23.01.2018).
7. Власти разрабатывают мобильное приложение для фиксации нарушений ПДД [Электронный ресурс]. URL: <https://og.ru/society/2017/10/06/91876> (дата обращения: 23.01.2018).
8. Криминалистическое обеспечение раскрытия и расследования преступлений : материалы X Всерос. науч.-практ. круглого стола, 26 февраля 2016. Ставрополь : СФ КрУ МВД России, 2016. Ч. 1. 258 с.
9. Северюхин Я. Осторожно, фотомошенничество! // Современные страховые технологии. 2014. № 1. С. 60–65.

УДК 621.396.6.035.223.256

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА РАСЧЕТА ОТБРАКОВОЧНЫХ ДОПУСКОВ НА ЭЛЕКТРОРАДИОЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

К. И. Бушмелева¹, А. Б. Бажаев¹, С. У. Увайсов², П. Е. Бушмелев³

¹ Сургутский государственный университет, bkiya@yandex.ru, bazh.fit@gmail.com

² Московский технологический университет МИРЭА, uvaysov@yandex.ru

³ ООО «Газпром трансгаз Сургут», bpe@mail.ru

В данной работе представлена разработка автоматизированной системы расчета отбраковочных допусков на электрорадиоэлементы технических устройств выполненная на основе проведенного анализа и реализации по проектированию организационно-функциональной модели системы, физической модели базы данных и разработанному пользовательскому интерфейсу.

Ключевые слова: автоматизированная система, отбраковочные допуски, электрорадиоэлементы, печатный узел, организационно-функциональная модель, база данных.

AUTOMATED CALCULATION OF TOLERANCES SCREENING FOR ELECTRONIC COMPONENTS OF ELECTRONIC MEANS

K. I. Bushmeleva¹, A. B. Bazhaev¹, S. U. Uvaisov², P. E. Bushmelev³

¹ Surgut State University, bkiya@yandex.ru, bazh.fit@gmail.com

² Moscow Technological University MIREA, uvaysov@yandex.ru

³ ООО "Gazprom transgaz Surgut", bpe@mail.ru

The paper presents the development of an automated calculation system of tolerances screening for electronic components of technical devices. The study is based on an analysis and implementation for the layout of organizational-functional model of the system, physical model of the database and developed user interface.

Keywords: automated system, tolerances screening, electronic components, printed board assembly, organizational-functional model, data base.

Введение. В связи с высоким уровнем внедрения в различные сферы деятельности человека электронных средств (ЭС) их производство предполагает массовое изготовление различных узлов на платах печатного монтажа, т. е. печатных узлов (ПУ). При этом одной из основных проблем является обеспечение высоких показателей качества и надежности этой продукции, которое в свою очередь невозможно без применения на заводах-изготовителях разнообразных методов и средств контроля, в том числе технического диагностирования (ТД), на каждом этапе технологического процесса. Данное диагностирование представляет собой процесс определения технического состояния объекта диагностирования с определенной точностью и установление его вида. Существуют следующие виды технического состояния: исправность и неисправность, работоспособность и неработоспособность, правильное и неправильное функционирование.

Жизненный цикл любого объекта состоит из этапов производства и эксплуатации, к каждому из которых предъявляются определенные технические требования. Объект всегда должен удовлетворять требованиям, установленным в технической документации. Возникающие в объекте дефекты нарушают это соответствие. Задача диагностирования состоит в том, чтобы своевременно обнаружить дефекты, найти места и причины их возникновения и,

в конечном итоге, восстановить нарушенное дефектами соответствие объекта техническим требованиям [1].

Дефекты могут быть вызваны одной из следующих причин: ошибками в конструкторской и технологической документации; нарушением технологических процессов изготовления печатных узлов; отсутствием на предприятии стопроцентного входного контроля радиоэлементов электронных средств, в частности электрорадиоэлементов (ЭРЭ) (например, такие как резистор, конденсатор, катушка индуктивности и др.); нарушением технологического процесса подготовки ЭС к сборке; нарушением условий хранения и транспортировки; низкой квалификацией рабочих; психофизиологическим состоянием рабочих [2]. Ошибки проектирования представляют собой особый класс дефектов, также подлежащих устранению с помощью методов и средств ТД.

Система ТД в общем случае представляет собой совокупность: средств, объектов и, при необходимости, исполнителей, подготовленную к диагностированию или осуществляющую его по правилам, установленным соответствующей документацией. Различают системы:

- тестового диагностирования, особенностью которых является возможность подачи на объект диагностирования специально организуемых (тестовых) воздействий от средств диагностирования;

- функционального диагностирования, особенностью которых является подача на объект диагностирования только рабочих воздействий.

При проектировании ЭС в техническом задании на их выходные характеристики задаются допуски, которые в свою очередь должны находиться в пределах заданных допусков в процессе хранения и эксплуатации устройства. Эти допуски, в свою очередь, обеспечиваются технологическими допусками (q^H – нижний технологический допуск; q^B – верхний технологический допуск), на параметры ЭРЭ электронной схемы.

В процессе эксплуатации на параметры ЭРЭ оказывают воздействие различные внешние дестабилизирующие факторы (например, климатические: воздействие тепла и холода; давление; относительная влажность; солнечная радиация и механические: вибрационные нагрузки; ударные нагрузки), что приводит к изменению их начальных значений (рис. 1), а также влечет за собой выход этих параметров за пределы технологического допуска, происходит так называемый параметрический отказ, как результат – ЭРЭ переходит в неисправное состояние, что в свою очередь уменьшает показатель срока эксплуатации устройства. Размер влияния немало зависит от конструктивных особенностей ЭС, например, от количества и расположения элементов на печатном узле.

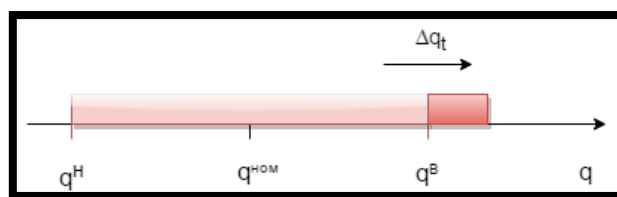


Рис. 1. Дрейф параметра ЭРЭ при воздействии дестабилизирующего фактора:

q^H – нижний технологический допуск; q^B – верхний технологический допуск;
 $q^ном$ – номинальное значение параметра; Δq_t – величина дрейфа параметра

Для предотвращения параметрического отказа ЭРЭ рассчитывают отбраковочные допуски (рис. 2), которые учитывают дрейф параметра при воздействии дестабилизирующих факторов [3].

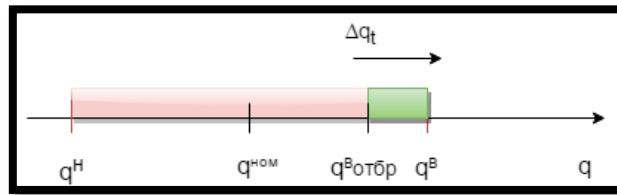


Рис. 2. Отбраковочный допуск параметра ЭРЭ:
 $q^B_{отбр}$ – верхний отбраковочный допуск

Расчет отбраковочного допуска позволяет произвести отбор элементов, параметры которых не выйдут за пределы технологического допуска, что гарантирует низкую долю вероятности выхода из строя ЭРЭ и обеспечивает на этапе проектирования исправность рассматриваемых ЭРЭ с точки зрения учитываемых факторов воздействия.

Целью данной работы является разработка автоматизированной системы, позволяющей производить расчет показателей технических систем, в частности, отбраковочных допусков на параметры ЭРЭ электронных средств на этапе проектирования с учетом таких дестабилизирующих факторов, как температурные режимы, что в свою очередь позволит повысить достоверность диагностирования ЭС.

Моделирование автоматизированной системы. На первом этапе была поставлена задача, спроектировать контекстную диаграмму автоматизированной системы. Данная диаграмма, как и диаграмма второго уровня, представлены на рис. 3, 4, выполнены по методологии функционального моделирования и графических нотаций IDEF0 [4]. Проектируемая система предстает в виде набора взаимосвязанных функциональных блоков. Каждая из четырех сторон функционального блока имеет свое определенное значение (роль):

- левая сторона имеет значение «Вход», в данном случае это данные, представляющие собой мощности тепловыделения ЭРЭ, получаемые в результате моделирования электрических процессов принципиальной схемы, геометрические и теплофизические параметры печатного узла, технологические допуски ЭРЭ;

- правая сторона имеет значение «Выход», эта характеристики, которые позволят на основе произведенных расчетов оценить различные показатели технических систем, в частности, температуру ЭРЭ, получаемую с помощью ПО по моделированию тепловых процессов; отбраковочные допуски ЭРЭ;

- верхняя сторона имеет значение «Управление», в данной системе элементом, выполняющим управляющее воздействие, являются техническая документация, в виде, технического задания (ТЗ), технических указаний (ТУ) на ЭРЭ, и печатный узел;

- нижняя сторона имеет значение «Механизм», это объекты, с помощью которых выполняется функция системы, ими являются проектировщик электронных средств, владеющий теоретическими и практическими знаниями в области радиоэлектроники, а также ЭВМ, на которой будет непосредственно осуществляется расчет.



Рис. 3. Контекстная диаграмма IDEF0 системы расчета отбраковочных допусков ЭРЭ

Декомпозированная контекстная диаграмма (рис. 4) состоит из трех функциональных блоков, один из которых представлен диаграммой третьего уровня. Первый функциональный блок описывает добавление в базу данных (БД) автоматизированной системы, информации о мощностях тепловыделения ЭРЭ. На вход второго функционального блока подаются данные по ЭРЭ. Во втором функциональном блоке производится расчет температур ЭРЭ при номинальных параметрах мощностей тепловыделения с помощью ПО моделирования тепловых процессов печатного узла. Кроме данных по ЭРЭ, входной информацией для данного блока является геометрические и теплофизические параметры печатного узла. Входными параметрами третьего функционального блока являются технологические допуски ЭРЭ, данные по ЭРЭ, полученные из первого блока.

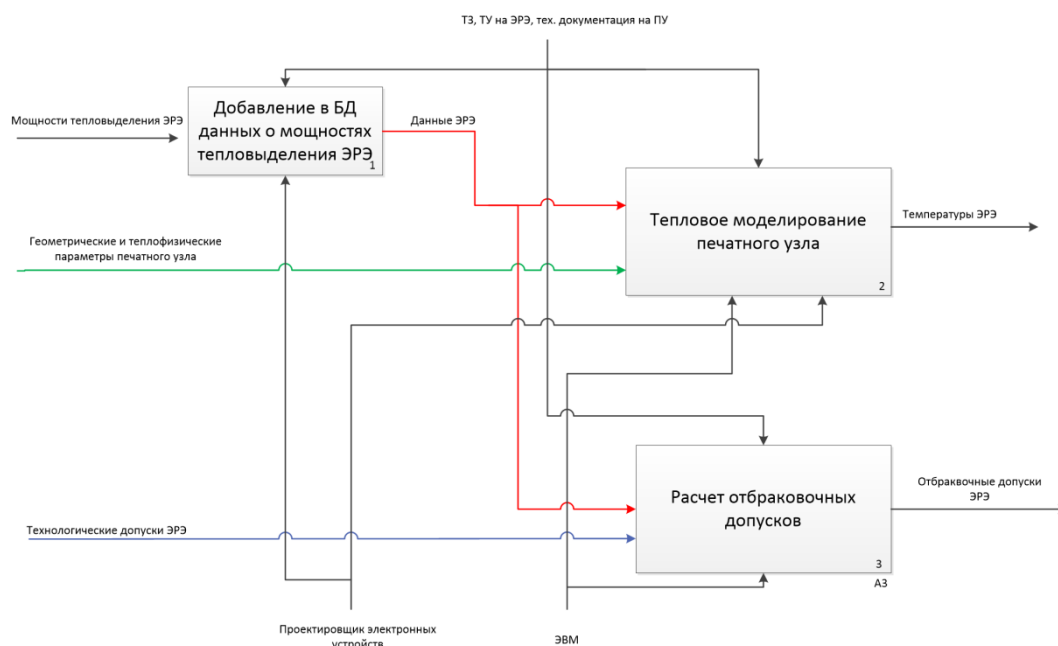


Рис. 4. Диаграмма второго уровня системы расчета отбраковочных допусков ЭРЭ

Задача расчета отбраковочных допусков, проводимая после расчета температур ЭРЭ при номинальных параметрах элементов, описана диаграммой третьего уровня. Расчет отбраковочных допусков проходит в два этапа. На первом этапе происходит получение температур ЭРЭ с учетом разброса посредством проведения теплового расчета модели печатного узла с помощью ПО моделирования тепловых процессов [5, 6]. Второй этап – это расчет отбраковочных допусков, сопровождаемый последующей проверкой теплофизических параметров ЭРЭ на основании заданного алгоритма, с целью коррекции нижних и верхних границ рабочих температур и теплофизических параметров ЭРЭ [7, 8].

Физическая модель БД разработана в среде Microsoft Management Studio в СУБД SQL Server и представлена на рис. 5. БД состоит из шести взаимосвязанных таблиц, основные характеристики которых представлены ниже.

Таблица «Проекты» содержит данные о значениях параметров электрического моделирования. Значения атрибута «Файл с остальными элементами», «Электрическая схема», «Модель печатной платы» являются типом *varbinary*, размер хранимых данных складывается из фактического размера хранимых данных плюс 2 байта. Таблица «Резисторы» содержит атрибуты, которые полностью описывают необходимые характеристики резистора, а также данные о результатах электрического моделирования и значение линейного температурного коэффициента. Таблица «Конденсаторы» содержит название элемента в схеме, названия производственной модели. Таблица «Модели конденсаторов» содержит атрибуты, которые

описывают характеристики конденсатора, не зависящие от конкретного конденсатора в принципиальной схеме. Таблицы «Катушки индуктивности» и «Модели катушек индуктивности» в первом случае содержат название элемента в схеме и ее производственной модели. Во втором – атрибуты, которые описывают характеристики катушек индуктивности, не зависящие от конкретной катушки индуктивности в принципиальной схеме. При этом информация о производственных моделях важна при проведении теплового расчета. От параметров моделей зависят геометрические параметры элементов модели печатного узла, например, размеры резистора прямо пропорционально зависят от мощности рассеивания, аналогично, размеры конденсатора прямо пропорционально зависят от напряжения.

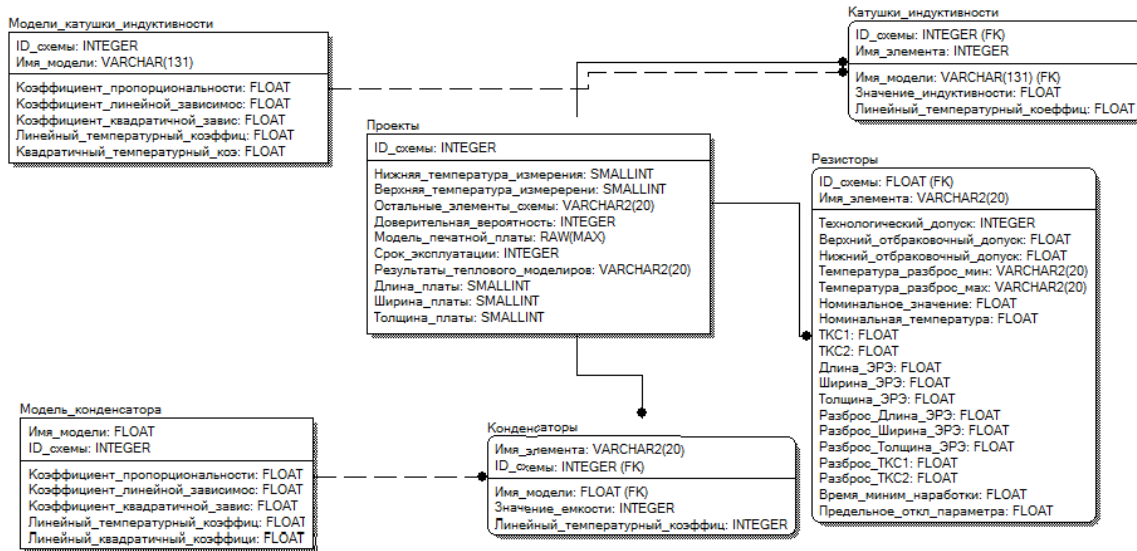


Рис. 5. Физическая модель БД системы расчета отбраковочных допусков ЭРЭ

Методика расчета отбраковочных допусков. Для расчета отбраковочных допусков ЭРЭ необходимо получить доверительные интервалы температур анализируемых элементов. Для этого проводят тепловое моделирование. Проведя заданное количество расчетов теплового режима модели конструкции печатного узла, получаем K значений температур на каждом элементе. Для вычисления допустимых интервалов на температуры ЭРЭ используется аппарат математической статистики, где первоначально рассчитывается математическое ожидание $M(T_n)$ по формуле (1):

$$M(T_n) = \frac{\sum_{k=1}^K T_n^k}{K}, \quad (1)$$

где T_n^k – значение температуры n -ого элемента на k -ой реализации;

K – количество значений температурных показателей ЭРЭ.

Дисперсия температуры $D(T_n)$ рассчитывается по формуле (2):

$$D(T_n) = \frac{\sum_{k=1}^K (T_n^k - M(T_n))^2}{K-1}, \quad (2)$$

Среднеквадратичное отклонение $\sigma(T_n)$ температуры ЭРЭ рассчитывается по формуле (3):

$$\sigma(T_n) = \sqrt{D(T_n)}. \quad (3)$$

Для вычисления верхней и нижней границ диапазона, в котором может находиться температура ЭРЭ, задают доверительную вероятность, на основании которой определяют интервал нахождения температуры ЭРЭ.

Величина χ (обратное значение функции стандартного нормального распределения) показывает для нормального закона распределения число среднеквадратических отклонений, которое нужно отложить вправо и влево от математического ожидания $M(T_n)$ для того, чтобы вероятность попадания в полученный интервал была равна β .

Нижняя T_n^H и верхняя T_n^B границы допуска на значение температуры n -го элемента для заданной вероятности β определяется по формулам (4) и (5):

$$T_n^H = M(T_n) - \chi\sigma(T_n); \quad (4)$$

$$T_n^B = M(T_n) + \chi\sigma(T_n). \quad (5)$$

Как правило, значение доверительной вероятности выбирается равным $\beta = 0,9973$, при этом $\chi \approx 3$ (реальное значение 2,58).

Для обеспечения параметров ЭРЭ в пределах допусков во всем диапазоне температур, заданном в техническом задании на ЭС, тепловых процессов необходимо проводить при минимальной и максимально возможной температурах. При расчете отбраковочных допусков необходимо использовать максимальное и минимальное значения температур элементов для соответствующих случаев (изменение параметра в сторону увеличения или уменьшения). Максимальной температурой элемента $T_{\max}$ будет являться верхняя граница допуска на значение температуры элемента T_n^B при условии, что моделирование проводилось при максимальной температуре окружающей среды.

Минимальной температурой элемента является нижняя граница допуска на значение температуры элемента при условии моделирования схемы при минимальной температуре окружающей среды.

После расчета доверительного интервала допустимо переходить к расчету отбраковочных допусков. Расчет отбраковочных допусков начинается после завершения этапов схемотехнического, конструкторского проектирования печатного узла ЭС [9].

Коэффициент старения β рассчитывается по формуле (6):

$$\beta = \frac{\Delta q_{\text{ст. max}}}{t_{\text{м.н.}} * 100}, \quad (6)$$

где $\Delta q_{\text{ст. max}}$ – предельное значение изменения параметра ЭРЭ;

$t_{\text{м.н.}}$ – часы минимальной наработки электронного средства.

Верхние и нижние границы технологических допусков q^B и q^H рассчитываются по формулам (7) и (8):

$$q^B = q^{\text{ном}} * \left(1 + \frac{\delta}{100}\right), \quad (7)$$

$$q^H = q^{\text{ном}} * \left(1 - \frac{\delta}{100}\right), \quad (8)$$

где $q^{\text{ном}}$ – номинальное значение параметра ЭРЭ;

δ – допуск на параметр ЭРЭ.

Верхний и нижний отбраковочные допуски $q_{\text{отбр}}^B$ и $q_{\text{отбр}}^H$ рассчитываются по формулам (9) и (10):

$$q_{\text{отбр}}^B = \frac{q^B}{1 + \alpha_q^B * (T^B - T_0) + \beta_q * t}, \quad (9)$$

$$q_{\text{отбр}}^H = \frac{q^H}{1 + \alpha_q^H * (T^H - T_0) - \beta_q * t}, \quad (10)$$

где α_q^B, α_q^H – верхний и нижний температурные коэффициенты;

β_q – коэффициент старения элемента печатного узла;

t – время эксплуатации электронного средства;

T_0 – номинальная температура элемента;

T^H – нижняя граница температуры;

T^B – верхняя граница температуры;

q^H, q^B – нижний и верхний технологические допуски.

Случайные геометрические $q^{\text{геом}}$ и теплофизические $q^{\text{тепл}}$ параметры ЭРЭ рассчитываются по формулам (11) и (12):

$$q^{\text{геом}} = q^{\text{геом_ном}} * (1 + \delta_{\text{геом}} * \xi), \quad (11)$$

$$q^{\text{тепл}} = q^{\text{тепл_ном}} * (1 + \delta_{\text{тепл}} * \xi), \quad (12)$$

где $q^{\text{геом_ном}}, q^{\text{тепл_ном}}$ – номинальные геометрические и теплофизические параметры ЭРЭ;

$\delta_{\text{геом}}, \delta_{\text{тепл}}$ – разбросы геометрических и теплофизических параметров ЭРЭ соответственно;

ξ – случайная величина, сгенерированная по заданной пользователем плотности распределения (нормальное, экспоненциальное, распределение Парето).

Проектирование автоматизированной системы. При проектировании системы расчета отбраковочных допусков ЭРЭ использовались дополнительно системы автоматизированного проектирования (САПР): Altium Designer, SolidWorks, SolidWorks Flow Simulation, SolidWorks Flow Simulation Electronic Cooling Module Add-In, реализующие следующие функции: создание моделей ЭРЭ; проектирование печатных плат; реализация 3D модели печатной платы; тепловое моделирование.

Altium Designer – система автоматизированного проектирования радиоэлектронных устройств. Редактор печатных схем содержит средства для автоматического и интерактивного размещения компонентов плат. Преимуществами данной программы являются 3D моделирование схемы с последующим экспортом в механические САПР, а также мощного инструмента разработки ПЛИС. Программа располагает большим количеством библиотек разработки микросхем, а также возможностью рендеринга. Иерархическая методология проектирования позволяет контролировать процесс проектирования, начиная от создания электрической принципиальной схемы, заканчивая 3D моделью печатного узла [10].

SolidWorks – программный комплекс САПР для автоматизации работ промышленного предприятия на этапах конструкторской и технологической подготовки производства. В состав пакета входит 3D проектирование изделий, инженерный анализ (прочность, устойчивость, теплопередача, частотный анализ) [11]. *SolidWorks Flow Simulation* – система аэродинамического моделирования, позволяющая анализировать и прогнозировать поведение в среде реальных газов [12]. В программном модуле возможны следующие типы моделирований физического характера: комплексный тепловой расчет; создание газо/гидродинамических и тепловых моделей технических устройств; нестационарный и нестационарный анализ; расчет показателей вращающихся объектов. *SolidWorks Flow Simulation Electronic Cooling Module Add-In* – дополнительный модуль для теплового расчета электронных устройств, характеризующийся проведением анализа с расширенной базой данных вспомогательных компонентов.

Разработка автоматизированной системы велась в среде Microsoft Visual Studio 2015 и имеет клиент-серверную архитектуру. Для хранения информации о параметрах ЭРЭ, геометрических и теплофизических параметров печатного узла и ЭРЭ была выбрана СУБД Microsoft SQL Server. Для взаимодействия с базой данных использовалась технология Entity Framework – объектно-ориентированная технология доступа к данным, представляющая возможность взаимодействия с объектами посредством SQL-запросов. Для генерации базы данных был использован подход Code First (БД генерируется на основе кода приложения).

Интерфейс автоматизированной системы расчета отбраковочных допусков ЭРЭ включает в себя несколько окон. Первоначально при запуске программы появляется старто-

вое окно системы, которое предоставляет пользователю возможность выбрать действия по осуществлению теплового расчета или расчета отбраковочных допусков ЭРЭ.

Внешняя подсистема передает ID схемы, требуемую задачу (указывается символом), а также необходимые расчетные данные в формате контейнера List. Для теплового расчета в первом элементе указывается тип расчета (с номинальными параметрами, либо с учетом разброса), во втором – температура окружающей среды, в последующих – строка следующего вида: «Имя_элемента мощность_тепловыделения». Активность кнопок определяется по импортируемым данным.

Для теплового расчета ЭРЭ требуется импорт файла с мощностями тепловыделения, а также скриншот температурного разброса на поверхности печатного узла, с целью сохранения в соответствующую директорию проекта. При расчете с учетом разброса теплофизических и геометрических параметров пользователю требуется указать плотность распределения в выпадающем окне при нажатии пункта меню «Плотность распределения случайной величины». Окно заполнения представлено на рис. 6.

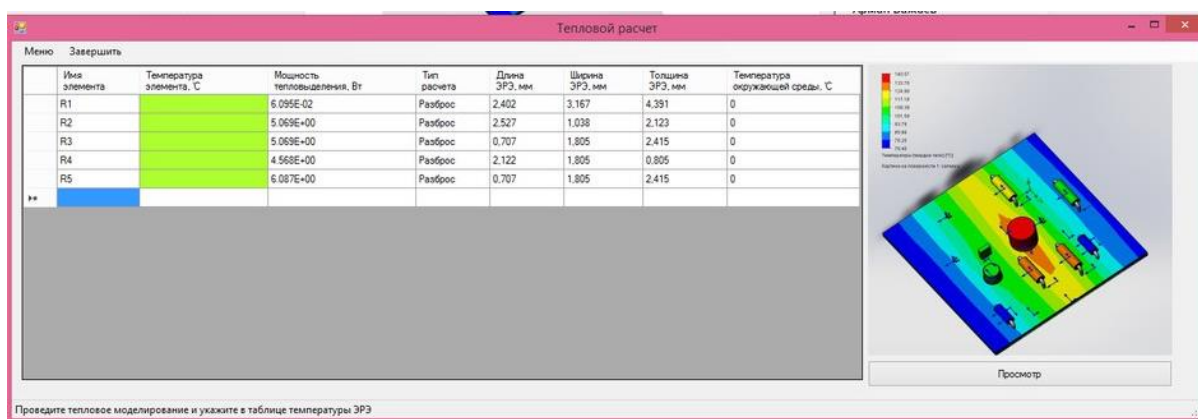


Рис. 6. Окно ввода данных теплового расчета ЭРЭ

Для проведения генерации случайной величины система предоставляет окно ввода данных заданной плотности распределения, а также других необходимых параметров. В результате выходные данные формируются в контейнер List с указанием в первой строке ID схемы и далее в последующих строках записи указываются в следующем формате: «Наименование_элемента», «Значение_температуры». После этого данные обрабатываются внешней подсистемой.

Для расчета отбраковочных допусков ЭРЭ пользователь просматривает расчетные параметры элемента, с целью проверки указания всех необходимых значений (рис. 7).

Рис. 7. Окно просмотра исходных данных, используемых для расчета отбраковочных допусков ЭРЭ

После завершения этапа проверки производится расчет отбраковочных допусков. Полученные значения заносятся в базу данных, и отправляется ответ внешней системе (рис. 8).

	Наименование элемента	Номинальное значение, Ом	Нижняя граница технологического допуска, Ом	Нижняя граница отбраковочного допуска, Ом	Верхняя граница отбраковочного допуска, Ом	Верхняя граница технологического допуска, Ом
▶	R1	10000	9000	9145,928	10733,723	11000
	R2	150	142,5	143,868	152,05	157,5
	R3	150	142,5	147,406	151,188	157,5
	R4	2000	1900	1932,669	2029,009	2100
	R5	6000	5100	5158,143	5682,525	6900
	R6	7000	5950	6335,471	6622,449	8050
*						

Сохранить результаты в базу данных

Сохранить как...

Рис. 8. Окно отображения результата расчета отбраковочных допусков ЭРЭ

Для пользователя также предоставляется возможность записи расчетных данных в таблицу и сохранения результата в соответствующую директорию корневой папки проекта.

Заключение. Подводя итог можно отметить, что в результате проведенной работы была разработана автоматизированная система расчета отбраковочных допусков с учетом температурного фактора и старения. В ходе исследований, с помощью данной системы, были проведены расчеты отбраковочных допусков ЭРЭ с использованием предварительно полученных значений технологических допусков и по реализуемым расчетным формулам. В результате при диагностировании ЭРЭ в составе ЭС непосредственно после подачи на вход требуемых воздействий по отбраковочным допускам повышается его достоверность. Кроме того, отбор элементов по отбраковочным допускам позволяет сохранить электрические параметры элементов в пределах заданных технологических допусков, т. е. это в свою очередь предотвратит параметрический отказ элементов в отдельности и переход ЭС в целом в неисправное состояние.

Хотелось бы также отметить, что реализованная система требует дальнейшей доработки, связанной с обеспечением взаимодействия с механической САПР, использующей готовые интерфейсы, так как заранее неизвестно, какой пакет программ будет использовать пользователь для проведения процессов моделирования.

Литература

1. Техническая диагностика : справочник : в 10 т. / ред. совет: В. С. Авдеевский [и др.]. ; под общ. ред. В. В. Ключева, П. П. Пархоменко. М. : Машиностроение, 1987. Т. 9. 352 с.
2. Лихтциндер Б. Я. Внутрисхемное диагностирование узлов радиоэлектронной аппаратуры. М. : Техника, 1988. 168 с.
3. Долматов А. В., Лобурец Д. А., Увайсов С. У. Определение допусков на параметры электрорадиоизделий функциональных узлов с учетом дестабилизирующих факторов // ЛП научная сессия, посвященная Дню радио : тез. докл. М. : РНТО РЭС им. А. С. Попова, 1998.

4. Стандарт IDEF0. 2017. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cfin.ru/verniov/idef/idef0.shtml> (дата обращения: 10.10.2017).
5. Долматов А. В., Лобурец Д. А., Увайсов С. У. Комплексное электротепловое моделирование при проектировании и диагностировании радиоэлектронных средств // Информатика-машиностроение. 1998. № 2. С. 23–31.
6. Bushmeleva K. I., Plyusnin I. I., Bushmelev P. E., Uvaysov S. U. Modeling the optimal parameters for a remote sensing device // Measurement Techniques. 2011. Т. 54. № 3. Р. 294–299.
7. Еремина В. Е., Абрамешин А. Е., Арестова А. Ю., Адюкова Е. В. Методика расчета отбраковочных допусков на комплектующие элементы в составе печатного узла с учетом влияния температуры и старения на примере резисторов // Инновационные информационные технологии : мат-лы междунар. науч.-практ. конф. ; под ред. С. У. Увайсова. М. : МИЭМ, 2012. 602 с.
8. Еремина В. Е. Выражение для расчета в общем виде отбраковочного допуска на сопротивление резисторов с учетом температурного фактора // Ежегодная науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ : тез. докл. М. : МИЭМ, 2011.
9. Еремина В. Е., Увайсова С. С., Масленникова Я. Л. Синтез отбраковочного допуска на емкость конденсаторов с учетом температурного фактора // Инновационные технологии, научные и технические достижения, их правовая защита : Сб. стат. IV Междунар. науч.-практ. конф. Тольятти. М. : Типография Ника, 2011.
10. Документация Altium Designer. 2017. [Электронный ресурс]. URL: <http://wiki.altium.com/display/RUPROD/Altium+Designer/> (дата обращения: 12.10.2017).
11. Уроки по SolidWorks. 2017. [Электронный ресурс]. URL: <http://cad.life/index/rascheti/teplovoj-raschet-radiatora-oxlazhdeniya-v-solidworks-simulation.html/> (дата обращения: 12.10.2017).
12. Справочник по SolidWorks. 2017. [Электронный ресурс] URL: http://help.solidworks.com/2013/russian/SolidWorks/cworks/c_Thermal_Analysis.htm (дата обращения: 12.10.2017).

УДК 622.32:004.85

АСПЕКТЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В КРУПНОЙ КОМПАНИИ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

К. И. Бушмелева, А. Н. Васильчук
Сургутский государственный университет
bkiya@yandex.ru, alex.hack89@gmail.com

В статье рассмотрены базовые теоретические понятия, а также актуальность и практическая значимость применения машинного обучения в нефтегазовой промышленности. Представлена информация о преимуществах использования машинного обучения.

Ключевые слова: искусственный интеллект, машинное обучение, автоматизация, нефтегазовая промышленность.

MACHINE LEARNING ASPECTS IN A MAJOR COMPANY OF OIL AND GAS INDUSTRY

K. I. Bushmeleva, A. N. Vasilchuk
Surgut State University
bkiya@yandex.ru, alex.hack89@gmail.com

The article discusses standard theoretical conceptions, relevance and practical significance of machine learning in the oil and gas industry. The article provides information on the benefits of using the machine learning.

Keywords: artificial intelligence, machine learning, automation, oil and gas industry.

Введение

Как известно, мы различаем механическое заучивание и интеллектуальное осмысление. Зазубривание телефонных номеров или инструкций, без сомнения, тоже относится к процессу обучения. Но, как правило, под этим понятием мы подразумеваем кое-что другое.

Ребенок, играющий с друзьями, наблюдает реакцию других членов группы на свои действия. Этот опыт влияет на его будущее поведение в социуме. Он не вспоминает и не проигрывает заново свое прошлое, а опирается на определенные, легко опознаваемые характеристики прошлых взаимодействий: детская площадка, класс, мама, папа, сестры и братья, друзья, незнакомцы, взрослые, дети, в помещении или на улице. Оценка новой ситуации базируется на признаках, с которыми ему доводилось сталкиваться раньше. Обучение при этом является не просто сбором информации. Формируется то, что можно назвать аналитической оценкой.

Представьте, как вы по картинкам учите ребенка отличать собаку от кошки. Показанная картинка кладется в одну из двух стопок, в зависимости от правильности ответа. Чем дольше продолжается процесс, тем выше эффективность распознавания. Интересно, что нет необходимости специально учить ребенка отличать собаку от кошки. Человеческое сознание обладает встроенными механизмами классификации. Ему требуются только образцы. Научившись работать с картинками, ребенок сможет опознать практически любое изображение кошки или собаки, не говоря уже о реальных животных. Эта способность обобщать, применяя полученные в процессе тренировок знания к новым, ранее не встречавшимся образцам, является ключевой характеристикой как человеческого, так и машинного обучения.

Разумеется, процесс получения знаний человеком превосходит своей сложностью самые совершенные алгоритмы машинного обучения, но у компьютера есть преимущество в

виде большой емкости для запоминания, извлечения и обработки данных. Накапливаемый им опыт представлен в форме данных за длительный период времени, причем это представление позволяет получать и оптимизировать алгоритмы, реализующие если не аналитическую оценку, то хотя бы способность к обобщениям.

Аналогия между человеческим и машинным обучением закономерно заставляет вспомнить такое явление, как *искусственный интеллект* (англ. *Artificial Intelligence, AI*). При этом естественным образом возникает вопрос «Чем искусственный интеллект отличается от машинного обучения?» [1]. Для ответа на этот вопрос необходимо дать определение данным понятиям.

В настоящее время тематика искусственного интеллекта охватывает огромный перечень направлений, начиная с таких задач общего характера, как обучение и восприятие, и заканчивая такими специальными задачами, как игра в шахматы, доказательство математических теорем, сочинение поэтических произведений и диагностика заболеваний. В искусственном интеллекте систематизируются и автоматизируются интеллектуальные задачи, и поэтому эта область касается любой сферы интеллектуальной деятельности человека. В этом смысле искусственный интеллект является поистине универсальной научной областью [3].

Из сказанного выше, можно сделать вывод, что понятие «Искусственный интеллект» не имеет точного и четкого определения. Приведем несколько определений искусственного интеллекта:

«Наука и технология создания интеллектуальных машин, интеллектуальных компьютерных программ» [7].

«Изучение умственных способностей с помощью вычислительных моделей» [5].

«Автоматизация действий, которые мы ассоциируем с человеческим мышлением, т. е. таких действий, как принятие решений, решение задач, обучение» [4].

«Искусство создания машин, которые выполняют функции, требующие интеллектуальности при их выполнении людьми» [6].

«Наука о проектировании интеллектуальных агентов» [9].

«Наука, посвященная изучению интеллектуального поведения артефактов (артефакт – искусственный объект)» [8].

Машинное обучение (англ. *Machine Learning, ML*) является одной из форм искусственного интеллекта, которая заключается в извлечении знаний из данных. Это научная область, находящаяся на пересечении статистики, искусственного интеллекта и компьютерных наук, также известная как прогнозная аналитика или статистическое обучение [2].

Для обучения и обобщения люди используют различные данные из примеров, включая формы, цвета, текстуры, пропорции и другие характеристики. Машинное обучение также применяет множество стратегий в различных комбинациях в зависимости от поставленной задачи.

Эти стратегии нашли свое воплощение в наборе алгоритмов, разработанных в течение последних десятилетий, как учеными, так и практиками в самых разных дисциплинах – от статистики, компьютерной науки, робототехники и прикладной математики до поиска в Интернете, развлекательной сферы, цифровой рекламы и переводов с одного языка на другой. Алгоритмы крайне разнообразны и имеют как сильные, так и слабые стороны. Некоторые относят объекты к определенному классу, другие предсказывают числовые значения. Существуют и алгоритмы, определяющие сходства и различия допускающих сравнение сущностей. При этом все алгоритмы обучаются на примерах (опыте) и умеют применять полученные знания к новым, ранее не встречавшимся случаям, то есть способны к обобщению.

Актуальность

В настоящее время машинное обучение применяется к широкому кругу экономических задач – от обнаружения мошенничества до выбора целевой аудитории и рекомендации товара. В таблице представлены некоторые задачи машинного обучения.

Таблица 2

Задачи машинного обучения

Задача	Примеры
Классификации	Медицинская диагностика: по набору медицинских характеристик требуется поставить диагноз. Геологоразведка: по данным зондирования почв определить наличие полезных ископаемых. Кредитная оценка: по анкете заемщика принять решение о выдаче/отказе кредита
Восстановления регрессии	Оценка стоимости недвижимости: по характеристике района, экологической обстановке, транспортной связности оценить стоимость жилья. Кредитная оценка: по анкете заемщика оценить величину кредитного лимита
Кластеризации	Финансовая сфера: по сводкам банковских операций выявить группы «подозрительных», нетипичных банков, сгруппировать остальные по степени близости проводимой стратегии
Идентификации	Банковское дело: определить подлинность подписи на чеке. Медицинская диагностика: по набору медицинских характеристик требуется установить наличие/отсутствие конкретного заболевания
Прогнозирования	Биржевое дело: прогнозирование биржевых индексов и котировок. Экономика: прогноз цен на недвижимость
Извлечения знаний	Медицина: поиск взаимосвязей между различными показателями при фиксированной болезни. Научные исследования: получение новых знаний об исследуемом процессе. Биржевое дело: определение закономерностей между различными биржевыми показателями

Но какое применение машинное обучение может найти в нефтегазовой промышленности? В современной нефтегазовой отрасли при разработке месторождений принятие решений базируется на данных, объем которых растет со временем экспоненциально. Замерные эксплуатационные данные поступают со всех скважин, кроме этого формируются месячные данные по добыче, также имеется информация о проведенных исследованиях и физических характеристиках пласта. В то же время, качество этих данных не всегда позволяет провести полноценный анализ: может отсутствовать информация для определенных временных интервалов, некоторые измерения не всегда соответствуют физической модели или не согласовываются друг с другом. Присутствие в отчетах некорректных данных может быть вызвано как сбоем в работе замерного оборудования, так и «человеческим фактором».

Определить ошибку силами специалистов не всегда возможно, а некорректная информация повлечет за собой неверные выводы о текущем состоянии скважин и месторождении в целом, вследствие чего могут быть приняты неверные решения по проведению геолого-технических мероприятий.

Применение методов машинного обучения повысят скорость обработки и анализа больших объемов информации, которые поступают с месторождения. Кроме того, методы машинного обучения позволяют интегрировать разнородные данные, проанализировать каждый мегабайт имеющейся информации, что приведет к появлению новых выводов способных вывести качество данных на новый уровень. Это, несомненно, повлияет на повышение эксплуатационных показателей.

В результате, применение новых алгоритмов может существенно повысить скорость и эффективность работы специалистов по разработке месторождений, снизить риски принятия неверных капиталоемких решений при разработке, вызванных «человеческим фактором», и уменьшить время простоя скважин.

Ниже представлены самые существенные преимущества систем с машинным обучением в сравнении с общепринятыми альтернативами, такими как ручной анализ, жестко запрограммированные бизнес-правила и простые статистические модели [1]:

Точность. Машинное обучение использует данные для создания принимающей решение программы, оптимизированной под поставленную задачу. По мере накопления данных автоматически возрастает точность прогнозов.

Автоматизация. По мере подтверждения и отбрасывания ответов ML-модель может автоматически обнаруживать новые шаблоны. Это позволяет встраивать машинное обучение непосредственно в автоматизированные рабочие процессы.

Скорость. Машинное обучение дает ответы за доли секунды после поступления новой информации, позволяя системам реагировать в реальном времени.

Возможность настройки. Многие задачи, управляемые данными, можно решить с помощью машинного обучения. Модели строятся на базе ваших собственных данных и допускают настройку под любую систему мер, принятую в вашем бизнесе.

Масштабируемость. При росте бизнеса ML-модель легко приспосабливается к увеличению объема данных. Некоторые алгоритмы можно использовать для обработки множества данных на разных вычислительных машинах в облаке.

Вывод

Сегодня машинное обучение, несомненно, является одним из самых перспективных и актуальных направлений информационных технологий, которое применяется к широкому кругу задач.

Цифровые технологии меняют подходы нефтяных компаний к выбору вариантов разработки и эксплуатации месторождений. Новейшие способы работы с информацией позволяют повысить эффективность использования собираемых на месторождениях данных, принимать более взвешенные решения.

Литература

1. Бринк Х., Ричардс Дж., Феверолф М. Машинное обучение. СПб. : Питер, 2017. 336 с.
2. Мюллер А., Гвидо С. Введение в машинное обучение с помощью Python : пер. с англ. М. : Вильямс, 2017. 480 с.
3. Стюарт Р., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход : пер. с англ. 2-е изд. М. : Вильямс, 2006. 1408 с.
4. Bellman R. E. An Introduction to Artificial Intelligence: Can Computers Think? San Francisco : Boyd & Fraser Publishing Company, 1978.
5. Charniak E., McDermott D. Introduction to Artificial Intelligence. Cambridge, Massachusetts : Addison-Wesley, Reading, 1985.
6. Kurzweil R. The Age of Intelligent Machines. Cambridge; Massachusetts : MIT Press, 1990.
7. McCarthy J. What is Artificial Intelligence? [Электронный ресурс]. URL: <http://www-formal.stanford.edu/jmc/whatisai/whatisai.html> (дата обращения: 03.09.2017).
8. Nilsson N. J. Artificial Intelligence: A New Synthesis. San Mateo, California : Morgan Kaufmann, 1998.
9. Poole D., Mackworth A. K., Goebel R. Computational intelligence: A logical approach. Oxford, UK : Oxford University Press, 1998.

УДК 621.316.1.05:622.3

ПРОБЛЕМЫ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ КАК РЕЦЕПТОРОВ НА БАЗЕ КОНЦЕПЦИИ SMART GRID

**Ю. М. Денчик¹, Е. В. Иванова¹, Д. М. Иванов¹, М. Н. Иванов¹, В. В. Рыжаков²,
В. Г. Сальников¹, Н. А. Ковалева³, Е. Ю. Кислицин², А. Ю. Ковалёв³, Д. П. Антипин²**

¹Сибирский государственный университет водного транспорта, nsawt_ese@mail.ru

²Сургутский государственный университет, adp1975@rambler.ru

³Нижневартровский государственный университет, nata3734@yandex.ru

В статье исследуются параметры электрических сетей (6-110) кВ нефтедобычи, в сфере инновационного развития электроэнергетики развивающихся регионов России. Рассмотрены функционально-технологическая идеология концепции Smart Grid и методологическая база исследования кибернетических свойств электроэнергетической системы с целью определения их идентификации в части решения конкретных задач. Сформулированы выводы.

Ключевые слова: концепция, баланс активных и реактивных мощностей, техническое средство, ключевые ценности, стейкхолдеры, кибернетика электроэнергетических систем, кондуктивные низкочастотные электромагнитные помехи, идентифицируемая по параметрам режима работы модель узла нагрузки, шины бесконечной мощности, системный анализ.

INNOVATIVE DEVELOPMENT PROBLEMS OF ELECTRIC NETWORK OF OIL DEPOSITS AS RECEPTORS ON BASIS OF THE SMART GRID CONCEPT

**Yu. M. Denchik¹, E. V. Ivanova¹, D. M. Ivanov¹, M. N. Ivanov¹, V. V. Ryzhakov²,
V. G. Salnikov¹, N. A. Kovaleva³, E. Yu. Kis litsin², A. Yu. Kovalev³, D. P. Antipin²**

¹Siberian State University of Water Transport, nsawt_ese@mail.ru

²Surgut State University, adp1975@rambler.ru

³Nizhnevartovsk State University, nata3734@yandex.ru

The article examines electrical networks parameters (6-110) kV of oil production, in the sphere of innovative development of the power industry in developing regions of Russia. The functional and technological ideology of the Smart Grid concept and methodological base for researching electric power systems cybernetics are examined to determine their identification in terms of specific tasks. Conclusions are drawn.

Keywords: concept, active and reactive power balance, technical means, core values, stakeholders, electric power systems cybernetics, conductive low-frequency electromagnetic disturbances, identified by operating parameters model of the load node, infinite buses, system analysis.

Методологический подход к расчетному обеспечению инновационного развития электрических сетей (6-110) кВ месторождений нефти. Задачи исследования

В настоящее время ведутся работы по созданию интеллектуальной энергетической системы в России, особое внимание в которой уделяется проблемам регионально-федерального развития и размещения генерирующих источников всех видов (атомных, гидро, тепловых и др.) исходя из задач рационального использования природных энергетических ресурсов, требований различных потребителей электроэнергии. Это диктует новые требования к структуре топливно-энергетического баланса, новой схеме сегментации и иерархии организационной структуры электроэнергетики, к оптимизации межсистемных перето-

ков базисного и переменного вида, что, в свою очередь, определяет необходимость развития активно-адаптивной сети (магистральных и распределительных линий электропередачи и автоматизированных систем контроля и управления) в рамках Единой национальной электрической сети (ЕНЭС) России и межрегиональных электрических связей [2, 3]. В Евросоюзе [4] и США [5] также наблюдается инновационное преобразование электроэнергетики на базе новой концепции, получившей название Smart Grid.

Основными предпосылками становления новой (инновационной) концепции развития электроэнергетики в мире являются [2, 3]:

- дефицит источников электрической энергии;
- постоянно растущие требования к надежности и качеству электроснабжения со стороны потребителей;
- постоянное повышение стоимости электрической энергии во всем мире;
- рост требований заинтересованных сторон – стейкхолдеров – к результатам деятельности энергетических компаний;
- повышение требований экологической и промышленной безопасности функционирования энергетических объектов;
- необходимость в снижении общесистемных затрат.

Для успешного развития инновационной концепции объединяются усилия крупных энергетических компаний. Так, Российским энергетическим агентством и Агентством по международному развитию США в соответствии с договоренностями, достигнутыми в ходе встречи президентов Российской Федерации и США, подписан Протокол о намерениях в развитии сотрудничества по проблемам чистой энергетики, «умных» сетей и энергоэффективности, содержащий план действий двух стран по развитию сотрудничества в направлении Smart Grid в России [3].

В нормативно-правовом виде этот процесс закреплён в [6–8]:

- «Энергетической стратегии России на период до 2030 года», утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 13.12.2009 г № 1715-р;
- Федеральном законе «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», № 261-ФЗ от 23.11.2009 г.;
- «Концепции развития интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью» от 07.08.2010, разработчики: ФГБУ «Российское энергетическое агентство», Министерство энергетики РФ, ОАО «ФСК ЕЭС», Российская академия наук, ОАО «НТЦ электроэнергетики».

Таким образом, все региональные энергетические компании России обязаны заниматься развитием электроэнергетических систем (ЭЭС) в соответствии с иерархической структурой ЕНЭС России, в том числе, и компании, обеспечивающие электроэнергией месторождения нефти.

В электрических сетях нефтедобывающей отрасли наблюдается рост электрических нагрузок, обусловленный изменением технологии добычи на истощающихся месторождениях. Заметным воздействием подвергаются сети среднего напряжения. Эти явления объективно связаны с тем, что поверхностные нефтеносные слои на многих месторождениях истощены. Внедряются технологии добычи нефти механизированным способом из глубинных скважин. Качественно меняется состав комплексной нагрузки из-за широкого использования электроприемников с нелинейными вольтамперными характеристиками и несимметричными нагрузками по фазам [17].

На истощающихся месторождениях добыча осуществляется с помощью погружных установок электроцентробежных насосов (УЭЦН). Примерно 70 % нефти извлекается на территории Западной Сибири с помощью этих установок и в среднесрочной перспективе за ними остается преимущественная роль. Интенсивно ведутся работы над интеллектуализаци-

ей станций управления УЭЦН [1], улучшением электромагнитной обстановки (ЭМО) в электрических сетях [15], повышением качества электроснабжения путем подавления кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех (ЭМП), обеспечением электромагнитной совместимости (ЭМС) технических средств.

Интеллектуальная система – техническая или программная система, способная использовать хранящиеся в ее памяти знания для решения творческих задач, что традиционно считается прерогативой человека.

Техническое средство – изделие, оборудование, аппаратура или их составные части, функционирование которых основано на законах электротехники, радиотехники и (или) электроники, содержащие электронные компоненты и (или) схемы, которые выполняют одну или несколько следующих функций: усиление, генерирование, преобразование, переключение и запоминание (ГОСТ Р 50397-92).

Сложившаяся ситуация на месторождениях нефти объективно обусловила появление новых «управленческих полей», характерных для нефтедобычи, и потребность в решении возникших задач на основе технологий интеллектуальных сетей (Smart Grid).

Наиболее полно общую функционально-технологическую идеологию этой концепции, по-видимому, отражает сформулированное IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers – Институт инженеров электротехники и электроники) определение Smart Grid как концепции полностью интегрированной, саморегулирующейся и самовосстанавливающейся электроэнергетической системы, имеющей сетевую топологию и включающей в себя все генерирующие источники, магистральные и распределительные сети и все виды потребителей электрической энергии, управляемые единой сетью информационно-управляющих устройств и систем в режиме реального времени [3].

В свете изложенного качественное функционирование электроснабжения истощающихся скважин нефтедобычи, характеризующееся возрастанием энергозатрат на одну тонну добытой нефти, объективно связывается с прогрессом в эксплуатации электрических сетей. Существующая система пассивных сетей не может удовлетворить возросшие требования к надежности и эффективности электроснабжения интеллектуальных станций управления УЭЦН. Развитие региональных ЭЭС (отраслевой электроэнергетики) в рамках прежней экстенсивной концепции, основанной преимущественно на вводе новых мощностей и развитии сетевой инфраструктуры с улучшением технико-экономических показателей отдельных видов оборудования и технологий, связано с наличием серьезных ограничений [1–3, 13, 15–19].

Пассивная система – управление генерацией, потреблением и распределением электроэнергии путем (за счет) коммутации.

К наиболее значимым ограничениям можно отнести:

- низкий потенциал повышения эффективности использования ресурсов (существующая технологическая база электроэнергетики практически исчерпала возможности значительного повышения производительности оборудования);
- ограниченность инвестиционных ресурсов для строительства новых энергетических объектов и развития сетевой инфраструктуры [3].

К факторам снижения надежности относятся [3]:

- нарастающий уровень износа оборудования;
- необходимость массовых инвестиций в реновацию основных фондов;
- снижение общего уровня надежности электроснабжения;
- высокий уровень потерь при преобразовании, передаче и распределении электроэнергии.

Кроме того, повысились требования в сфере энергоэффективности и экологической безопасности [3].

Идентификация этих условий и факторов выдвинула на передний план проблему совершенствования систем электроснабжения нефтеносных регионов, которая с одной стороны

соответствовала бы современным взглядам, целям и ценностям социального и общественного развития, формирующимся и ожидаемым потребностям людей и общества в целом, а с другой – максимально учитывала основные тенденции и направления научно-технического прогресса во всех отраслях, сферах жизни и деятельности общества [3].

При этом рассматриваемая система электроснабжения должна соответствовать ключевым ценностям концепции Smart Grid [3–5]:

- безопасность;
- гибкость с точки зрения отклика на изменения потребностей потребителей и возникающие проблемы с электроснабжением;
- доступность электроэнергии для потребителей, в частности возобновляемых источников электроэнергии и высокоэффективной локальной генерации с нулевыми или низкими выбросами;
- надежность электроснабжения и качество электроэнергии при обеспечении невосприимчивости к опасностям и неопределенностям;
- экономичность посредством внедрения инноваций, эффективного управления, рационального сочетания конкуренции и регулирования [3].

Принципиально новым является здесь то, что все выдвинутые ключевые требования (ценности) предполагается рассматривать как равноправные, но степень их приоритетности, уровень соотношения не являются общими, нормативно зафиксированными для всех и могут определяться для каждого субъекта энергетических отношений (энергетическая компания, регион, город и т. п.), по существу, индивидуально [18, 19].

В такой постановке задача развития электроэнергетики из преимущественно балансовой (продуктовой), заключающейся в основном в обеспечении баланса производства и потребления электроэнергии и предоставлении потребителю регламентированного спектра услуг с заданными характеристиками, трансформируется в задачу создания, развития и предоставления потребителю и обществу в целом своего рода меню энергетических возможностей (услуг) [3].

В нашем случае электрическая сеть (6–110) кВ месторождения нефти необходимо представлять, как основной объект формирования нового технологического базиса, дающего возможность существенного улучшения достигнутых и создания новых функциональных свойств энергосистемы. Все это носит инновационный характер и отражает переход к новому технологическому укладу в электроэнергетике и в экономике в целом [3].

Технологический уклад – совокупность технологий, характерных для определенного уровня развития производства; в связи с научным и технико-технологическим прогрессом происходит переход от более низких укладов к более высоким, прогрессивным.

При этом взаимосвязь заинтересованных сторон (стейкхолдеров) как представителей традиционной структуры электроэнергетики (генерация, передача, распределение, диспетчеризация, потребление), так и государственных структур (правительство – федеральное, региональное, муниципальное; регулирующие органы), а также производителей оборудования и технологий, исследовательских институтов и организаций, банков и т. д. является основным условием создания активно-адаптивной сети в регионах нефтедобычи. Требования отечественных стейкхолдеров еще четко не сформулированы, поэтому рассмотрим зарубежные [3–5]. В принципе они должны быть одинаковыми. В табл. 1 приводятся ожидания стейкхолдеров, увязанные с их требованиями к интеллектуальной электроэнергетике [3].

Из анализа данных этой таблицы возникают вопросы: можно ли известными методами кибернетики решить задачи, вытекающие из требований? Нужно ли еще какие-то (неизвестные) разработки или методологические подходы?

Для ответа на поставленные вопросы осуществим введение в кибернетику ЭЭС с целью идентификации отдельных подходов к функционально-технологической идеологии концепции Smart Grid, позволяющей использовать методы теории электрических сетей, теории переходных процессов в электрических сетях и т. д. при решении задач инновационного развития.

Таблица 1

Требования стейкхолдеров к реализации концепции Smart Grid [3]

Группы стейкхолдеров	Стейкхолдер	Требования/ожидаемые эффекты
Энергетические компании	Оптовые продавцы электроэнергии/мощности	- оперативные улучшения; - прозрачная система учета и биллинга;
	Розничные продавцы энергосервисных услуг	- управление отключениями в режиме реального времени совершенствование процессов управления энергосистемой;
	Компании по передаче электроэнергии	- снижение потерь электроэнергии; - оптимизация управления активами;
	Распределительные сетевые компании	- системное планирование; - техническое обслуживание и мониторинг в режиме реального времени
Регулирующие органы	Органы государственного регулирования	- повышение надежности электроснабжения; - прозрачная система поставок и учета электроэнергии;
	Оператор оптового электроэнергетического рынка	- совершенствование процессов управления энергосистемой; - снижение потерь электроэнергии;
	Регуляторы надежности	- снижение тарифов на электроэнергию
Конечные потребителей	Промышленные Коммерческие Население	- повышение надежности электроснабжения; - повышение общего уровня сервиса; - доступ информации по электроснабжению в режиме реального времени; - возможность управления расходом электроэнергии; - возможность участия в управлении спросом (demand response); - оптимизированная взаимосвязь распределенной генерации; - возможность продавать электроэнергию на рынок; - потенциал значительного уменьшения расходов на поставку электрической энергии
Государство и общество в целом		- снижение цен на электричество благодаря повысившейся операционной и рыночной эффективности, а также вовлечению потребителя; - снижение потерь потребителей за счет повышения надежности; - улучшение безопасности сети за счет повышения ее устойчивости; - уменьшение выбросов через интеграцию возобновляемых источников энергии и уменьшение потерь; - новые рабочие места и рост ВВП; - возможность инновационного развития сектора передачи и распределения электрической энергии

Идентификация – соответствие одного предмета, явления, понятия другому; отождествление.

Под кибернетикой, согласно определению академика А. И. Берга, понимается наука о целенаправленном, оптимальном управлении сложными, развивающимися системами. Системы, имеющие такое управление, или требующие его, относятся к кибернетическим системам. Кибернетика расширяет возможности исследователя в отношении проводимых им теоретических и аналитических решений и их применения для практических задач. Электроэнергетическая система представляет большую систему, состоящую из отдельных подсистем, имеющих глубокие обратные связи, не позволяющие рассматривать эти системы по «отдельности», поскольку свойства большой системы решающим образом определяются взаимодействием подсистем. Поэтому ЭЭС является большой искусственной системой кибернетического типа [14]. На рис. 1 приведена структурная схема методологической базы исследования кибернетических свойств ЭЭС.

Анализируя эту структурную схему, отметим, что в задачи кибернетики не входит: конструирование машин, аппаратов, регуляторов, устройств автоматического управления, защиты; изготовление технических средств для передачи информации и команд для управления теми или иными объектами системы; расчет и выбор элементов электрических сетей; проектирование электростанций, воздушных линий и т. д. Кибернетика ЭЭС имеет четко очерченный круг вопросов и, не пытаясь подменить собой существующие дисциплины (автоматизированные ЭЭС, релейная защита и сетевая автоматика, электромеханические переходные процессы и т. д.), изучает связь между ними [14]. Это свойство кибернетики ЭЭС является основополагающим для того, чтобы использовать ее методологическую базу исследования (рис. 1) для решения задач (табл. 1) следующих явлений:

- совершенствование процессов управления электроэнергетической системы;
- снижение потерь потребителей за счет повышения надежности;
- улучшение безопасности сети за счет повышения ее устойчивости и др.

Следовательно, все требования стейкхолдеров выполнимы на основе применения известных методов анализа и синтеза ЭЭС.

Однако это не означает, что при этом нет никаких проблем, препятствующих созданию активно-адаптивных сетей. Сущность этих проблем, во многих случаях, состоит в отсутствии объективных оценок (нормированных значений) параметров сетей, при которых они способны эффективно работать в интеллектуальной ЭЭС России или региона.

Например (применительно к условиям нашей задачи), чтобы улучшить безопасность электрических сетей среднего и высокого напряжений месторождений нефти за счет повышения их устойчивости (табл. 1) необходимо знать критерии достаточности запаса, статической устойчивости комплексной нагрузки I и II категорий [23] нефтедобычи как рецептора по напряжению и по скольжению, а на границе балансовой принадлежности промышленных сетей (6-10) кВ и питающих сетей (35-110) кВ энергоснабжающей организации критерий достаточности запаса статической устойчивости комплексной нагрузки по активной мощности [17].

Критерий – признак, на основании которого производится оценка.

Рецептор – техническое средство, реагирующее на электромагнитный сигнал и (или) электромагнитную помеху.

Иными словами электрическая сеть должна обеспечивать: нормированные показатели качества электроэнергии, самозапуск наземных и погружных электродвигателей, надежность электроснабжения потребителей в соответствии с их категориями, предельно возможную эффективность передачи и распределения электроэнергии, гибкость управления системами регулирования напряжения и реактивной мощности.

Изложенное позволяет представить методологическую базу наших исследований.

Методология – это логическая организация научной деятельности, состоящая в определении цели и предмета исследования, принципов, подходов и ориентиров в его проведении, выборе средств и методов, определяющих возможность получения достоверных и обоснованных результатов [30].

Объект исследования – электрические сети (6-110) кВ истощающихся месторождений нефти.

Предмет исследования – свойства электрической сети (6-110) кВ, которые необходимо учитывать при переходе от пассивной к активно-адаптивной сети интеллектуальной ЭЭС.

Целью исследования является определение параметров и режимов электрических сетей (6-110) кВ, при которых обеспечивается управление качеством электроэнергии и эффективным электропотреблением на основе технологий интеллектуальных сетей (Smart Grid).

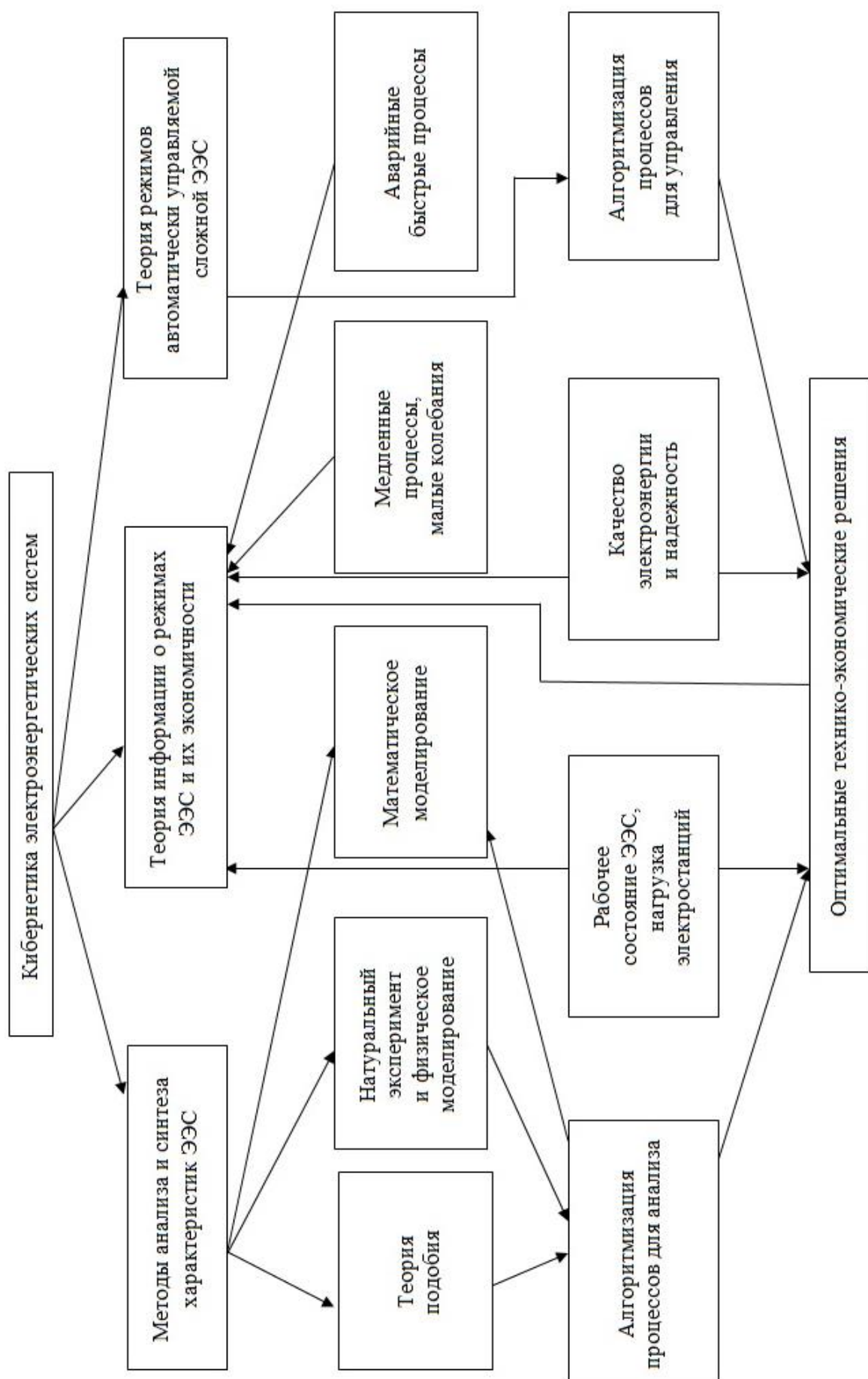


Рис. 1. Структурная схема методологической базы исследования кибернетических свойств ЭЭС (электроэнергетической системы)

Для достижения цели необходимо решить следующие взаимоувязанные задачи:

- представление критического напряжения в промышленной сети (6-10) кВ как физически недопустимого режимного параметра;
- расчеты и обоснования критериев достаточности статической устойчивости: комплексной нагрузки нефтедобычи по напряжению, асинхронной двигательной нагрузки по напряжению и по скольжению;
- определение критерия достаточности статической устойчивости промышленной сети (6-10) кВ по активной мощности на границе балансовой принадлежности с высшей сетью (35-110) кВ, принадлежащей энергоснабжающей организации.

Физические основы представления критического напряжения в промышленной сети (6-10) кВ как недопустимого режимного параметра

Потребность в рассмотрении негативного воздействия критического напряжения в промышленных сетях на электроприемники обусловлена низкой надежностью воздушных линий (ВЛ) электропередачи 6 кВ в северных регионах России. По данным Западно-Сибирского регионального управления ООО «Лукойл-Энергосети» основной причиной этого явления является «выталкивания» из земли опор. Период надежной работы этих опор после монтажа составляет от 2 до 7 лет. После этого наблюдается недопустимый наклон опор, а в отдельных случаях и падения. В этих сетях 6 кВ однофазные замыкания на землю являются обычным явлением и устраняются, с учетом технологических особенностей работы глубоководных скважин и суровых природных условий, в течение нескольких суток (до недели). Из-за этого наблюдается высокий риск появления кондуктивных низкочастотных ЭМП по отклонению напряжения, которые при определенных условиях могут достигать критического значения [15].

Условием существования режима в ЭЭС служит наличие баланса активных и реактивных мощностей [29]:

$$\begin{cases} \sum P_{\Gamma} = \sum P_{\Pi} \\ \sum Q_{\Gamma} = \sum Q_{\Pi} \end{cases}, \quad (1)$$

где $\sum P_{\Gamma}$, $\sum P_{\Pi}$ – суммарная активная мощность генерации и потребления соответственно;

$\sum Q_{\Gamma}$, $\sum Q_{\Pi}$ – суммарная реактивная мощность генерации и потребления соответственно.

Причем баланс мощности должен удовлетворяться при значениях параметров, которые обеспечивают нормальные условия работы сети и электроприемников.

Таковыми параметрами, от которых зависят условия работы сети и электроприемников, а также мощности генерации и потребления, являются частота f и напряжение U . Эти параметры нормируются ГОСТ 32144-2013 [20]. Кроме того, регламентируются наибольшие рабочие напряжения для электрооборудования и электрической сети при разных номинальных напряжениях (табл. 2).

Таблица 2

Наибольшие рабочие напряжения электрической сети

Номинальное напряжение электрической сети, кВ	6	10	35	110	220	330	500	750
Наибольшее рабочее напряжение электрической сети, кВ	6,9	11,5	40,5	126	252	363	525	787

Известно [14, 15, 17, 29], что:

- изменение баланса активной мощности главным образом влияет на изменение частоты в системе и в меньшей степени – на изменение напряжения. Частота – это системный параметр, т. е. она одинакова во всей энергосистеме. Источником активной мощности служит только синхронный генератор (СГ);

– изменение баланса реактивной мощности в основном влияет на изменение напряжения в системе (уровень напряжения и напряжение в отдельных узлах). Напряжение – локальный параметр; т. е. в той части энергосистемы, где есть избыток реактивной мощности, там повышенные уровни напряжения, а где дефицит – там пониженные. Источником реактивной мощности является СГ, а также синхронные компенсаторы (СК), синхронные двигатели (СД), батареи статических конденсаторов (БСК) и др.

Реактивную мощность нецелесообразно передавать на большие расстояния, поскольку ее передача создает значительные потери мощности и напряжения. Наличие местных генерирующих источников, которые могут быть установлены в центрах потребления, уменьшает передаваемую реактивную мощность от СГ электрических станций. Статические характеристики генерации реактивной мощности по напряжению [$\sum Q_{\Gamma} = f(U)$] и потребления по напряжению [$\sum Q_{\Pi} = f(U)$] представлены на рис. 2. В точках пересечения характеристик, в которых имеет место баланс, выполняется условие существования установившегося режима.

Точка 2 является точкой неустойчивого равновесия. Практически в ней не может существовать режим. Так, если случайным образом напряжение станет даже незначительно меньше U_2 , то будет преобладать «потребление» над «генерацией». Дефицит Q приведет к дальнейшему снижению напряжения. Возникает неуправляемый процесс, называемый *лавинной напряжения*, в результате которого напряжение снизится до нуля. Если напряжение станет больше U_2 , то будет преобладать «генерация» над «потреблением». Избыток Q приведет к увеличению напряжения до U_1 [29].

Точка 1 является точкой устойчивого равновесия, в ней может существовать режим. Если, например, напряжение станет больше U_1 , то будет преобладать «потребление» над «генерацией». Дефицит Q приведет к снижению напряжения до U_1 . Если напряжение станет меньше U_1 , то будет преобладать «генерация» над «потреблением». Избыток Q приведет к увеличению напряжения до U_1 . Если снижать генерацию Q , то будет возможен предельный случай – пересечение характеристик в одной точке (рис. 3).

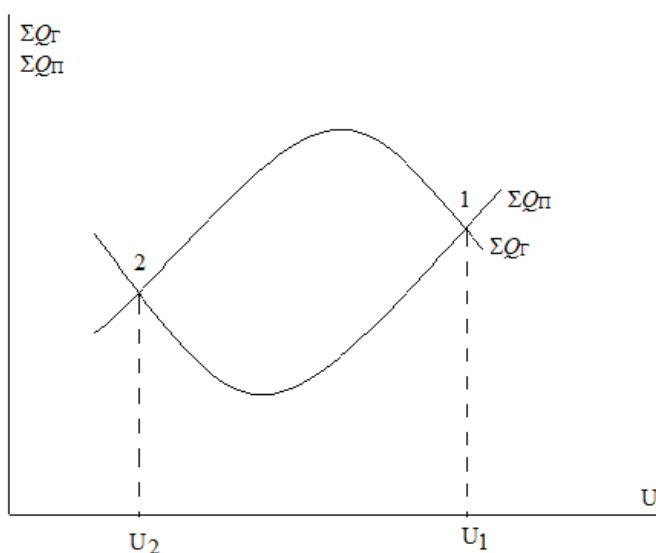


Рис. 2. Статические характеристики реактивной мощности по напряжению

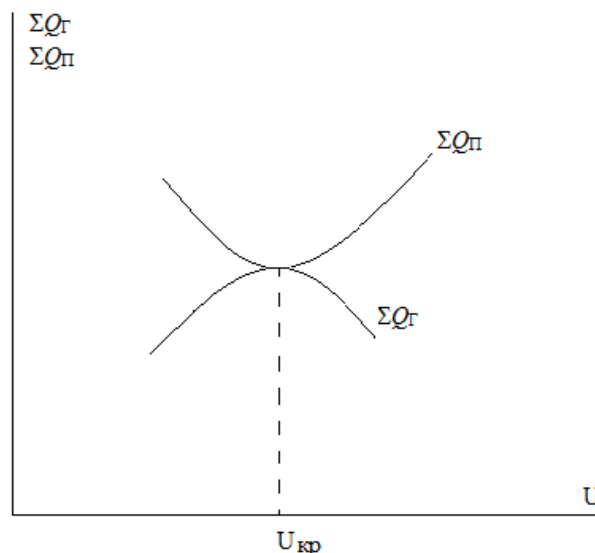


Рис. 3. Статическая устойчивость комплексной электрической нагрузки кустов нефтедобычи

При этом будет минимальное напряжение, и оно является критическим $U_{кр}$. Любое снижение напряжения относительно его приведет к лавине напряжения. Если еще снизить генерацию Q , то характеристики $\sum Q_{\Gamma} = f(U)$ и $\sum Q_{\Pi} = f(U)$ не будут пересекаться и, следовательно, такой режим неосуществим.

Основными источниками генерации реактивной мощности в промышленных сетях (6-10) кВ являются СД и БСК, которые могут осуществлять регулирование Q_n как дискретное, так и непрерывное.

Таким образом, основным препятствием при создании активно-адаптивных сетей месторождений нефти является не наличие и достаточность источников реактивной мощности в пассивных сетях, а низкая надежность в работе ВЛ 6 кВ, обусловленная природным явлением.

На истощающихся месторождениях нефти по объективным причинам необходимо повысить качество расчетного обеспечения устойчивой и экономичной работы промышленных сетей среднего напряжения и питающих сетей высокого напряжения. Основным недостатком используемых, в настоящее время, заблаговременно определенных (на стадии проектирования) коэффициента запаса статической устойчивости комплексной нагрузки по напряжению, по активной мощности и по скольжению эквивалентной асинхронной нагрузки, является их несоответствие с действительными значениями [17]. Объясняется это отсутствием информации о критических напряжениях в узлах нагрузок промышленных сетей (6-10) кВ. Отсутствуют директивные документы, определяющие допустимые значения указанных коэффициентов. Наблюдается недостаточность исследований естественных запасов статической устойчивости комплексной нагрузки, которые являются критериями качества функционирования электрической сети.

Для повышения качества расчетного обеспечения статической устойчивости сетей необходимо, первоначально, произвести оценку параметров устойчивости комплексной нагрузки в нормальном режиме работы промышленной сети, прежде всего, для отыскания скрытого резерва электроэнергетической системы пригодного для подавления кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех (ЭМП). Определить в условиях действующей промышленной сети 6 кВ коэффициенты запасов статической устойчивости характерной комплексной нагрузки по напряжению, по активной мощности и по скольжению эквивалентной асинхронной нагрузки. Рассчитать уровень напряжения на границе балансовой принадлежности электрооборудования сети электроснабжающей организации 110 кВ и промышленной сети. Определить резерв регулирования напряжения в этой точке электроэнергетической системы в соответствии с директивными документами [18].

Нормальный установившийся режим работы электрической сети предопределяет отсутствие кондуктивных низкочастотных ЭМП, распространяющихся по проводам воздушной линии или жилам кабелей. Эти ЭМП, обусловленные нарушениями нормируемых ГОСТ 32144-2013 показателей качества электроэнергии, появляются в распределительных сетях, если полная мощность искажений нагрузки превышает 2 % от мощности трехфазного короткого замыкания в рассматриваемой точке сети [17]. Это обстоятельство обусловило выбор подстанции 6 кВ с характерной нагрузкой в промышленных сетях Сургутского месторождения нефти, получающих питание от сети 110 кВ мощной электроэнергетической системы ОАО «Тюменьэнерго». Принципиальная схема электроснабжения узла нагрузки с высоковольтными электродвигателями приведена на рис. 4.

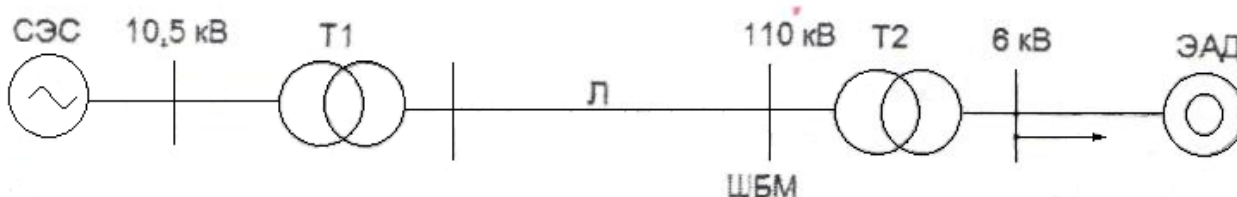


Рис. 4. Принципиальная схема электроснабжения эквивалентной асинхронной нагрузки:
ЭАД – эквивалентный асинхронный двигатель; ШБМ – шины бесконечной мощности

В исследуемой промышленной сети электростанции собственных нужд отсутствуют. Эти электростанции широко применяются в сетях среднего напряжения (6-10) кВ удаленных от градообразующих центров, например, на Ямальском месторождении.

Особенностью выбранного узла нагрузки является наличие высоковольтных синхронных и асинхронных электродвигателей (АД) в определенном соотношении, присущем нефтедобывающей отрасли народного хозяйства. Эти АД являются приводами различных технологических механизмов (насосов, компрессоров и т. д.) и вместе с другими видами нагрузок формируют состав потребителей электроэнергии. По составу электроприемников эта нагрузка соответствует типовому составу комплексной нагрузки нефтедобычи [20], приведенной в табл. 3. Наблюдается значительное превышение электродвигательной нагрузки над другими видами нагрузок, что обуславливает допустимость эквивалентирования этой нагрузки в виде эквивалентного асинхронного двигателя и не противоречит положениям теории статической устойчивости нагрузки. Физически и практически критическое напряжение любого узла нагрузки определяют асинхронные двигатели [21, 25].

Таблица 3

Типовой состав комплексной нагрузки при добычи нефти

Наименование потребителей комплексной нагрузки	Численное значение, %
СД напряжением (6-10) кВ	3
АД напряжением (6-10) кВ	48
АД напряжением 0,4 кВ	30
Потери	5
Электрическое освещение	5
Прочная нагрузка	9
Итого	100

Статические исследования параметров высоковольтных асинхронных двигателей нефтедобычи и обзор технической литературы позволили получить средние значения параметров эквивалентного асинхронного двигателя (о. е.): $K_{II} = 4,1$ – кратность пускового тока; $K_M = 1,7$ – кратность максимального момента; $K_{II.M} = 0,73$ – кратность пускового момента; $\cos \varphi = 0,8$ – коэффициент мощности; $m_{сш} = 0,5$ – статический момент сопротивления.

Эквивалентная асинхронная двигательная нагрузка в узле промышленной сети 6 кВ полигона исследования (рис. 4) фактически получает питание от шин бесконечной мощности (ШБМ) через понижающий трансформатор Т2, технические характеристики которого приведены в табл. 4.

Таблица 4

**Технические характеристики понижающего трансформатора Т2:
ТРДН-63000/110 (рис. 4)**

Номинальная мощность, МВ·А	Сочетание напряжений, кВ		Потери, кВт		Напряжение короткого замыкания, %	Ток холостого хода, %
	ВН	НН	XX	КЗ		
63	115	6,3	50,5	24,5	10,5	0,5

Расчет коэффициента запаса статической устойчивости комплексной нагрузки производим на базе идентифицированной по параметрам режима модели [23]. При этом учитываем, что при анализе режимов асинхронной нагрузки в пределах скольжения $0 \leq S \leq 1,0$ допускается применять Г-образную схему замещения [25, 27]. Схема замещения системы питания комплексной нагрузки приведена на рис. 5. В Г-образной схеме замещения не учитываются потери в стали ротора (ΔP_c), падение напряжения от тока намагничивания в обмотке статора эквивалентного асинхронного двигателя, обуславливающего величину реактивной мощности в режиме холостого хода и потери активной мощности в роторе (ΔP_p), расходуе-

мой на нагрев обмоток. Допустимость применения этой схемы обуславливается тем, что отношения $\Delta P_c/P$, Q_x/Q и $\Delta P_p/P$ (здесь P – активная мощность узла нагрузки, кВт; Q – реактивная мощность, кВАр) не превышают рекомендованной относительной ошибки расчета параметров режима равной $\pm 0,1$.

При составлении схемы замещения (рис. 5) не учитывались сопротивления линии 6 кВ от трансформатора Т2 до подстанции, питающей комплексную нагрузку, так как полное сопротивление Т2 на порядок превышает сопротивление этой линии. Параметры элементов схемы замещения определены в относительных базисных единицах при базисных условиях $S_6 = 63$ МВА и $U_6 = 115$ кВ.

Индуктивное сопротивление обмотки статора составляет $X_s = 0,266$, активное сопротивление эквивалентного асинхронного двигателя – $R = 0,0424$, индуктивное сопротивление трансформатора – $X_T = 0,105$.

Величина S характеризует степень отставания частоты вращения ротора эквивалентного асинхронного ω_R двигателя от частоты вращения магнитного поля статора ω и определяется по формуле [17, 25]

$$S = \frac{\omega - \omega_R}{\omega}. \quad (2)$$

Алгоритм решения сформулированных задач исследования основан на известных методах теории переходных процессов в электроэнергетических системах и содержит следующие этапы расчета [25, 27]:

1. *Запас устойчивости комплексной нагрузки по напряжению.* Определяется критическое напряжение $U_{кр}$ на клеммах эквивалентного асинхронного двигателя по формуле [25]:

$$U_{кр} = \sqrt{2P_H X_S}, \quad (3)$$

где P_H – номинальная активная мощность эквивалентной асинхронной нагрузки в нормальном режиме работы, $P_H = 1$ о. е.

Учитывая значения X_S , получаем $U_{кр} = 0,72$. Это означает, что при снижении напряжения на 28 % от номинального значения (U_H) начнется опрокидывание (останов) асинхронных двигателей комплексной нагрузки. При этом коэффициент запаса устойчивости по напряжению комплексной нагрузки, определенный по формуле [25]:

$$K_{3,U} = \frac{(U_H - U_{кр})}{U_H}, \quad (4)$$

составляет 0,28.

2. *Запас устойчивости по скольжению эквивалентной асинхронной нагрузки.* Определяется критическое скольжение эквивалентного асинхронного двигателя по формуле [25]:

$$S_{кр} = R/X_S. \quad (5)$$

При заданных значениях параметров схемы замещения, получаем $S_{кр} \approx 0,16$, то есть, если скольжение ротора превысит 16 %, то начнется процесс опрокидывания асинхронных двигателей.

Определяется номинальное скольжение ротора эквивалентного асинхронного двигателя S_H при условии $P_H = 1,0$, $U_H = 1,0$. Для решения задачи используется математическое выражение зависимости активной мощности асинхронного двигателя от скольжения S [25]:

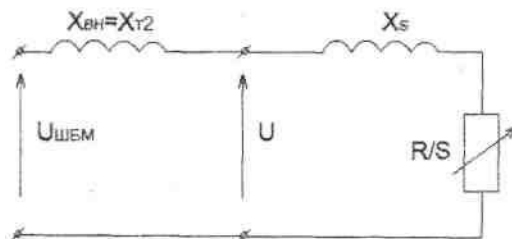


Рис. 5. Схема замещения системы питания комплексной нагрузки при нормальном режиме работы

$$P = U^2 RS / (X_S^2 S^2 + R^2), \quad (6)$$

где P – активная мощность асинхронного двигателя при величине скольжения ротора S , о. е.;

$R = \text{const}$;

$S = \text{const}$.

Отсюда можем записать квадратное уравнение вида [25]:

$$S^2 - \frac{U^2 R}{P X_S^2} S + \frac{R^2}{X_S^2} = 0. \quad (7)$$

В нормальном режиме работы ($U = U_H$, $P = P_H$) асинхронной нагрузки уравнение имеет два решения (два действительных корня): $S_1 = 0,05$, $S = 0,55$. Однако, устойчивой работе электродвигателя соответствует только первое значение. Таким образом, $S_H = S_T = 5\%$.

Коэффициент запаса устойчивости эквивалентной асинхронной нагрузки по скольжению, определенный по формуле [25]:

$$K_{3,S} = (S_{кр} - S_H) / S_H \quad (8)$$

составляет $K_{3,S} = 2,2$.

3. *Запас устойчивости комплексной нагрузки по активной мощности на границе балансовой принадлежности электрооборудования внешней и промышленной сетей.* Полученные значения коэффициентов запаса устойчивости ($K_{3,U}$, $K_{3,S}$) отображают качественное функционирование промышленной сети в соответствии с ГОСТ Р 50397-93. Однако, они сохраняются в узле нагрузки промышленной сети, если на границе раздела балансовой принадлежности электроустановок электроэнергетической системы и промышленной сети имеется определенный запас по активной мощности. Поддержание требуемого запаса является одной из основных задач электроснабжающей организации, задачей же персонала промышленных сетей является определение оптимального запаса по мощности. В нашем случае границей балансовой принадлежности являются ШБМ сети 110 кВ. В связи с этим определяется коэффициент запаса по активной мощности в этой точке сети (рис. 2).

Максимальная активная мощность асинхронной нагрузки, или так называемый опрокидывающий момент, достигается при критическом скольжении. $P_{max} = M_{max}$. Реактивная мощность Q потребляемая эквивалентным асинхронным двигателем определяется по формуле [25]:

$$Q = \frac{P}{R/S} X_S. \quad (9)$$

Напряжение на ШБМ определяется по формуле [25]:

$$U_{ШБМ} = \sqrt{\left(U_H + \frac{Q X_{BH}}{U_H}\right)^2 + \left(\frac{P X_{BH}}{U_H}\right)^2}. \quad (10)$$

В нормальном режиме работы имеем $Q = 0,31$, $U_{ШБМ} = 1,037$.

Максимальная опрокидывающая мощность эквивалентного асинхронного двигателя определяется по формуле [17]:

$$P_{max} = \frac{U_{ШБМ}^2}{2(X_{BH} + X_S)}. \quad (11)$$

При заданных значениях аргументов $P_{max} = 1,45$.

Коэффициент запаса устойчивости эквивалентной нагрузки по активной мощности, определенной по формуле [25]:

$$K_{3,P} = \frac{P_{max} - P_H}{P_H}, \quad (12)$$

составляет 0,45.

Таким образом, полученные численные значения коэффициентов запаса статической устойчивости комплексной нагрузки по напряжению ($K_{3,U} = 0,28$) и по скольжению ($K_{3,S} = 2,2$) характеризуют располагаемый запас устойчивости, который достаточен для обеспечения качественного электроснабжения потребителей согласно ГОСТ Р 50397-93. Однако, эти коэффициенты определены при достаточном значении коэффициента запаса статической устойчивости нагрузки по активной мощности ($K_{3,P} = 0,45$) на границе балансовой принадлежности электрооборудования внешней и промышленной сетей. Рекомендуется эти параметры сохранять при усложнении электромагнитной обстановки, возникающем при внедрении мощной искажающей нагрузки (гармоническое воздействие на сеть, несимметрия токов по фазам).

Системный анализ результатов исследования

Системный анализ применительно к результатам исследований предполагает [15]:

- установление границ критериев достаточности запасов статической устойчивости комплексной нагрузки нефтеперерабатывающих скважин по напряжению, по скольжению (для асинхронной нагрузки) и по активной мощности на границе балансовой принадлежности внешней сети 110 кВ и промышленной сети 6 кВ;

- формулировку главного аспекта системного анализа о возможности электрических сетей (6-110) кВ нефтеносных месторождений свободно развиваться на основе концепции Smart Grid.

С учетом этих положений первоначально производится общий анализ полученных результатов, а затем формулируется главный аспект системного анализа. Расчетное обеспечение внедрения концепции Smart Grid возможно на основе методологической базы кибернетики ЭЭС, с помощью которых созданы действующие пассивные сети. Однако это не означает, что при этом нет никаких проблем, препятствующих созданию активно-адаптивных сетей. Сущность этих проблем состоит в отсутствии, во многих случаях, объективных оценок технических средств ЭЭС, которые должны работать в условиях глобальной автоматизации.

Применительно к нефтедобывающей отрасли питающие сети (35-220) кВ и промышленные сети (6-10) кВ должны обеспечивать: нормированные показатели качества электроэнергии у потребителей электроэнергии [20] (кондуктивные ЭМП, обусловленные изменениями напряжений и частоты отсутствуют), самозапуск наземных и погружных электродвигателей, надежность электроснабжения потребителей в соответствии с их категориями [23], предельно возможную эффективность передачи и распределения электроэнергии, гибкость управления системами регулирования напряжения и реактивной мощности, высокую безопасность за счет научно-обоснованной устойчивости [3]. С учетом этого использовалась методологическая база исследования, в которой представлены принципиальные подходы и методы, которые основаны на применении математического моделирования, теории передачи и распределения электрической энергии, теории устойчивости.

К аналитическому заключению относятся следующие положения.

1. Промышленные сети 6 кВ Северных регионов нефтедобычи России из-за непродолжительного периода надежной работы опор ВЛ (от 2 до 7 лет), обусловленного природными явлениями, и достаточно высокой вероятностью появления в сетях кондуктивных низкочастотных ЭМП по отклонению напряжения, вызванных однофазными замыканиями на землю, нельзя отнести к основному элементу сетевой топологии ЭЭС концепции Smart Grid. В этих регионах проблема повышения надежности ВЛ среднего напряжения требует своего решения.

2. Для нефтеносных месторождений, на которых отсутствует или незначительное явление «невосприимчивости недр» опор ВЛ, определены коэффициенты запаса статической устойчивости комплексной нагрузки глубинных скважин:

- коэффициент запаса по статической устойчивости по напряжению составляет 0,28;
- коэффициент запаса статической устойчивости асинхронной нагрузки – 2,2;
- коэффициент запаса статической устойчивости по активной мощности на границе балансовой принадлежности внешней сети 110 кВ и промышленной сети 6 кВ – 0,45.

3. Эти коэффициенты запаса статической устойчивости, полученные на основе исследования в действующих сетях нефтедобывающего региона Сибири, отображают качественное функционирование этих сетей, специфику электроснабжения комплексной нагрузки нефтедобычи и не противоречат каким-либо требованиям директивных документов по статической устойчивости нагрузки [22, 23, 28].

4. Комплексный подход к исследованию статической устойчивости нагрузки во внешней и промышленных сетях позволяет представить полученные показатели устойчивости как критерии достаточности статической устойчивости комплексной нагрузки нефтедобычи для любых режимов работы смежных сетей. При таких показателях устойчивости электрические сети (6-110) кВ обеспечивают ключевые ценности концепции Smart Grid Евросоюза [4] и США [5] в региональных ЭЭС нефтедобывающих регионах: гибкость и экономичность за счет эффективного управления электропотреблением и качеством электроэнергии; надежность и безопасность электроснабжения за счет высокой статической устойчивости комплексной нагрузки по напряжению, скольжению и активной мощности, обеспечивающей самозапуск наземных и погружных электродвигателей.

Системный подход к анализу результатов исследования позволяет определить главный аспект, который интегрально характеризует их с позиции кибернетики электроэнергетических систем.

Главный аспект системного анализа применительно к задачам инновационного развития электрических сетей (6-110) кВ месторождений нефти как рецепторов на базе концепции Smart Grid формулируется как обеспечение: надежной работы воздушных линий электропередачи (опор) на напряжении (6-10) кВ и электромагнитной совместимости смежных электрических сетей на границе балансовой принадлежности питающих 110 кВ и промышленных сетей (6-10) кВ; запасов статической устойчивости комплексной нагрузки по напряжению, по скольжению и по активной мощности не ниже обоснованных значений (критериев достаточности запаса статической устойчивости).

Литература

1. Рыжаков В. В., Денчик Ю. М., Сальников В. Г., Кислицин Е. Ю., Ковалёва Н. А., Антипин Д. П. Энергоэффективность систем электроснабжения истощающихся нефтедобывающих скважин // Вестник кибернетики. 2016. № 1(21). С. 87–97.
2. Логинов, Е. Л., Логинов А. Е. Переход к интеллектуальной электроэнергетической системе с активно-адаптивной сетью: глобализационное конструирование новых управленческих полей в единой энергетической системе России // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2012. № 33 (174). С. 14–18.
3. Кобец Б. Б. Волкова И. О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid М. : Энергия, 2010. 208 с.
4. European Technology Platform Smart Grids, Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the future // European Commission Directorate-General for Research Information and Communication Unit European Communities. Brussels : European Communities, 2006. 40 p.
5. Grids 2030. A National Vision for Electricity's Second 100 years // Office of Electric Transmission and Distribution of USA Department of Energy. 2003.
6. Федеральная сетевая компания [сайт]. URL: <http://www.fsk-ees.ru> (дата обращения: 20.11.2017).
7. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года : Распоряжение Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. № 1715-р
8. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные Законодательные акты Российской Федерации : федер. закон от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ.
9. European Technology Platform Smart Grids. Strategic Deployment Document for Europe's Electricity Networks of the future. 2010.

10. Smart Grid System Report // U. S. Department of Energy. 2009.
11. РАО-ЕЭС [Электронный ресурс]. URL: www.rao-ees.ru (дата обращения: 20.11.2017).
12. Об утверждении целевой организационно-функциональной модели оперативно-диспетчерского управления ЕЭС России : приказ ОАО РАО ЕЭС России от 30.01.2006 г. № 68.
13. Кобец Б. Б., Волкова И. О., Огороков В. Р., Березин А. В. Анализ мирового и российского опыта использования технологий Smart Grid в российской электроэнергетике : науч.-техн. отчет. М. : ИНВЭЛ, 2010. 110 с.
14. Астахов Ю. Н., Веников В. А., Горский Ю. М. [и др.] Электрические системы. Кибернетика электрических систем : учеб. пособие / под ред. В. А. Веникова. М. : Высш. шк., 1974. 328 с.
15. Данилов Г. А., Денчик Ю. М., Иванов М. Н., Ситников Г. В. Повышение качества функционирования линий электропередачи / под ред В. П. Горелова, В. Г. Сальникова. Новосибирск : Новосиб. гос. акад. водн. трансп., 2013. 559 с.
16. Ковалева Н. А., Глотов А. А., Денчик Ю. М. Основные факторы влияния на качество функционирования электрических сетей северных месторождений полезных ископаемых // Электротехника. Энергетика. Машиностроение: в 3 ч. : сб. научн. трудов I междунар. науч. конф. молодых ученых. Секция Энергетика. г. Новосибирск. 2–6 декабря 2014. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. Ч. 2. 287 с. С. 20–23.
17. Сальников В. Г., Денчик Ю. М., Ковалева Н. А., Кислицин Е. Ю. Критерии достаточности запаса статической устойчивости комплексной нагрузки нефтедобычи для различных режимов работы системы электроснабжения // Науч. проблемы транспорта Сиб. и Дал. Вост. 2015. № 2. С. 206–210.
18. Кобец Б. Б., Волкова И. О. Smart Grid за рубежом как концепция инновационного развития электроэнергетики // Энергоэксперт. 2010. № 2. С. 24–30.
19. Шакарян Ю. Г., Новиков Н. Л. Технологическая платформа Smart Grid (основные средства) // Энергоэксперт. 2009. № 4. С. 42–49.
20. ГОСТ 32144-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. (EN 50160:2010, NEQ). М. : Стандартинформ, 2014. 16 с.
21. Шершова В. О. Определение критических напряжений на шинах комплексной нагрузки в режиме реального времени для задач противоаварийного управления // Науч. проблемы транспорта Сиб. и Дал. Вост. 2014. № 4. С. 287–292.
22. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей РФ. М. : СПО ОРГРЭС, 2003. 172 с.
23. Правила устройства электроустановок. М. : Деан, 2001. 928 с.
24. Иванова Е. В. Кондуктивные электромагнитные помехи в сетях транспортных систем (теория, расчет, подавление) // Трансп. дело России. 2006. № 8. С. 16–20.
25. Переходные процессы в электрических системах : сб. задач / отв. за вып. В. М. Левин. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. 332 с.
26. РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / под ред. Б. Н. Неклепаева. М. : ЭНАС, 2011. 144 с.
27. Закорюкин В. П., Крюков А. В., Конг Зянь Ле Математические модели узлов нагрузки электроэнергетических систем, построенные на основе фазных координат. Иркутск : ИрГУПС, 2013. 176 с.
28. Руководящие указания по устойчивости энергосистем. М. : Союзтехэнерго, 1983. 73 с.
29. Шайко В. П. Автоматическое регулирование в электрических системах : учеб. пособ. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2012. 195 с.
30. Аристер Н. И., Резник С. Д., Сазыкина О. А. Диссертационный менеджмент в вопросах и ответах / под общ. ред. Ф. И. Шамхалова. М. : ИНФРА-М, 2011. 256 с.

УДК 622.276.53:531.3

ВЫБОР МЕТОДИКИ РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ГАЗОЖИДКОСТНОЙ СМЕСИ В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТРУБАХ

А. П. Ельмендеев, В. С. Микшина, А. Ю. Вирстюк

*Сургутский государственный университет,
alikelm@icloud.com, mikshinavs@gmail.com, virstyk_AY@surgutneftegas.ru*

В работе исследуется вопрос выбора методики по расчету движения газожидкостной смеси для использования в системах поддержания принятия решения задач в скважинной добычи нефти. Выполнены расчеты по трем методикам и сделаны выводы об их возможном применении в информационных системах поддержки принятия решений инженера-геофизика.

Ключевые слова: газожидкостная смесь, модель дрейфа, гомогенная модель.

CHOICE OF CALCULATION METHODS FOR PRESSURE DISTRIBUTION OF LIQUID-GAS MIXTURE FLOW IN VERTICAL PIPES

A. P. Elmendejev, V. S. Mikshina, A. Yu. Virstyuk

*Surgut State University,
alikelm@icloud.com, mikshinavs@gmail.com, virstyk_AY@surgutneftegas.ru*

The paper studies the choice of calculation method of liquid-gas mixture flow for use in decision making systems in well oil production. Calculations were made using three methods and conclusions about their applicability in information systems of geophysicist decision making were drawn.

Keywords: liquid-gas mixture, drift model, homogeneous model.

В скважинной добыче нефти часто встает задача расчета газожидкостного подъемника: при выборе подземного оборудования, диагностике состояния системы «скважина-насос», прогнозировании режима работы скважины, выборе способа эксплуатации и проектировании обустройства нефтедобывающих объектов. Упомянутые задачи решаются на основе знания законов движения газожидкостных смесей (ГЖС) в вертикальных трубах. Известны десятки методик расчета, все они основаны на результатах лабораторных или промысловых исследований движения ГЖС в вертикальных трубах. Согласно рекомендациям [1] следует отдать предпочтение той группе методик расчета, в которых учитывается структура потока, поскольку ее влиянием обусловлен в значительной мере градиент давления при движении ГЖС.

Задачей настоящей работы является сравнение различных методик расчета ГЖС подъемника с целью рекомендации к использованию в алгоритмах программ, в информационных системах поддержания принятия решения (СППР). Критериями выбора должны стать: универсальность, простота, достаточная точность для практических расчетов.

Существующие методики можно разделить на 2 группы: методики, основанные на модели «потока дрейфа» и методики на основе «гомогенной» модели [2]. В модели «потока дрейфа» учитывается относительное движение газа и структура самого потока, состоящего из пузырьков газа. В «гомогенной» модели поток рассматривается как движение однородной

жидкости, при этом изменение градиента давления из-за «проскальзывания» пузырьков газа учитывается в общих потерях давления при движении потока жидкости.

Из всего многообразия методик расчета движения ГЖС в вертикальных трубах, представленных в литературе, были выбраны наиболее универсальные методики: обобщенная методика В. Г. Грона [2] и методика В. А. Сахарова [3]. Так же для сравнения был использован упрощенный подход, основанный на приближенной оценке работы газа по подъему жидкости [4, 5], который так же часто используют в расчетах и алгоритмах программных средств (например, в программном средстве «Автотехнолог») [6].

Во всех методах расчета кривая распределения давления строится методом численного интегрирования уравнения движения ГЖС [3]:

$$-\frac{dp}{dh} = \rho g + \lambda \frac{\rho v^2}{2D} + \rho v \frac{dv}{dh}, \quad (1)$$

где dp – перепад давления по длине подъемника;

dh – приращение длины подъемника;

ρ – плотность смеси;

g – ускорение свободного падения;

λ – коэффициент гидравлических сопротивлений двухфазного потока;

v – скорость смеси;

D – диаметр подъемных труб.

В большинстве методов последнее слагаемое в правой части уравнения (1), учитывающее расход энергии на ускорение смеси, не принимается во внимание из-за малой величины.

Уравнение (1) в методах, основанных на модели «потока дрейфа» используется в следующем виде:

$$-\frac{dp}{dh} = \rho_{\text{см}} g + \lambda_{\text{см}} \frac{\rho^* v^2}{2D}, \quad (2)$$

где $\lambda_{\text{см}}$ – коэффициент гидравлического трения двухфазного потока;

$\rho_{\text{см}}$ – истинная плотность смеси;

ρ^* – расходная плотность смеси.

$$\rho_{\text{см}} = \rho_{\text{ж}}(1 - \varphi) + \rho_{\text{г}}\varphi; \quad (3)$$

$$\rho^* = \rho_{\text{ж}}(1 - \beta) + \rho_{\text{г}}\beta, \quad (4)$$

здесь $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкой фазы;

$\rho_{\text{г}}$ – плотность газовой фазы;

φ – истинноегазосодержание потока;

β – расходноегазосодержание потока.

Методы, использующие модель «потока дрейфа» базируются, как правило, на результатах лабораторных исследований, что часто приводит к значительным погрешностям при промышленных расчетах [3].

В методах, основанных на «гомогенной» модели, потери давления, вызванные трением и относительной скоростью фаз, учитываются коэффициентом суммарных потерь двухфазного потока аналогично тому, как в однофазном потоке потери на трение определяются через коэффициент гидравлического трения. В этих методах уравнение имеет вид:

$$-\frac{dp}{dh} = \rho^* g + \lambda^* \frac{\rho^* v^2}{2D}, \quad (5)$$

где λ^* – коэффициент суммарных потерь двухфазного потока.

Преимуществом методов, основанных на «гомогенной» модели является то, что они позволяют обработать и обобщить данные, полученные при исследовании работы скважин и, следовательно, избежать распространения результатов лабораторных экспериментов на промысловые исследования [3].

Упрощенный подход основывается на предположении, что в вертикальных трубах происходит изотермическое расширение газа от давления насыщения до устьевое давление и его работу можно определить по законам термодинамики [4]. Конечное уравнение состоит из четырех слагаемых:

$$p_n = p_y + p_1 + p_2 - p_3, \quad (6)$$

где p_n – давление в нижней части вертикальной трубы;

p_y – устьевое (конечное) давление;

p_1 – гидростатическое давление;

p_2 – потери давления на трение;

p_3 – давление разгрузки в результате газлифтного эффекта, выделяющегося газа в насосно-компрессорных трубах (НКТ) на трение;

p_y – обычно задается или известно, p_1 и p_2 – определяются по законам трубной гидравлики.

$$p_3 = x\rho_{жg}, \quad (7)$$

здесь x – коэффициент разгрузки, определяется как:

$$x = \frac{1}{\rho_{жg}} \left(G_0 - \alpha \left(\frac{p_{нас} + p_y}{2} - p_0 \right) \right) (1 - n) p_0 \eta \ln \left(\frac{p_{нас} + p_0}{p_y + p_0} \right) \quad (8)$$

где G_0 – газовый фактор;

α – коэффициент растворимости газа;

n – обводненность;

$p_{нас}$ – давление насыщения;

p_0 – давление атмосферное;

η – коэффициент полезного действия работы газа [4, 5].

Для численного интегрирования уравнений (1) и (2) по методикам В. Г. Грона и В. А. Сахарова была разработана компьютерная программа (среда разработки Microsoft Visual Studio 2010, язык программирования C#). Блок – схема алгоритма расчета распределения давления при движении ГЖС в вертикальных трубах представлена на рис. 1.

Алгоритмы расчета распределения давления принципиально отличаются лишь в части определения градиента давления, уравнения (1) и (2). В остальном, последовательность алгоритмов идентична.

Расчет ведется по принципу «сверху вниз», от устья до нижней части НКТ. Задаются исходные данные, начальное давление $p_{нач} = p_y$, начальная температура рассчитывается как функция дебита, глубины скважины, пластовой температуры:

$$t_{нач} = t_y = t(q, h_{скв}, t_{пл}). \quad (9)$$

Задается шаг Δp : 10 % от текущего давления. Затем для средних значения $p_{ср}$ и $t_{ср}$ рассчитываются физико-химические свойства нефти, воды, газа. В зависимости от методики определяются необходимые параметры и критерии состояния потока газожидкостной смеси:

φ – истинное газосодержание, доля ед.;

β – истинное газосодержание, доля ед.;

Re – безразмерный критерий Рейнольдса;

We – безразмерный критерий Вебера;
 Ku – безразмерный критерий Кутателадзе.

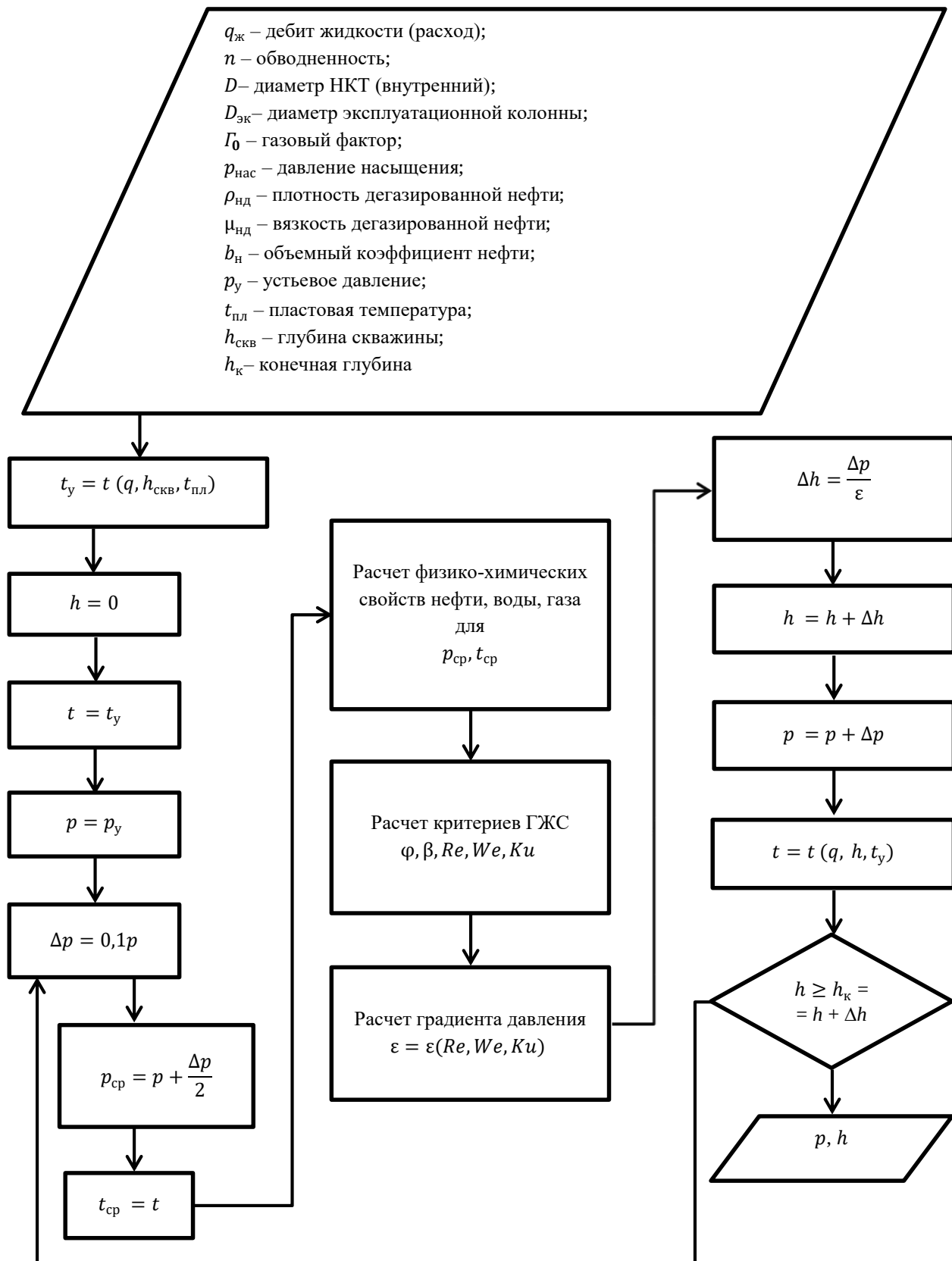


Рис. 1. Блок схема расчета распределения давления при движении ГЖС в вертикальных трубах

Так же рассчитывают $\rho_{см}$, $\lambda_{см}$, ρ^* , λ^* и определяют градиент давления ε . Зная Δp и ε определяется шаг по глубине Δh и следующие значения глубины h_{i+1} , давления p_{i+1} и температуры t_{i+1} . Расчет повторяется и заканчивается, если глубина h превысит или станет равной конечной глубине h_k .

Следует отметить, что для расчета по упрощенной методике по уравнению (6) не требуется прибегать к численным методам интегрирования. Собственно, в простоте расчета и заключается преимущество упрощенной методики.

На рис. 2 представлены кривые распределения давления в НКТ, выполненные по методикам В. Г. Грона и В. А. Сахарова, а так же по упрощенной методике для следующих исходных данных:

1. Дебит жидкости (расход) $q_{ж} = 20 \text{ м}^3/\text{сут}$;
2. Обводненность $n = 0 \%$;
3. Диаметр НКТ (внутренний) $D = 0,050 \text{ м}$;
4. Диаметр эксплуатационной колонны $D_{эк} = 0,150 \text{ м}$;
5. Газовый фактор $G_0 = 55 \text{ м}^3/\text{сут}$;
6. Давление насыщения $p_{нас} = 12,3 \text{ МПа}$;
7. Плотность дегазированной нефти $\rho_{нд} = 874 \text{ кг/м}^3$;
8. Вязкость дегазированной нефти $\mu_{нд} = 41,2 \text{ мПа·с}$;
9. Объемный коэффициент нефти $b_n = 1,13$;
10. Устьевое давление $p_y = 1,1 \text{ МПа}$;
11. Пластовая температура $t_{пл} = 83 \text{ }^\circ\text{C}$;
12. Глубина скважины $h_{скв} = 2800 \text{ м}$;
13. Конечная глубина (глубина установки насоса) $h_k = 1800 \text{ м}$.

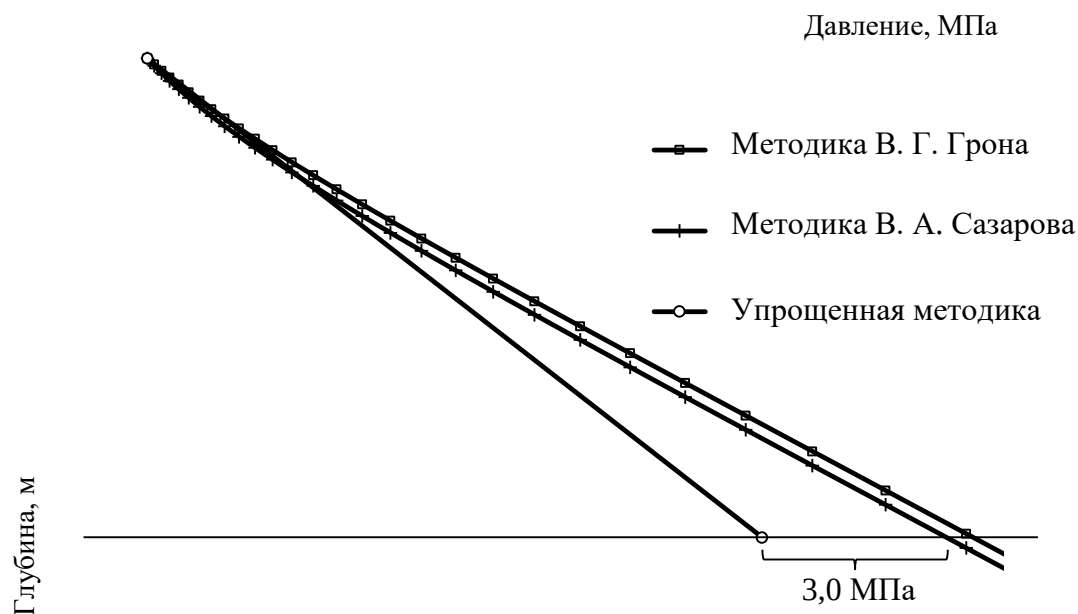


Рис. 2. Результаты численного эксперимента: расчет распределения давления при движении ГЖС в НКТ

Расчет производился «сверху-вниз» от устья до глубины установки насоса: от 0 м до 1800 м.

Для оценки результатов за базу сравнения приняты результаты расчета, полученные по методике В. А. Сахарова. Из графика видно, что значения конечных давлений p_k , полученные по методикам В. Г. Грона и В. А. Сахарова 14,5 и 14,1 МПа соответственно, отличаются на 0,4 МПа, что для практических расчетов допустимо (2,8 %). И, напротив, согласно

результату расчета по упрощенной методике $p_k = 11,1$ МПа и результату расчета по методике В. А. Сахарова разница значительная 3,0 МПа (27,0 %).

Для исследования зависимости p_k от $q_{ж}$ и n были выполнены аналогичные расчеты для $q_{ж}$ от 10 до 100 м³/сут с шагом $\Delta q_{ж} = 10$ м³/сут, и n от 0 до 100 % с шагом $\Delta n = 20$ % по методике В. А. Сахарова и по упрощенной методике. Результаты сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета p_k в зависимости от $q_{ж}$ и n , МПа

$q_{ж},$ м ³ /сут	n, %											
	0		20		40		60		80		100	
	Методика											
	В. А. Са-харов	упрощ.	В. А. Са-харов	упрощ.	В. А. Са-харов	упрощ.	В. А. Са-харов	упрощ.	В. А. Са-харов	упрощ.	В. А. Са-харов	упрощ.
10	14,7	11,1	17,2	13,5	17,6	14,8	18,1	16,6	18,5	17,8	18,9	18,9
20	14,1	11,1	15,2	13,5	16,9	14,9	17,5	16,6	18,25	17,8	18,9	18,9
30	13,8	11,1	14,8	13,5	16,5	14,9	17,3	16,6	18,15	17,8	18,9	18,9
40	13,6	11,1	14,6	13,5	15,6	14,9	17,1	16,6	18	17,8	18,9	18,9
50	13,4	11,2	14,4	13,6	15,5	14,9	16,8	16,7	17,94	17,8	18,9	18,9
60	13,4	11,2	14,4	13,6	15,5	15,0	16,6	16,7	17,91	17,8	18,9	18,9
70	13,3	11,2	14,4	13,6	15,45	15,0	16,6	16,7	17,91	17,8	19,0	19,0
80	13,25	11,3	14,4	13,7	15,4	15,0	16,6	16,7	17,89	17,9	19,0	19,0
90	13,2	11,3	14,3	13,7	15,4	15,1	16,6	16,7	17,86	17,9	19,0	19,0
100	13,2	11,4	14,3	13,8	15,4	15,1	16,7	16,8	17,8	17,9	19,0	19,0

По результатам расчета p_k , (табл. 1), получена разность конечных давлений (табл. 2) – Δ как функция $q_{ж}$ и n :

$$\Delta = p_{k2} - p_{k1}, \quad (10)$$

где Δ – разность конечных давлений;

p_{k1} – конечное давление, рассчитанное по упрощенной методике;

p_{k2} – конечное давление, рассчитанное по методике В. А. Сахарова

Таблица 2

Зависимость $\Delta = \Delta(q_{ж}, n)$, МПа

$q_{ж},$ м ³ /сут	$n, \%$					
	0	20	40	60	80	100
10	3,6	3,7	2,8	1,5	0,7	0,0
20	3,0	1,7	2,0	0,9	0,5	0,0
30	2,7	1,3	1,6	0,7	0,4	0,0
40	2,4	1,1	0,7	0,5	0,2	0,0
50	2,2	0,8	0,6	0,1	0,1	0,0
60	2,1	0,8	0,5	-0,1	0,1	0,0
70	2,1	0,8	0,5	-0,1	0,1	0,0
80	2,0	0,7	0,4	-0,1	0,0	0,0
90	1,9	0,6	0,3	-0,1	0,0	0,0
100	1,8	0,6	0,3	-0,1	-0,1	0,0

На рис. 3 отображено графическое представление зависимости $\Delta = \Delta(q_{ж}, n)$ в виде поверхности.

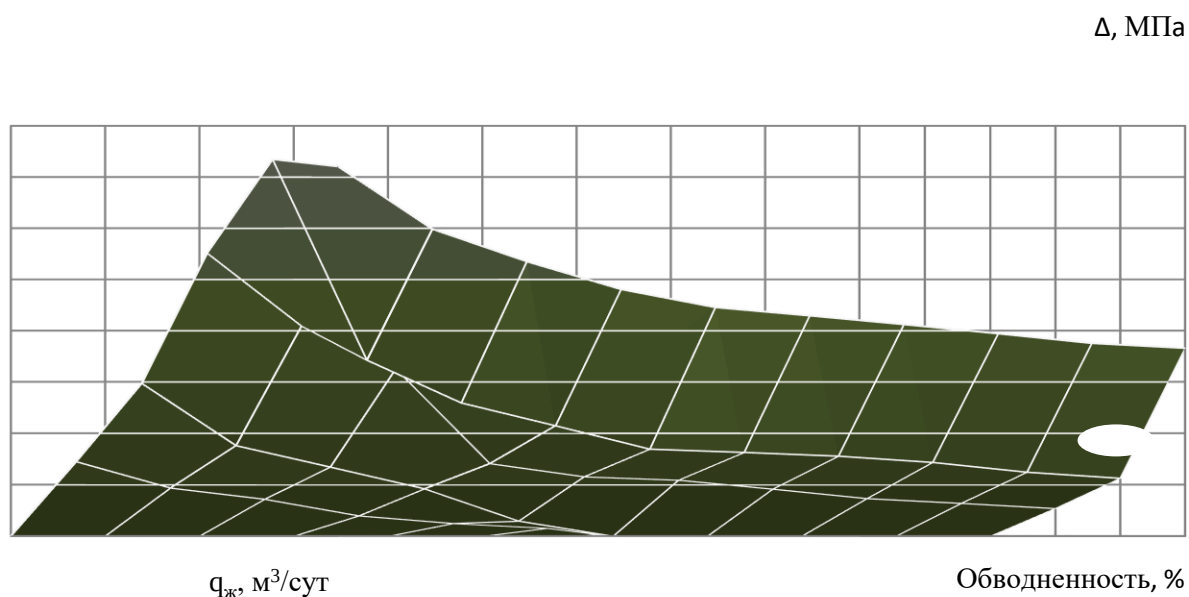


Рис. 3. Графическое представление зависимости $\Delta = \Delta(q_{ж}, n)$

Трехмерный график на рис. 3 представлен в следующих координатах: по оси x – обводненность скважины (%), по оси y – разность конечных давлений, МПа, по оси z – дебит жидкости $\text{м}^3/\text{сут}$. Максимум значений конечных давлений Δ приходится на минимальные значения дебита $q_{ж}$ и обводненности n : разница в определении конечных давлений Δ , рассчитанных по упрощенной методике и по методике В. А. Сахарова тем больше, чем меньше обводненность n и меньше дебит жидкости $q_{ж}$. С увеличением n до 100 % разница становится равной нулю, расчеты методик совпадают:

$$p_{к1} = p_{к2} \quad (11)$$

Результат вполне ожидаем: при 100 % обводненности скважинной жидкости, когда нефти в потоке нет, выделившегося газа соответственно тоже, расчет преобразуется в достаточно простой алгоритм расчета движения потока воды в трубе. Однако в этом случае пропадает надобность и смысл в расчетах, относящихся к тематике «скважинная добыча нефти». И напротив, при низкой обводненности скважинной жидкости газа выделяется много, эффект проскальзывания пузырьков газа относительно жидкости более заметен особенно при малых дебитах жидкости. Очевидно, что упрощенную методику можно использовать лишь в очень ограниченных случаях, при выполнении условий: $n > 60\%$ и $q_{ж} > 50 \text{ м}^3/\text{сут}$. В остальных случаях ошибки могут быть значительными и, следовательно, высока вероятность ошибок при решении задач по выбору подземного оборудования, при диагностике состояния системы «скважина-насос», прогнозировании режима работы скважины [8], выборе способа эксплуатации и проектировании обустройства нефтедобывающих объектов.

Таким образом, сравнив три разные методики расчета движения ГЖС в подъемнике можно рекомендовать к использованию в качестве универсальных инструментов в алгоритмах компьютерных программ, в информационных системах и СППР методики, основанные

как на модели потока «дрейфа», так и методики на основе «гомогенной» модели. Результаты, полученные при проведении численного эксперимента, с широким диапазоном изменения исходных данных по методикам В. А. Сахарова и В. Г. Грона практически совпали.

Использование упрощенной методики [4, 5] в компьютерных программах нецелесообразно, простота расчета не обеспечивает приемлемую для практики точность результата при широком изменении исходных данных.

Литературы

1. Справочное руководство по проектированию разработки и эксплуатации нефтяных месторождений. Добыча нефти / под общ. ред. Ш. К. Гиматудинова. М. : Недра, 1983. 456 с.
2. Мищенко И. Т., Сахаров В. А., Грон В. Г., Богомольный Г. И. Сборник задач по технологии и технике нефтедобычи : учеб. пособие для вузов. М. : Недра, 1984. 272 с.
3. Сахаров В. А., Воловодов А. В., Акопян Б. А., Мохов М. А., Грехов В. В., Гареев А. А. Оптимизация работы газлифтных скважин в условиях прогрессирующего обводнения // Обзорная информ. Сер. Нефтепромышленное дело. 1989. Вып. 8. С. 21–28.
4. Щуров В. И. Технология и техника добычи нефти : учеб. для вузов. М. : Альянс, 2005. 510 с.
5. Арбузов В. Н. Эксплуатация нефтяных и газовых скважин : учеб. пособие : в 2 ч. Томск : Изд-во Томск. политех. ун-та, 2012. Ч. 2. 272 с.
6. Субарев Д. Н. Оптимизация подбора оборудования скважин с учетом прогноза надежности : дис. ... к. техн. н. Тюмень, 2013. 118 с.
7. Калиткин Н. Н., Альшина Е. А. Численные методы : в 2 кн. Численный анализ. М. : Академия, 2013. Кн. 1. 304 с.
8. Ельмендеев А. П. Определение расходно-напорной характеристики погружной установки электроцентробежного насоса при работе на реальной жидкости // Сб. научн. стат. по итогам междунар. науч.-практ. конф. 29–30 апреля 2014. СПб., 2014. С. 62–64.

УДК 004.946+004.925.4

МЕТОДЫ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ВИРТУАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МУЛЬТИТЕКСТУРИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ СМЕШИВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

А. В. Мальцев, П. Ю. Тимохин, А. М. Трушин

*Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований
Российской академии наук, avmaltcev@mail.ru, webpismo@yahoo.de*

В работе предлагаются новые методы и алгоритмы мультитекстурирования объектов трехмерной виртуальной среды. Рассматривается задача рендеринга объектов с применением смешанных материалов (blend materials). Такие материалы состоят из нескольких подматериалов, структурированных в виде двоичного дерева и накладываемых на одну и ту же область поверхности объекта. В процессе визуализации используется попиксельное смешивание результатов независимого применения к поверхности объекта каждого из подматериалов, входящих в дерево. Предлагаемые решения основаны на применении распределенных вычислений с помощью современных многоядерных GPU.

Ключевые слова: визуализация, мультитекстурирование, мульти-материал, шейдеры.

METHODS FOR DISTRIBUTED VISUALIZATION OF VIRTUAL OBJECTS USING MULTITEXTURING BASED ON MATERIAL BLENDING

A. V. Maltsev, P. Yu. Timokhin, A. M. Trushin

*System Research Institute, Russian Academy of Sciences,
avmaltcev@mail.ru, webpismo@yahoo.de*

The paper proposes new multi-texturing methods and algorithms for objects of 3D virtual environment. The task of object rendering with blend materials is considered. Such materials consist of several sub-materials structured in the form of a binary tree and laid on the same area of the object surface. To blend results obtained by independent application of each material from the tree to the object's surface, the visualization process uses per-pixel mixing. Proposed solutions are based on the use of distributed computing by means of modern multi-core GPUs.

Keywords: visualization, multitexturing, multi material, shaders.

Введение. В настоящее время во многих сферах деятельности человека широко используется компьютерное моделирование и визуализация трехмерных объектов. Для достижения сходства какого-либо виртуального объекта с его реальным прототипом, кроме придания нужной формы, необходимо также задать визуальные свойства поверхности этого объекта путем наложения на нее нужного рисунка – текстуры. Данный процесс называется текстурированием объекта. Общим случаем текстурирования трехмерных объектов является использование материалов. Данный подход позволяет не только определить рисунок поверхности, но также задать некоторые ее свойства, например, способность отражать и излучать свет, степень прозрачности, шероховатость поверхности. Все эти свойства обычно описываются в материале в виде различных текстур (диффузной текстуры, карты прозрачности, карты нормалей, отражения и т. д.) и параметров отражения и излучения различных компонент освещения. Такой материал далее будем называть стандартным.

В процессе моделирования и визуализации виртуальной среды часто возникает задача мультитекстурирования объектов [1, 2]. Ее суть состоит в необходимости использования на

одной и той же поверхности сразу несколько текстур одного типа. Как правило, эти текстуры являются составной частью каких-либо материалов. Например, при моделировании частичного покрытия снегом некоторого ландшафта в зимних условиях требуется имитировать как минимум две составляющие: саму подстилающую поверхность и лежащие на ней участки снега. Эти элементы имеют различную природу и характеристики, следовательно, должны моделироваться разными материалами. Одним из эффективных способов решения задачи мультитекстурирования является применение смешиваемых материалов или, как их еще называют, blend-материалов [3].

В данной работе предлагаются новые распределенные методы и подходы для визуализации на GPU объектов трехмерной виртуальной среды с использованием смешиваемых материалов в масштабе реального времени. Далее рассмотрим эти решения подробно.

Мульти-материал blend и общая схема его применения при рендеринге объекта

Blend-материал представляет собой совокупность некоторого числа подматериалов, структурированных в виде двоичного дерева T и смешиваемых по определенным правилам. В качестве подматериалов могут выступать как стандартные, так и blend-материалы, при этом первые являются листьями упомянутого дерева, а вторые – внутренними узлами и корнем.

Чтобы визуализировать виртуальный объект с наложенным на него blend-материалом, произведем рекурсивный обход дерева T , начиная с корня. Для каждого внутреннего узла уровня n вычислим промежуточное (для корневого узла – результирующее) значение интенсивности I^n отраженного освещения в каждом пикселе поверхности виртуального объекта путем смешивания интенсивностей I_1^{n+1} и I_2^{n+1} в том же пикселе, полученных в процессе обработки двух дочерних узлов $n + 1$ уровня. Алгоритм смешивания устанавливается отдельно для каждого родительского узла на этапе создания дизайнером трехмерной сцены. Для этого можно использовать коэффициент смешивания $k_b \in [0,1]$ или текстурную маску M_b .

Коэффициент k_b задает процентное соотношение вкладов каждой из интенсивностей освещения I_1^{n+1} и I_2^{n+1} , вычисленных в дочерних узлах, в значение интенсивности I^n родительского узла:

$$I^n = (1 - k_b) I_1^{n+1} + k_b I_2^{n+1}. \quad (1)$$

Параметр k_b распространяется на все пиксели поверхности визуализируемого виртуального объекта. Маска же дает возможность задать подобный коэффициент для каждого пиксела объекта в отдельности. Она представляет собой текстуру в оттенках серого цвета, где более темные области означают преобладание первого подматериала в смеси, а более светлые – второго. Формула расчета интенсивности отраженного освещения в пикселе для родительского узла n -ого уровня в таком случае аналогична (1):

$$I^n = (1 - M_b(s, t)) I_1^{n+1} + M_b(s, t) I_2^{n+1}, \quad (2)$$

где s, t – текстурные координаты для рассматриваемого пиксела объекта;

$M_b(s, t) \in [0,1]$ – значение коэффициента смешивания для этого пиксела, взятое из маски M_b по координатам s, t .

В случае листового узла, значение интенсивности I^n в каждом пикселе поверхности объекта вычислим по одной из известных моделей расчета освещенности (например, Фонга [4], Блинна [5] или расширенной модели, описанной в [6]) с учетом параметров материала и входящих в него текстур прозрачности, рельефа, отражения и т. д.

Визуализация изображения объекта с blend-материалом

Рассмотрим задачу отображения виртуального объекта трехмерной сцены с использованием blend-материала на примере моделирования покрытия поверхности площадки неко-

торого виртуального полигона в зимних условиях. Данный полигон и упомянутая площадка (выделена цветом) представлены в двух ракурсах на рис. 1.

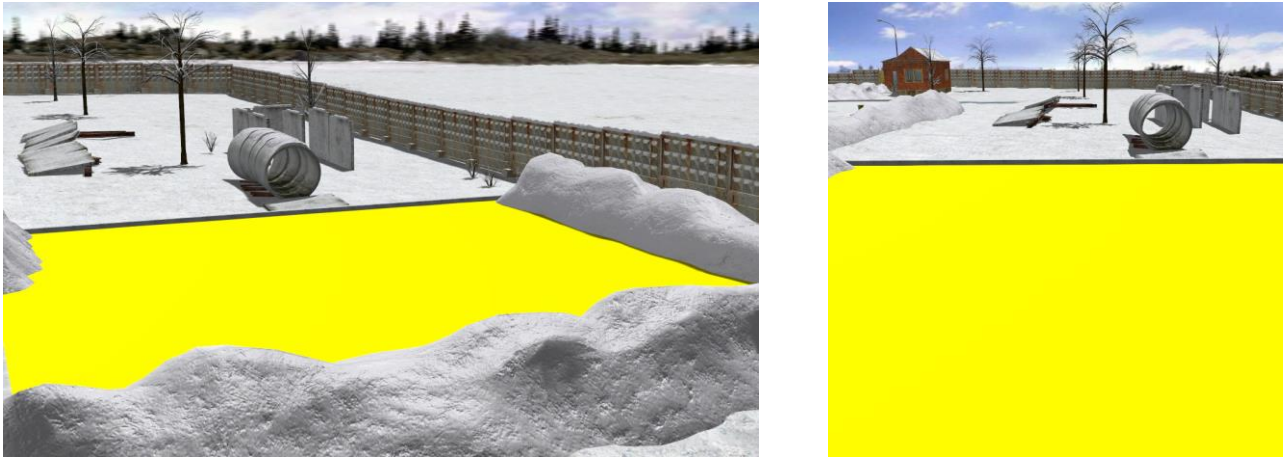


Рис. 1. Площадка виртуального полигона в зимних условиях

Используемый для покрытия площадки мульти-материал B включает два стандартных материала: S_1 «асфальт» и S_2 «снег». Каждый из них содержит свои коэффициенты отражения зеркальной составляющей освещения и степени блика, диффузную текстуру (рис. 2–3), определяющую цвет, а S_2 еще и карту нормалей (рис. 4), которая позволяет имитировать микрорельеф. Смешивание материалов будем производить с помощью текстурной маски M_b , изображенной на рис. 5. Темные ее части соответствуют преобладанию S_1 , светлые – S_2 . Заметим, что текстуры, содержащиеся в материалах, представляют собой небольшие тайлы, которые при наложении на поверхность моделируемой площадки циклически повторяются, а маска M_b – покрывает всю площадку целиком. В поставленной задаче двоичное дерево T состоит из корневого узла, связанного с blend-материалом B , и двух его дочерних узлов – листьев, представленных стандартными материалами S_1 и S_2 . Чтобы определить по формуле (2) результирующее значение интенсивности I^0 отраженного освещения в каждом пикселе поверхности нашей виртуальной площадки, необходимо вычислить интенсивности I_1^1 и I_2^1 освещения для тех же пикселей в случае наложения на площадку каждого из материалов S_1 и S_2 по отдельности. Для этого из всех объектов, попадающих в пирамиду видимости текущей виртуальной камеры, дважды визуализируем только рассматриваемую площадку: сначала с материалом S_1 , затем с материалом S_2 . Расчет освещенности поверхности виртуального объекта будем производить попиксельно на графическом процессоре, используя шейдеры, реализующие расширенную вычислительную модель из [6]. Требуемые для расчета данные о коэффициентах отражения диффузной и зеркальной компоненты освещения, а также о нормалях к поверхности в пикселях объекта возьмем из диффузной текстуры, текстуры нормалей и параметров материала. Отметим, что при рендеринге площадки с материалом S_1 , в нашем случае, нормаль перпендикулярна плоскости площадки и одинакова для всех ее пикселей. Результат каждой визуализации сохраним в виде текстуры. При этом целесообразно применение так называемого прямого рендеринга в текстуру с использованием технологии FBO (framebuffer objects). FBO – это расширение OpenGL, которое обеспечивает эффективный интерфейс для отрисовки в контексты, отличные от буферов GL, предоставленных оконной системой. Более подробно про использование технологии FBO можно изучить в [7]. Заметим, что ширина W и высота H буферов (как и ассоциированных с ними текстур) в пикселях должны быть не меньше соответствующих размеров буфера кадра. При этом предполагается, что все буферы, используемые для отрисовки одного и того же объекта с мульти-материалом, имеют одинаковые размеры.



Рис. 2



Рис. 3

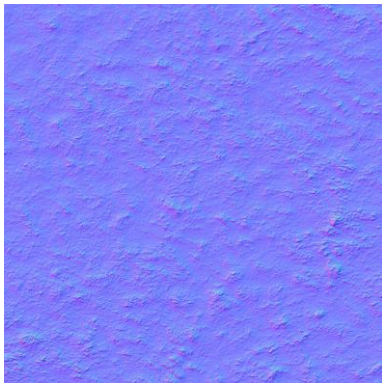


Рис. 4

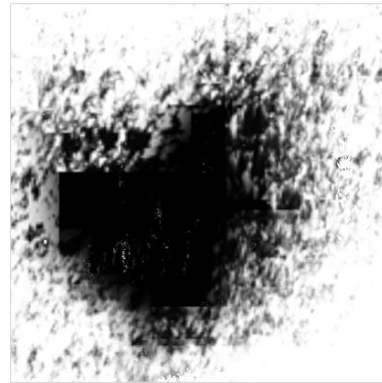


Рис. 5

Полученные в результате текстуры M_1 и M_2 с изображениями площадки покрытой асфальтом (материал S_1) и покрытой снегом (материал S_2) представлены соответственно на рис. 6 и 7. В них цвет каждого пиксела, принадлежащего объекту, соответствует интенсивности света, отраженного в точке поверхности этого объекта. Таким образом, M_1 и M_2 хранят иско-
мые нами значения I_1^1 и I_2^1 для каждого пиксела площадки.



Рис. 6

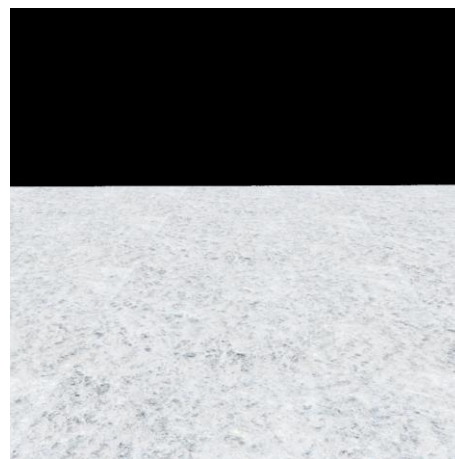


Рис. 7

Далее проведем смешивание материалов на поверхности виртуального объекта. Для этого еще раз выполним рендеринг площадки, но записывать полученный результат будем уже не в текстуру, а в буфер кадра. В ходе обработки каждого пиксела P объекта (площадки) во фрагментном шейдере необходимо прочитать значения интенсивностей I_1^1 и I_2^1 из соот-

ветствующих P текселов текстур M_1 и M_2 , а также значение коэффициента смешивания из текстуры маски M_b . Чтение данных из M_b осуществим по текстурным координатам s_P, t_P пиксела P . Они доступны во фрагментном шейдере в результате выполняемой графическим конвейером интерполяции текстурных координат, заданных для вершин полигональной модели площадки. На рис. 8 визуально продемонстрировано распределение считываемых из M_b коэффициентов смешивания $M_b(s_P, t_P) \in [0,1]$ по поверхности моделируемой площадки. Более светлые области соответствуют большему значению коэффициента и, следовательно, преобладанию материала S_2 .

Чтобы получить интенсивности I_1^1 и I_2^1 , определим текстурные координаты s_m, t_m тексела, соответствующего точке P , в текстурах M_1 и M_2 . Для этого во фрагментном шейдере считаем экранные координаты P_x, P_y пиксела P из стандартной переменной $gl_FragCoord$ и поделим их на соответствующие размеры W, H используемых буферов FBO и ассоциированных с ними текстур M_1 и M_2 : $s_m = P_x/W, t_m = P_y/H$. Подставляя найденные данные в (2), получим следующую формулу для вычисления интенсивности света, отраженного в точке P поверхности моделируемой площадки, с учетом смешивания двух материалов:

$$I^0 = (1 - M_b(s_P, t_P)) M_1(P_x/W, P_y/H) + M_b(s_P, t_P) M_2(P_x/W, P_y/H).$$

Результат визуализации покрытия поверхности виртуальной площадки с использованием изложенного метода рендеринга объектов с мульти-материалом blend, представлен на рис. 9. Описанный подход применим к дереву T произвольной глубины, которая может быть ограничена лишь объемом видеопамяти, требуемой под буферы FBO, и максимальным временем обработки этого дерева, обеспечивающим выполнение визуализации виртуальной сцены в реальном времени.

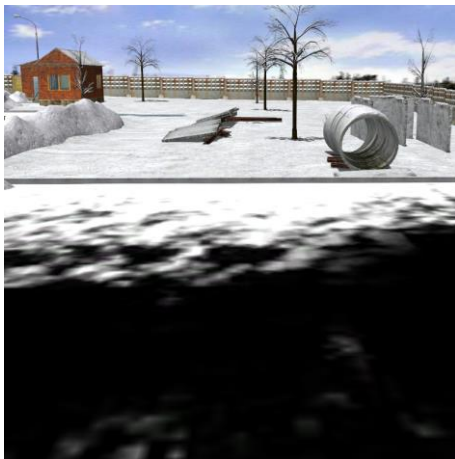


Рис. 8



Рис. 9

Закключение. В результате проведенных исследований были созданы новые методы и подходы для визуализации трехмерных виртуальных объектов с использованием мультитекстурирования. Особенностью предлагаемых решений является смешивание на объекте не отдельных текстур, а полноценных материалов, что позволяет более реалистично моделировать визуальные характеристики объектов виртуальной среды. Кроме того, отдельный рендеринг подматериалов из бинарного дерева в буферы FBO снимает ограничение на глубину такого дерева, вызываемое максимальным числом доступных в шейдерах текстурных блоков. Созданные методы и алгоритмы широко используют технологии шейдерной обработки на современных GPU и поддерживают рендеринг сложных сцен в реальном времени. Предложенные решения реализованы в виде программных модулей и прошли успешную апробацию в составе системы визуализации, разработанной в ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН.

Литература

1. Benstead L. Beginning OpenGL Game Programming (2nd Ed.). Boston : Course Technology PTR, 2009. 290 p.
2. Федорищев Л. А. Мультитекстурирование с помощью шейдеров // Программные продукты и системы. 2013. № 1. С. 58–61.
3. Blend Material [Электронный ресурс] URL: <http://help.autodesk.com/view/3DSMAX/2017/ENU/?guid=GUID-D2B59023-7D53-4E86-804F-7A037E787055> (дата обращения: 16.10.2017).
4. Phong B. T. Illumination for computer generated pictures // Communications of ACM 18. 1975. № 6. P. 311–317.
5. Blinn J. F. Models of light reflection for computer synthesized pictures // Proceedings of 4th annual conference on computer graphics and interactive techniques. 1977. P. 192–198.
6. Мальцев А. В., Михайлюк М. В. Моделирование теней в виртуальных сценах с направленными источниками освещения // Информационные технологии и вычислительные системы. 2010. № 2. С. 68–74.
7. Framebuffer Object [Электронный ресурс] URL: http://www.opengl.org/wiki/Framebuffer_Object (дата обращения: 16.10.2017).

УДК 519.233.5:519.87

АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ПОВЕДЕНИЯ СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В. С. Микшина, Н. Б. Назина, Л. А. Денисова
Сургутский государственный университет, mikshinavs@gmail.com

В работе представлены результаты исследования биомедицинских данных, а также данных, получаемых с датчиков в области нефтегазовой промышленности, методами математической статистики. В качестве биомедицинских данных, использовались показатели кардиоинтервала сердечного ритма, а в качестве технических данных использовались показатели датчиков водяной трубы. В исследовании определялась корреляционная зависимость между последовательными уровнями временного ряда, со сдвинутыми во времени рядами данных. Проведен анализ автокорреляционной функции и коррелограммы.

Ключевые слова: кардиоинтервал, показания счетчика расхода сетевой воды, временной ряд, коэффициент автокорреляции, коррелограмма.

TIME SERIES ANALYSIS OF COMPLEX DYNAMIC SYSTEMS BEHAVIOR

V. S. Mikshina, N. B. Nazina, L. A. Denisova
Surgut State University, mikshinavs@gmail.com

The paper presents the results of a study of biomedical data, as well as data obtained from receivers using mathematical statistics in the oil and gas industry. As biomedical data, the RR intervals were used for cardiac rhythm, and the parameters of water pipe sensors were used as characteristic data. The study determined the correlation dependence between progressive levels of the time series with time-shifted data series. An analysis of the autocorrelation function and the correlogram is carried out.

Ключевые слова: RR interval, meter reading of delivery water supply rate, time series, autocorrelation coefficient, correlogram.

Введение

На сегодняшний день исследование сложных динамических систем является актуальной и трудоемкой задачей, так как в таких системах состояние принимает новое значение в каждый момент времени, отличное от предыдущего. Определить положение вектора состояния системы в следующий момент времени затруднительно. Если представить вектор состояния системы $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ в многомерном фазовом пространстве состояний, то конкретное значение данного вектора x_i не несет информационной значимости, так как в следующий момент времени эта точка сместится. Таким образом, вектор состояний системы совершает непрерывное хаотическое движение в фазовом пространстве состояний [1, 5, 6].

Сложность заключается так же в том, что для однотипных временных рядов функция распределения случайной величины параметров сложных динамических систем, вероятно, будет различна. Обязательным условием детерминистско-стохастического подхода является неоднократное воспроизведение начального состояния системы x в момент времени t_0 , наличие возможности стационарных режимов и точек покоя. С точки зрения детерминистского подхода, многократное повторение процесса обеспечивает идентификацию модели динамической системы в фазовом пространстве состояний, а в стохастическом подходе – статистической функции распределения. Но возможность получения функции распределения для ди-

намики поведения любой стохастической системы не снимает проблемы определенности конечного состояния динамических систем в фазовом пространстве состояний [1, 5, 6].

Для построения математической модели процесса необходимо определить, какой подход использовать: детерминистско-стохастический или хаотический. Для этого проводятся исследования поведения параметров сложных динамических систем, которые эти процессы описывают [3]. К таким исследованиям относится анализ временных рядов [4]. Используя представление о характеристике объекта исследования, математическую модель можно построить, имея данные, характеризующие один объект, взяв их в качестве ряда последовательных моментов времени. При этом будем понимать, что на временной ряд оказывают влияние составляющие: формирующие тенденцию ряда (возрастающая тенденция), циклические колебания ряда (сезонные) и случайные компоненты (хаотичность) [3].

Целью данной работы является выявление корреляционной зависимости между уровнями временных рядов двух сложных динамических систем; построение автокорреляционной функции, которая характеризует структуру временного ряда, а также правильно подобрать тип функции распределения, которая теоретически опишет объект исследования.

Объект и методы исследования

Объектом настоящего исследования являются параметры состояния сложных динамических систем, на примере, биомедицинской системы (параметр сердечно-сосудистой системы – кардиоритм), а также газовая котельная установка нефтегазодобывающего комплекса (показатель датчика сетевой воды) [3, 9].

Кардиоинтервалы сердечно-сосудистой системы показывают ритм работы сердца [1, 2]. Данные кардиоритма были получены с помощью пульсоксиметра ЭЛОКС-01 М, регистрирующего пульсовую волну с одного из пальцев испытуемого в положении сидя.

Основным параметром котельной установки нефтегазодобывающего комплекса выступил показатель датчика сетевой воды [9].

На рис. 1, 2 представлены примеры сигнала кардиоритма, а так же показателя сигнала датчика сетевой воды.

В процессе исследований было выяснено, что при наличии основных компонентов временного ряда, значения каждого последующего уровня ряда зависят от предыдущих значений, полученных в эксперименте. Корреляционную зависимость между последовательными уровнями временного ряда рассчитывали с помощью коэффициента автокорреляции уровней ряда. Коэффициент автокорреляции показывает тесноту связи текущего и предыдущего уровней ряда и варьируется в диапазоне от -1 до 1. Чем ближе значение к -1 или 1, тем связь более сильная. Чем ближе к 0, тем связь слабее.

$$r_{x_1 x_2} = \frac{\sum (x_1 - \bar{x}_1) * (x_2 - \bar{x}_2)}{\sqrt{\sum (x_1 - \bar{x}_1)^2 * \sum (x_2 - \bar{x}_2)^2}} \quad (1)$$

где x_1 – значение временного ряда;

x_2 – значение сдвинутого временного ряда;

$\bar{x}_1$ и $\bar{x}_2$ – среднее значение временных рядов.

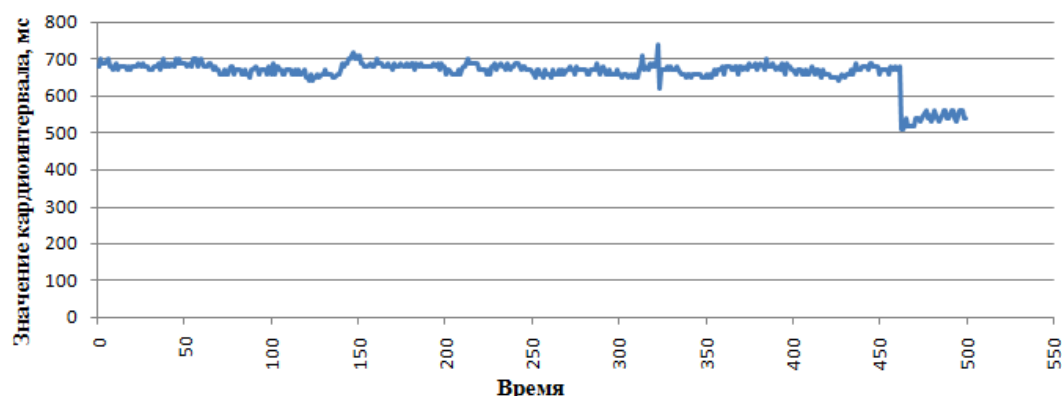


Рис. 1. Пример сигнала кардиоритма

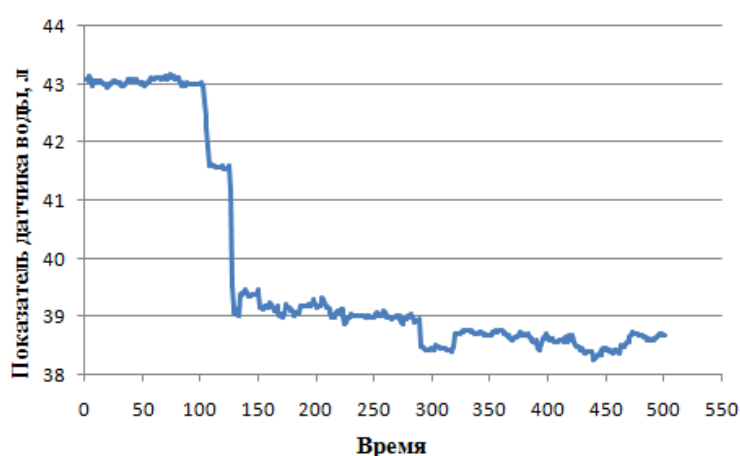


Рис. 2. Пример показателя сигнала датчика сетевой воды

Число периодов, по которым рассчитывается коэффициент автокорреляции, называется лагом (τ). С увеличением лага число пар значений, параметров уменьшается. Для обеспечения статистической достоверности коэффициентов автокорреляции было принято использование правила «максимальный лаг не должен превышать $n/4$ » [8]. Количество сдвигов временных рядов в данной работе составило 50 ($\tau = 50$). Общее количество точек данных для каждого ряда составило 500 ($n = 500$). Результаты расчета коэффициента автокорреляции данных кардиоритма, а так же данных показателя счетчика сетевой воды, и соответствующие этим данным лаги представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значение коэффициента корреляции временных рядов

Значение коэффициента корреляции для временного ряда биомедицинской системы				Значение коэффициента корреляции для временного ряда для технической системы			
№ лага, τ	Коэффициент корреляции, r	№ лага, τ	Коэффициент корреляции, r	№ лага, τ	Коэффициент корреляции, r	№ лага, τ	Коэффициент корреляции, r
1	0,91	65	0,04	1	0,99	65	0,48
5	0,80	70	0,03	5	0,97	70	0,44
10	0,65	75	0,00	10	0,94	75	0,39
15	0,54	80	-0,01	15	0,91	80	0,35
20	0,41	85	-0,03	20	0,88	85	0,31
25	0,28	90	-0,04	25	0,84	90	0,26
30	0,18	95	-0,05	30	0,79	95	0,22
35	0,09	100	-0,06	35	0,75	100	0,17

Окончание табл. 1

Значение коэффициента корреляции для временного ряда биомедицинской системы				Значение коэффициента корреляции для временного ряда для технической системы			
№ лага, τ	Коэффициент корреляции, r	№ лага, τ	Коэффициент корреляции, r	№ лага, τ	Коэффициент корреляции, r	№ лага, τ	Коэффициент корреляции, r
40	0,03	105	-0,05	40	0,71	105	0,13
45	0,04	110	-0,05	45	0,66	110	0,10
50	0,05	115	-0,01	50	0,63	115	0,07
55	0,05	120	0,02	55	0,58	120	0,04
60	0,04	125	0,04	60	0,53	125	0,01

Как видно из табл. 1, для данных биомедицинской системы, с увеличением лага значение коэффициента корреляции существенно уменьшается, что говорит о слабой связи между данными временного ряда, т. е. о наличии случайной компоненты. Во временном ряде при лаге $\tau = 1 \dots 10$ прослеживается высокая корреляция $r = 0,6$, что говорит о наличии тенденции. Так же с увеличением величины лага, увеличивается количество отрицательных значений. Одним из свойств коэффициента автокорреляции является то, что по его знаку невозможно определить наличие возрастающей или убывающей тенденции в уровнях временного ряда. Для данных временных рядов характерно нелинейное поведение, так как значения автокорреляции первого и последующего уровней отличаются относительно друг от друга.

Для данных технической системы можно заметить, что с увеличением уровня лага уменьшается коэффициент корреляции, но не так существенно, как для биомедицинских данных. Во временном ряде при лаге $\tau = 1 \dots 50$ прослеживается высокая корреляция $r = 0,6$, что говорит о наличии тенденции, следовательно, что связь между временными рядами сильная.

Далее был проведен анализ автокорреляционной функции и коррелограммы позволяющей определить лаг, при котором автокорреляция определяется как высокая либо слабая, и, следовательно, связь между текущим и последующим уровнями ряда более или менее тесная. То есть при помощи коррелограммы можно выявить линейность или хаотичность в наборе данных [2, 3].

На рис. 2 а, б представлены примеры коррелограмм для данных биомедицинской и технической системы.

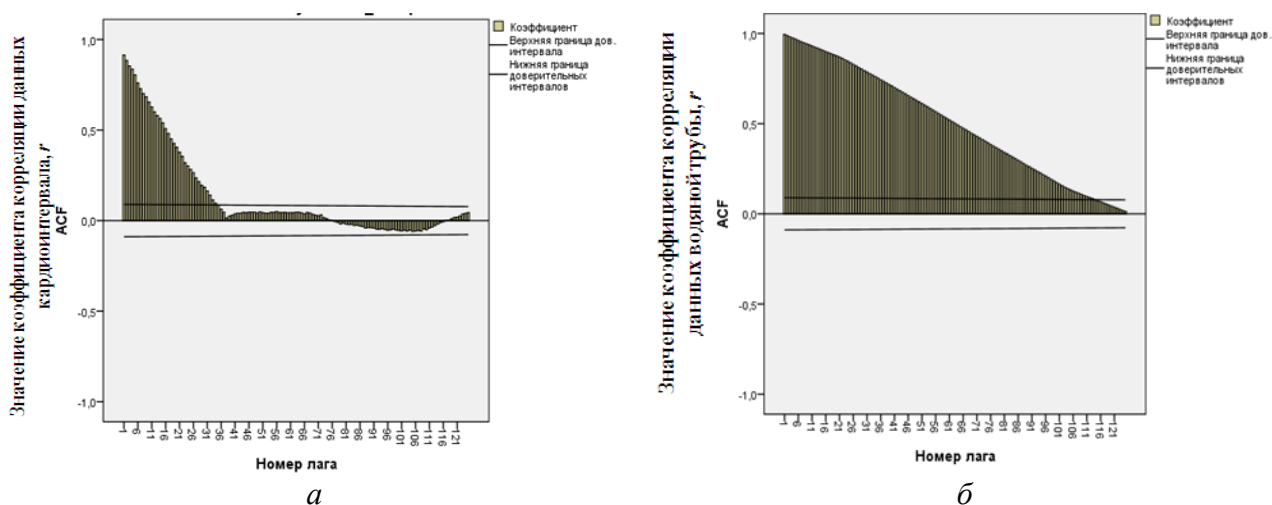


Рис. 2. Коррелограмма «Расчет коэффициента корреляции от величины лага данных»: а – биомедицинской системы; б – технической системы

На рис. 2а привалируют значения коэффициентов автокорреляции близкие к нулю, что говорит о хаотичности процесса для данного временного ряда биомедицинской системы, в

отличии от коррелограммы технической системы (рис. 2б), где временному ряду характерно линейное поведение.

На рис. 3а, б представлены примеры графиков аналитических функций и трендовых составляющих временных рядов биомедицинской и технической системы.

Для анализа тенденции временного ряда были получены математические модели в виде полиномиальных функций, характеризующих зависимость уровней ряда от величины лага. Адекватность моделей проверялась с помощью коэффициента детерминации R^2 . Чем ближе значение коэффициента R^2 к 1, тем менее различаются экспериментальная и аналитическая функции [7, 10]. В табл. 2 представлены результаты аппроксимации автокорреляционной функции для временных рядов биомедицинской и технической системы, а также выявлены трендовые составляющие.

Таблица 2

Результаты аппроксимации автокорреляционной функции временных рядов

№	Название системы	Тип тренда	Уравнение	R^2
1	Биомедицинская	Полиномиальный	$y = -0,0203x + 0,7887$	$R_1^2 = 0,92$
2	Техническая	Линейная	$y = -0,0084x + 1,0326$	$R_2^2 = 0,98$

Как видно из табл. 2 для обоих временных рядов характерен высокий коэффициент детерминации R^2 , как для данных биомедицинской, так и для данных технической системы ($R_1^2 = 0,98$, $R_2^2 = 0,98$). Однако, для биомедицинской системы характерен полиномиальный тип тренда, в отличие от технической системы. На рис. 3а, б представлены примеры графиков аналитических функций и трендовых составляющих временных рядов биомедицинской и технической системы.

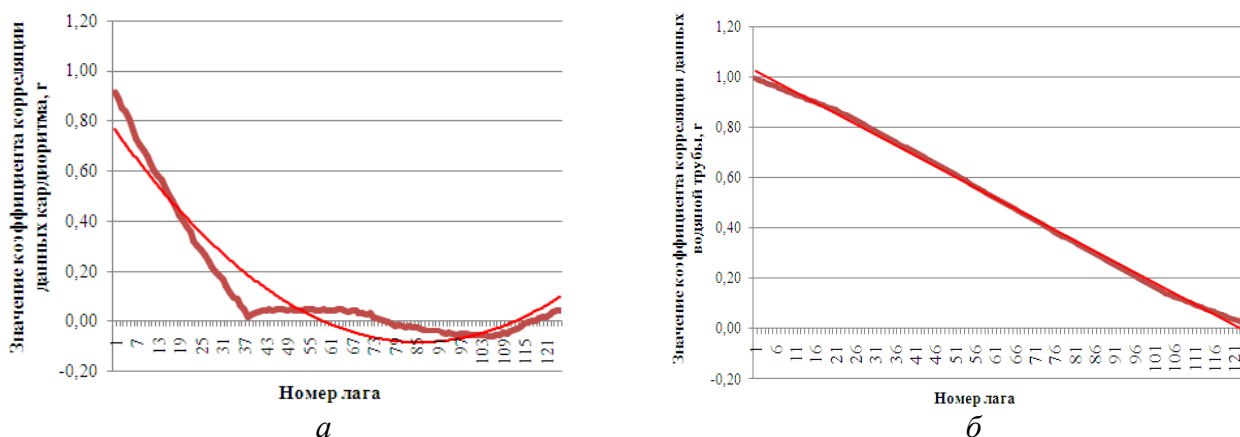


Рис. 3. Результаты аппроксимации автокорреляционной функции временного ряда систем:
а – биомедицинской; б – технической

Таким образом, хаотический процесс, представленный временным рядом биомедицинской системы, может быть описан только полиномиальными функциями, а линейный процесс, на примере данных технической системы, может быть описан линейной функцией.

Вывод

Таким образом, в результате проведенных нами исследований было выявлено, что в зависимости от поведения временного ряда сложной динамической системы, возможно более грамотно подобрать математический аппарат для построения математических моделей процессов любой природы. Так, например, биомедицинские системы, характеризующие хаотический процесс, не могут исследоваться методами детерминистской-стохастического подхода в отличие от сложных технических систем.

Литература

1. Бетелин В. Б., Еськов В. М., Галкин В. А., Гавриленко Т. В. Стохастическая неустойчивость в динамике поведения сложных гомеостатических систем // Доклады академии наук. 2017. Т. 472. № 6. С. 642–644.
2. Григоренко В. В., Еськов В. М. Стохастический подход в анализе систем с хаотической динамикой на примере параметров сердечно-сосудистой системы // Мат-лы VI всерос. симпозиума с междунар. участием, посвященного 85-летию образования Удмурт. гос. ун-та. Ижевск, 2016. С. 111–115.
3. Григоренко В. В., Еськов В. М. Анализ временных рядов в исследовании процессов хаотической динамики // Естественные и технические науки. 2016. № 6 (96). С. 130–133.
4. Елисеева И. И. Эконометрика : учеб. СПб. : Финансы и статистика, 2003. 344 с.
5. Еськов В. М., Зинченко Ю. П., Филатов М. А., Еськов В. В. Эффект Еськова – Зинченко опровергает представления I. R. Prigogine, J A Wheeler и M. Gell-Mann о детерминированном хаосе биосистем – complexity // Вестник новых медицинских технологий. 2016. Т. 23. № 2. С. 34–43.
6. Еськов В. М., Хадарцев А. А., Козлова В. В., Филатов М. А. и др. Системный анализ, управление и обработка информации в биологии и медицине // Системный синтез параметров функций организма жителей Югры на базе нейрокомпьютинга и теории хаос-самоорганизации в биофизике сложных систем. Т. XI. Самара : Офорт, 2014. 192 с.
7. Заикин П. В., Погореловский М. А., Микшина В. С. Аппроксимация эмпирических функций полиномами высших порядков // Вестн. кибернетики. 2015. № 4 (20). С. 129–134.
8. Канторович Г. Г. Анализ временных рядов. // Экономический журнал ВШЭ. 2002. № 1. С. 85–116.
9. Максимюк Е. В., Микшина В. С. Математическое моделирование для поддержки принятия решений в области обеспечения энергетической эффективности // Качество. Инновации. Образование. 2014. № 8 (111). С. 54–63.
10. Погореловский М. А., Микшина В. С., Назина Н. Б., Заикин П. В. Агрегирование состава многокомпонентной смеси в математическом моделировании сложных динамических процессов // Север России: стратегии и перспективы развития : материалы III Всерос. науч.-практ. конф. Сургут, 2017. С. 127–133.

УДК 332.122.62

РАЗРАБОТКА КЛАССИФИКАТОРА ТРАЕКТОРИЙ РЕГИОНАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ НА ОСНОВЕ РЕСУРСНОЙ МОДЕЛИ

В. П. Новиков, В. Р. Цибульский

*Тюменский научный центр СО РАН, Институт проблем освоения Севера,
Viktor.P.Novikov@yandex.ru, v-tsib@yandex.ru*

В статье рассматривается построение траектории развития региона и разработка их классификатора. Авторами, в качестве основы метода, была предложена ресурсная модель, представляющая собой дополненную модель расширяющейся экономики Джона фон Неймана, построенная для пяти подсистем, выделенных по функциональному различию: экономической, социальной, инфраструктурной, природного ресурса и внешней. Предложен метод построения региональных траекторий развития и возможные подходы к выделению классов для таких траекторий, основанные на магистральных траекториях. Указана возможность сопоставления реально действующей региональной траектории и документально заданной.

Ключевые слова: регион, математическая модель, траектория развития, классификатор.

WORKING OF TRAJECTORIES CLASSIFIER OF REGIONAL DEVELOPMENT BASED ON RESOURCE MODEL

V. P. Novikov, V. R. Tsibulsky

*Tyumen Scientific Centre SB RAS, Institute of the problems of Northern development,
Viktor.P.Novikov@yandex.ru, v-tsib@yandex.ru*

The article considers a construction of regional development trajectories and working of their classifier. The authors have proposed a resource model supplemented by the J. von Neumann model of expanding economy that is built for five subsystems selected by functional differences: economic, social, infrastructural, natural resources and external. The method of constructing regional development trajectories and possible approaches to class structuring for these trajectories, based on magistral trajectories, was proposed. The authors have defined the possibility of comparing an in-place regional trajectory and a documented one.

Keywords: region, mathematical model, development trajectory, classifier.

Устойчивое развитие – цель современного регионального управления. Для ее реализации регионы приняли и реализуют стратегии, разработанные согласно федеральному закону от 28 июня 2014 г. № 172-ФЗ «О стратегическом планировании в Российской Федерации». В своих предыдущих работах [1, 2] мы указывали на то, что система мониторинга присутствующая как в данном законе, так и в региональных документах может быть недостаточно эффективной. Так же следует отметить, что проблема соответствия документов стратегического планирования и реального развития носит актуальный характер и рассматривалась в разное время в работах многих авторов: Б. С. Жихаревич, Н. Б. Жунда, О. В. Русецкая [3]. Однако, более объективным и наглядным с точки зрения достижимости цели развития видится анализ траекторий регионального развития. Вопросу построения корректной и всеобъемлющей модели и траектории развития региона следует уделить большее внимание.

Регион – сложная, динамическая система. В рамках поставленной задачи, примем что регион, является закрытой системой, причем ресурсы региона генерируются и потребляются как внутри его подсистем, так и извне за счет включения внешней подсистемы. Проведем

декомпозицию системы на подсистемы, основываясь на функциональных различиях (подобно Х. Босселю [4]), определимся с ресурсами, соответствующими каждой подсистеме, и ключевыми показателями, описывающими выбранные ресурсы:

Экономическая подсистема – представляет собой совокупность производственных сил региона, включая средства производства, и другие производственные отношения. Выделенной подсистеме, в качестве ресурса, будут соответствовать основные производственные фонды (ОПФ), так как именно они представляют собой ресурс – средства труда, используемые в производстве. Также стоит учитывать то, что ОПФ изнашиваются, требуют обновления и переносят свою стоимость на производимые товары, таким образом характеризуя производственные процессы. В качестве показателя, описывающего состояние ОПФ используем их стоимость.

Социальная подсистема – осуществляет воспроизводство человеческого капитала, удовлетворения материальных, социальных и духовных потребностей. В региональной системе данная подсистема поставляет трудовой ресурс, т. е. ту часть населения региона, которая имеет возможность заниматься трудовой деятельностью и характеризовать его будет численность рабочей силы региона.

Инфраструктурная подсистема – создает и регулирует условия для функционирования иных подсистем, обмена и распределения ресурсов как внутри, так и между подсистемами. Включает в себя как и средства физического перемещения иных ресурсов (авто- и ж/д дороги, трубопроводы и др.), так и средства передачи информации, т. е. ресурсом данной подсистемы будут выступать имеющиеся в регионе коммуникации. В качестве показателя выделим их суммарную стоимость.

Подсистема природного ресурса – включает в себя состояния и запасы возобновимых и невозобновимых природных ресурсов региона. Непосредственно данные ресурсы перерабатываются различными подсистемами для получения конечного продукта или услуги. В качестве характеризующего показателя воспользуемся оценочным совокупным объемом природных ресурсов региона.

Внешняя подсистема – представляет собой источник финансирования различных региональных проектов развития в иных подсистемах, осуществляя, таким образом, управление. Включает в себя как региональные, так и федеральные источники. Поставляет для региональных подсистем ресурсы для реализации программ развития исходя из сформированных фондов развития, включающих в себя как внутрирегиональные, так и внешние источники. Показатель, характеризующий предоставляемый ресурс – совокупные инвестиции в регион.

Выбранные выше подсистемы ресурсы и ключевые показатели, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Ресурсы и ключевые показатели по подсистемам

Подсистема	Ресурс	Показатель
Экономическая	Основные производственные фонды	Стоимость основных фондов, млн. руб.
Социальная	Трудовой ресурс	Численность рабочей силы, тыс. человек
Инфраструктурная	Основные коммуникации	Суммарная стоимость коммуникаций, млн руб.
Природного ресурса	Запасы минеральных и биологических ресурсов	Оценочный совокупный объем природных ресурсов, млн руб.
Внешняя	Фонды развития (как внутренние, так и внешние)	Инвестиции в регион, млн руб.

Для выделенных подсистем математическая модель региона представляет собой сочетание ресурсной модели и модели «Затраты – Выпуск» и состоит, при этом из ячеек, соответствующих подсистемам региона. Причем модель «Затраты – Выпуск» – магистральная или, другими словами, подобна модели расширяющейся экономики Дж. фон Неймана. Ресурсные модели в региональном анализе применялись и ранее. Так В. В. Гурман, В. Е. Викулов, Е. В. Да-

нилина [5] применили ресурсный подход для моделирования Байкальского региона. Полученные ими результаты позволили составить несколько сценариев регионального развития и выбрать оптимальный. А. Г. Гранберг, В. И. Суслов и С. А. Суспицын [6] использовали межрегиональные отраслевые ресурсные модели для анализа много-региональных систем, выделяя вопросы пространственного развития, анализа межрегиональных экономических взаимодействий и выявление эффективных региональных коалиций. Использование ресурсов различных подсистем, в качестве ключевых показателей, так же достаточно распространено. Например, В. А. Крюков, А. Е. Севастьянова, А. Н. Токарев, В. В. Шмат [7] выделяют следующие виды капитала, необходимые для устойчивого регионального развития: природный, физический и человеческий. Однако в данной работе мы применяем ресурсный подход для анализа уже имеющихся данных, а не для решения обозначенных выше вопросов.

Рассмотрим детальнее возможность построения региональной модели развития на базе подхода Дж. фон Неймана к сбалансированному росту и «замкнутым» моделям многоотраслевого (n -продуктового) выпуска. Стратегия развития региона предполагает возможность применения этой модели (см. Х. Боссель [4]). Ограничения, характерные для нее, можно успешно применить к региону в целом: линейность, возможность получения результата (продукта) различными технологиями (путями), постоянство душевого потребления рабочей силы, отсутствие дефицита в цепочках производства, результат (продукт) предыдущего периода используется в последующем и др. Как правило подобные ограничения закладываются и в стратегиях развития региона: показатели подсчитываются статистикой, базируясь на линейных соотношениях, результаты развития, как правило, рассматриваются за промежуток руководства регионом одним губернатором и запланированными им целями. За этот промежуток 5–10 лет изменения потребления и занятости экономический активный населения частично определены. Бюджет формируется и корректируется на основе достигнутых результатов по эффективному его использованию.

Пусть x_{ij} – количество ресурса в i -ой подсистеме от j -ого источника поступления этого ресурса. Выпуск каждой подсистемы будет представлять собой ресурсный эффект [8] $y_i = f(x_{ij})$ и $Y_{\text{рег}} = \sum_{i=1}^n y_i$. Примем, что система будет находиться в состоянии равновесия, если $Y_{\text{рег}} \rightarrow \max$ при $y_{\text{к.п.}} \rightarrow \max$. Примем также, что система и модель «Затраты – Выпуск» замкнута, т. е. одна из подсистем, в нашем случае «внешняя» полностью потребляет весь «выпуск», используя его на развитие всей системы. Причем инвестиции, направленные на развитие, поступающие от федеральных и частных фондов будут ее выпуском. Если обозначить значимость ресурса каждой i -ой подсистемы для выпуска и развития через λ_{ij} , то модель для выбранных n -подсистем будет представлять собой:

$$\begin{cases} y_3 = \lambda_{11}x_3 + \lambda_{12}x_{\text{соц}} + \lambda_{13}x_{\text{инф}} + \lambda_{14}x_{\text{пр}} + \lambda_{15}x_{\text{внеш}} \\ y_{\text{соц}} = \lambda_{21}x_3 + \lambda_{22}x_{\text{соц}} + \lambda_{23}x_{\text{инф}} + \lambda_{24}x_{\text{пр}} + \lambda_{25}x_{\text{внеш}} \\ y_{\text{инф}} = \lambda_{31}x_3 + \lambda_{32}x_{\text{соц}} + \lambda_{33}x_{\text{инф}} + \lambda_{34}x_{\text{пр}} + \lambda_{35}x_{\text{внеш}} \\ y_{\text{пр}} = \lambda_{41}x_3 + \lambda_{42}x_{\text{соц}} + \lambda_{43}x_{\text{инф}} + \lambda_{44}x_{\text{пр}} + \lambda_{45}x_{\text{внеш}} \\ y_{\text{внеш}} = \lambda_{51}x_3 + \lambda_{52}x_{\text{соц}} + \lambda_{53}x_{\text{инф}} + \lambda_{54}x_{\text{пр}} + \lambda_{55}x_{\text{внеш}} \end{cases} \quad (1)$$

или в матричной форме:

$$Y = \lambda * X(t). \quad (2)$$

Как было сказано выше, ресурсы, используемые подсистемой региона в момент времени t полностью тратятся на получение ресурса соответствующей подсистемы в момент времени $t + 1$, уравнение для i -ой подсистемы из системы уравнений (1) можно представить в виде:

$$x_i(t + 1) = \lambda_{i1} * x_1(t) + \lambda_{i2} * x_2(t) + \dots + \lambda_{ij} * x_j(t),$$

или в матричной форме

$$X_{t+1} = \lambda * X_t. \quad (3)$$

Поскольку при распознавании траектории развития необходимо учитывать принятую в регионе стратегию, то ресурс каждой подсистемы должен отвечать и быть ключевым показателем развития подсистемы. Кроме того, в стратегии, как правило, обозначается цель развития региона, как достижение максимума или заданного темпа роста по одному из ключевых показателей. Обозначим его как x_i^n . В этом случае $y_i^n(x) = \max_{x_{ij}} \sum_{ij} y_i^n(x_i)$.

Таким образом i -подсистем на основе j -ресурсов (затрат) получают эти необходимые y_i ресурсы. Предполагается, что каждая подсистема производит необходимое количество этих ресурсов в промежутки времени $[t-1, t]$ для успешного их использования в промежутки $[t, t+1]$, по принятой стратегии s . В таком случае, $X = (x_1, \dots, x_i, \dots, x_S)^S$ – вектор затрат, $Y = (y_1, \dots, y_i, \dots, y_S)^S$ – вектор результатов (ключевых показателей подсистемы) достигнутых в результате стратегических инициатив (у Дж. фон Неймана – технологий [9]).

Матрица затрат, построенная пошагово во времени $\{X(t)\}_{t=0}^S$:

$$\begin{aligned} X(t+1) &= \lambda * X(t) \text{ при } t = 0, 1, 2, \dots; \lambda = \text{const}, \\ Y(t+1) &= \lambda * Y(t) \end{aligned}$$

и есть траектория развития региональной комплексной системы, лежащая в «стратегическом» множестве S и $(x, y) \in S$, при этом, учитывая сказанное для (3), достаточно рассматривать равенство, связанное либо с затратами, либо с выпусками. В этом случае матрица λ определяет достигаемость заданных ключевых показателей.

По аналогии с [8] введем ограничения, накладываемые на «стратегическое» множество S :

1. Пусть множество вариантов стратегий S является замкнутым выпуклым конусом в пространстве $R_+^n \times R_+^n$, где R_+^n – неотрицательный ортант пространства R^n , причем выпуклость множества обеспечено замкнутостью рассматриваемой модели. Следовательно, следующие утверждения будут справедливы:

- а) $X + Y \in S$ при любых $X, Y \in S$;
- б) $\lambda X \in S$ при любом $X \in S$ и $\lambda \geq 0$.

2. Из $(0, Y) \in S$ следует, что $Y = 0$. Это ограничение описывает невозможность развития региональных подсистем без необходимых затрат.

3. Для каждого неотрицательного вектора X , существует по крайней мере один вектор Y , такой что $(X, Y) \in S$.

4. «Необратимость процессов» – если существует некоторая стратегия развития, то обратная стратегия, при которой производятся те ресурсы, которые затрачиваются при функционировании данной стратегии – невозможна. То есть X – необратим, если $X \in S$, но $-X \notin S$.

Так же, в заданном множестве S будет существовать и единственная магистральная (целевая) траектория $\{X(t)\}_{t=0}^\infty$, такая что $x_{k.п.}(t+1) = \rho * x_{k.п.}(t), t = 0, 1, \dots; \rho \rightarrow \max$. Где ρ – темп роста. Действительно, существование подобной траектории для экономических систем доказано в [4, 9], а так как принимаемые нами ограничения для модели (1–3) и множества S соответствуют ограничениям для технологического множества и модели «затраты – выпуск», с некоторыми уточнениями касательно особенностей региональных стратегий и выбранных подсистем, то и в рассматриваемом случае магистральная траектория будет существовать и являться единственной.

Для дальнейшего распознавания региональной траектории необходимо идентифицировать коэффициенты λ . Для этого отметим ограничения, накладываемые на коэффициенты λ :

- Из свойств модели «затраты – выпуск» и «стратегического» множества S , все коэффициенты λ – положительны, т. е. $\lambda_{ij} \geq 0$.

- Сумма коэффициентов λ в одном столбце должна быть меньше, либо равна 1, т. е. $\sum_{j=1}^n \lambda_{ij} \leq 1$.

- Ни один из диагональных элементов матрицы λ не должен быть равен 1. В противном случае это означает, что соответствующая подсистема полностью обеспечивает сама себя, что в условиях поставленной задачи невозможно.

Так же, исходя из статистических данных мы имеем возможность установить верхние границы некоторых коэффициентов λ . Рассмотрим инвестиционную подсистему: в ее основе лежит денежный ресурс, используемый на развитие региона и, как следствие, распределяемый между другими подсистемами. Следовательно, верхнюю границу соответствующего коэффициента $\lambda_{инвj}$, мы можем рассчитать, как отношение инвестиций в отдельную подсистему к инвестициям в регион в целом:

$$\lambda_{внешней} = \frac{\text{Инвестиции в подсистему}}{\text{Инвестиции в регион}}$$

Аналогичным образом, используя статистические данные, можно установить и другие коэффициенты λ , однако для упрощения расчетов, остановимся на найденных границах для рассматриваемых коэффициентов.

Ресурсы, соответствующие каждой подсистеме – величины разно размерные и для дальнейшей обработки необходимо привести их к стандартному виду – нормировать и выразить в безразмерных единицах. Для этого будем рассматривать не абсолютные значения показателей, а темпы их роста, взятые как отношение показателя в текущем периоде времени к предыдущему, т. е. будем рассматривать модель (1–3) как модель с потоками. Для дальнейших вычислений и сравнения влияния подсистем нормируем полученные темпы роста, используя линейное преобразование вида, располагая их в итоге на отрезке $[0,1]$:

$$f(x) = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}},$$

где x_{min} и x_{max} – минимальные и максимальные значения показателей по всем подсистемам на рассматриваемом промежутке времени.

Полученные темпы роста и нормированные величины отразим в табл. 2 и 3 соответственно. В качестве примера расчета приведем показатели Тюменской области [10], рассчитанные для периода 2005–2015 гг. (табл. 2–3).

Таблица 2

Темпы роста соответствующих показателей

Наименование подсистем	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Экономическая	1,1957	1,1730	1,2343	1,1024	1,1745	1,1356	1,1659	1,0509	1,1293	1,0754
Социальная	0,9956	1,0402	1,0344	0,9795	0,9974	1,0037	1,0146	0,9866	1,0130	0,9954
Инфраструктурная	1,1309	1,2019	1,2753	1,2107	1,2543	1,0350	0,8140	1,0892	1,1094	1,1135
Природного ресурса	1,1039	0,9408	1,2864	0,9329	0,9991	0,9994	1,0705	1,0659	0,9142	0,9061
Внешняя	1,3422	1,3735	1,3217	0,9332	1,0983	1,2353	1,1222	1,0753	1,1082	1,1078

Таблица 3

Нормированные величины соответствующих показателей

Наименование подсистем	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Экономическая	0,7894	0,6658	1,0000	0,2809	0,6739	0,4616	0,6271	0,0000	0,4277	0,1335
Социальная	0,2651	1,0000	0,9046	0,0000	0,2944	0,3979	0,5783	0,1170	0,5523	0,2611
Инфраструктурная	0,6870	0,8409	1,0000	0,8600	0,9545	0,4791	0,0000	0,5966	0,6404	0,6493
Природного ресурса	0,5201	0,0912	1,0000	0,0705	0,2445	0,2453	0,4323	0,4202	0,0213	0,0000
Внешняя	0,9289	1,0000	0,8824	0,0000	0,3748	0,6860	0,4291	0,3228	0,3974	0,3964

Для идентификации неизвестных коэффициентов λ_{ij} будем решать задачу оптимизации модели (1–3) с учетом описанных выше ограничений, используя генетический алгоритм поиска в среде Matlab. Примем, что на рассматриваемом периоде в 10 лет коэффициенты λ_{ij} не меняют своих значений. Это связано с тем, что, во-первых, в данный период времени управление регионом осуществлял один губернатор (В. В. Якушев), а значит, можно принять тот факт, что ключевые цели управления если и менялись, то незначительно; во-вторых, такой подход позволит упростить демонстрацию метода построения траекторий развития региона, хотя стоит заметить, что в общем случае коэффициенты λ_{ij} имеют динамическую природу.

Используя описанный выше метод идентификации, найдем неизвестные коэффициенты (табл. 4).

Таблица 4

Коэффициенты λ , рассчитанные для Тюменской области

Наименование подсистем	Значение коэффициента				
Экономическая	0,4356	0,3999	0,0527	0,2671	0,1457
Социальная	0,2108	0,0724	0,0871	0,0948	0,2359
Инфраструктурная	0,1324	0,3072	0,0596	0,0683	0,1358
Природного ресурса	0,0749	0,1106	0,4006	0,1072	0,0077
Внешняя	0,1176	0,042	0,0516	0,0763	0,0135

На рассматриваемом промежутке времени определим ключевую подсистему исходя из стратегии развития региона [11]. Для Тюменской области целью развития установлен «рост уровня жизни населения вследствие инновационного социально-ориентированного развития Тюменской области», следовательно, в качестве ключевой подсистемы будем рассматривать социальную, и ее траектория, построенная исходя из полученных коэффициентов λ и известных темпов роста соответствующих ключевых показателей, будет характеризовать развитие региона на рассматриваемом промежутке времени. В целом, региональным властям достаточно часто приходится выбирать между достижением каких-либо значимых целей и экономической эффективностью (например, авторы [12] указывают на выбор, стоящий перед властями Великобритании в 1990-х годах, связанный с ростом социальной напряженности и падением экономической эффективности), поэтому для большинства регионов ключевой подсистемой будет выступать экономическая. В случае статической модели состояние региона будет описываться лучом, построенным в n -мерном пространстве. Для ответа на вопрос совпадения полученного луча с заданным документально решим задачу классификации подобных лучей. При соответствии классов у «реального» и документально заданного лучей можно говорить о соответствиях исполняемой и заданной стратегий в регионе.

Для решения подобной задачи «стратегическое» множество S разделим на k -классов, являющимися подмножествами S_k множества S , т. е. $S_k \subset S$ и $\bigcup_{i=1}^k S_i = S$. При этом, каждое подмножество S_k будет содержать в себе лишь соответствующие лучи, следовательно, подмножества S_k будут представлять собой замкнутые выпуклые конусы с вершиной в нулевой точке. В таком случае метрикой для выделения классов послужат углы «наклона» «высоты» конуса к n -плоскостям, относительно расчетной магистральной траектории. Для примера рассмотрим двумерное пространство ($n = 2$). Введем луч l_m , построенный для известных значений коэффициентов λ и описывающий магистральную траекторию и, разделив неотрицательный ортант (рис. 1) на $k = 3$ случайных подмножеств, классифицируем их в зависимости от значений $\tan \alpha$.

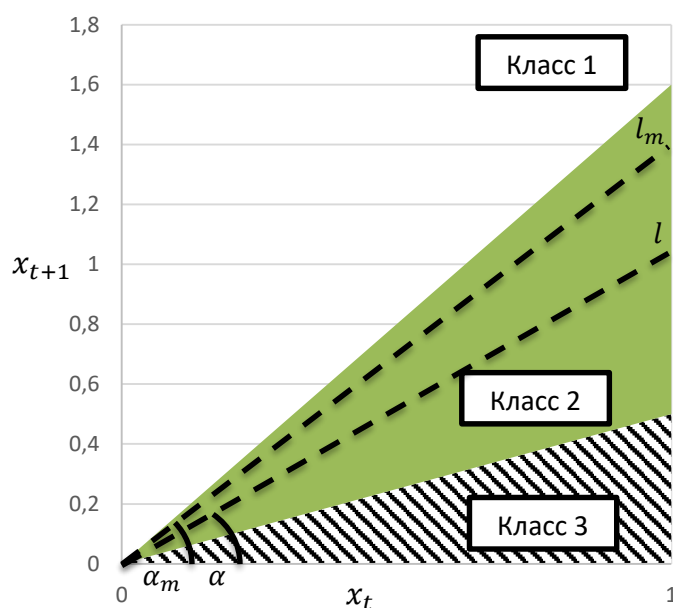


Рис. 1. Пример распределения классов лучей

Исходя из наших предыдущих работ и работ С. В. Койнова [13, 14], можно предложить следующую типологию классов:

- класс, для которого $\text{tg } \alpha_m - \text{tg } \alpha \rightarrow \min$, будет описывать динамику развития, характерную для регионов, развивающихся с темпами, соответствующими стратегическим заданным (в примере, класс 2) – траектория инерционного развития;

- класс, для которого $\text{tg } \alpha_m \gg \text{tg } \alpha$, будет описывать траекторию спада – описывает динамику развития региона, отстающего от магистральных значений (в примере, класс 3) – траектория спада;

- класс, для которого $\text{tg } \alpha_m \ll \text{tg } \alpha$ – описывает динамику развития, характерную для регионов, опережающих заданные нормативные показатели – траектория форсированного роста.

В динамике набор подобных точек будет описывать траекторию, образованную многомерными наблюдениями. Необходимо определить матрицу пространства и классифицировать ее по отношению к этой траектории.

Как было показано выше, в конкретный момент времени, траектории развития соответствует определенный $\tan \alpha$. Так как нам известны значения рассматриваемых показателей лишь в дискретные моменты времени, то в результате расчета мы получим временной ряд, состоящий из расчетных $\tan \alpha$ и характеризующий состояние ключевой подсистемы. Итоговую траекторию (рис. 2) построим как последовательность отложенных друг за другом отрезков, ограниченных временными интервалами $[t, t + 1]$ и соответствующими углами $\tan \alpha$.

При разбиении всего стратегического множества S на $k = 3$ класса, расчетная траектория Тюменской области попадает в один класс с магистральной траекторией, из чего можно сделать выводы о соответствии реализуемой и документально заданной стратегиях. Однако, на представленном рисунке наглядно видно отклонение между траекториями развития и, следовательно, при разбиении множества S на определенное количество классов ($k > 3$), возможным становится вариант пересечения расчетной траекторией границ того или иного класса (рис. 3).

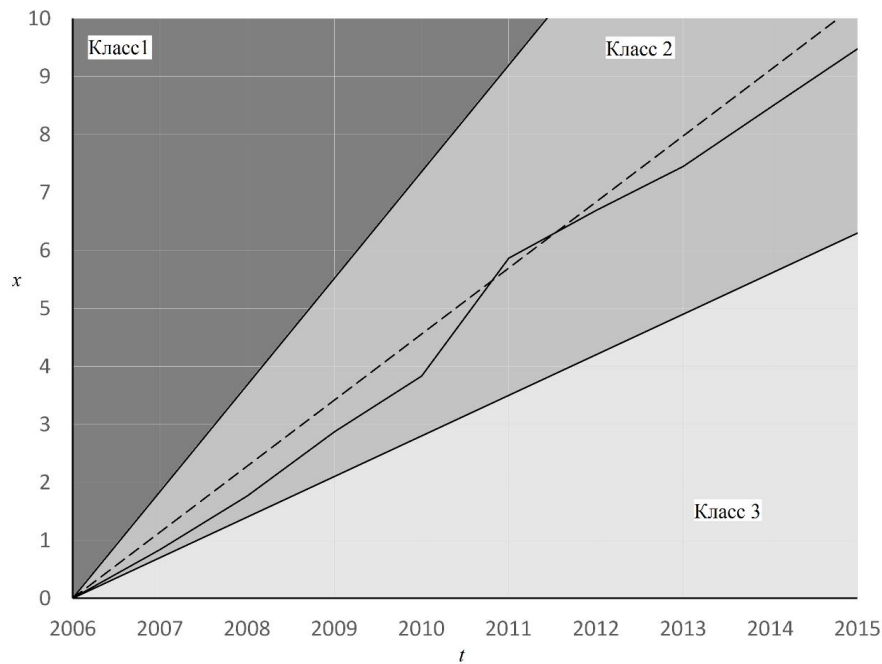


Рис. 2. Траектория развития Тюменской области

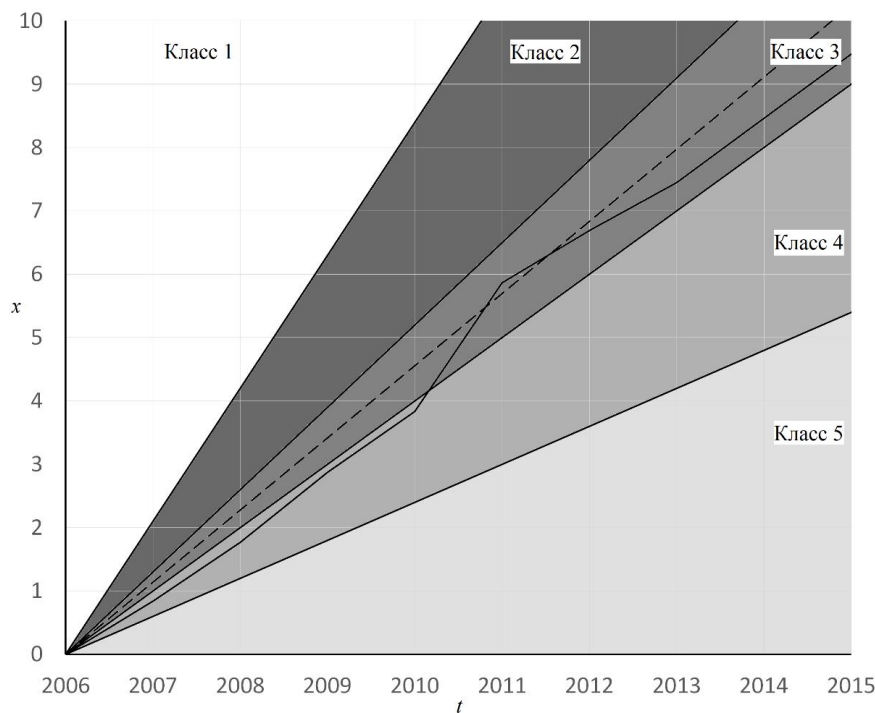


Рис. 3. Возможное распределение классов в стратегическом множестве

В таком случае будем разбивать весь рассматриваемый период времени на n участков, таких что соответствие той или иной части траектории одному из заданных классов становится очевидным. На рис. 3 видно, что, во-первых, разделение всего рассматриваемого периода времени на промежутки, соответствующие каждому году, позволит поставить в соответствие выбранному участку траектории один из заданных классов; во-вторых, в период с 2006 по 2010 гг., расчетная траектория региона соответствовала четвертому классу, однако с 2010 г. класс траектории сменился на третий и, так как, на всем рассматриваемом промежутке времени траектория в большей степени соответствовала классу 3, то мы можем присвоить этот класс всей траектории. Однако, нами рассматривается динамика регионального развития и подобный переход региональной траектории из одного класса в другой так же может

свидетельствовать (в данном случае) о качественных изменениях в реально действующей стратегии, которые привели к положительной динамике развития региона.

Несомненно, вопрос корректного разбиения всего стратегического множества на классы требует дальнейшего изучения, однако уже сейчас можно сказать что предложенный нами метод построения траекторий развития региона и распознавания реально действующих стратегий позволит оценивать динамику развития региона и послужит эффективной системой мониторинга реализации региональных стратегий и принятию своевременных мер по их изменению.

Литература

1. Новиков В. П. Классификация стратегий развития экономики Российской Федерации. Стратегическое планирование в регионах и городах России: выстраивая систему // Доклады участников XII Общерос. форума лидеров стратегического планирования. Санкт-Петербург. 21–23 октября 2013 / под ред. Б. С. Жихаревича. СПб. : Леонтьевский центр, 2014. 140 с.
2. Новиков В. П. Идентификация скрытых стратегий: постановка вопроса, обзор научных школ // Вестн. кибернетики. 2014. № 2 (14). С. 42–47.
3. Жихаревич Б. С., Жунда Н. Б., Русецкая О. В. Заявленные и реальные приоритеты региональных и местных властей: подход к выявлению и сопоставлению // Регион: экономика и социология. 2013. № 2 (78). С. 108–132.
4. Боссель Х. Показатели устойчивого развития: теория, метод, практическое использование. Отчет, представленный на рассмотрение Балатонской группы : пер. с англ. Тюмень : ИСПО СО РАН, 2001. 123 с.
5. Викулов В. Е., Гурман В. И., Данилина Е. В. и др. Эколого-экономическая стратегия развития региона: математическое моделирование и системный анализ на примере Байкальского региона. Новосибирск : Наука, 1990. 184 с.
6. Гранберг А. Г., Суслов В. И., Суспицын С. А. Экономико-математические исследования многорегиональных систем // Регион: экономика и социология. 2008. № 2. С. 120–150.
7. Крюков В. А., Севастьянова А. Е., Токарев А. Н., Шмат В. В. Труды Гранберговской конференции // Междунар. конф. Пространственный анализ социально-экономических систем: история и современность : сб. докладов. 10–13 октября 2016. Новосибирск : ИЭОПП СО РАН, 2017. 526 с.
8. Опойцев В. И. Нелинейная системостатика. М. : Наука, 1986. 246 с.
9. Никайдо Х. Выпуклые структуры и математическая экономика / пер. с англ. А. В. Малишевский. М. : Мир, 1972. 519 с.
10. Регионы России. Социально-экономические показатели [Электронный ресурс]. URL: http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/publications/catalog/doc_1138623506156 (дата обращения: 10.11.2017).
11. Концепция долгосрочного социально-экономического развития Тюменской области до 2020 года и на перспективу до 2030 года. [Электронный ресурс]. URL: https://admtyumen.ru/files/upload/OIV/D_Economy/Документы/Концепция.pdf (дата обращения: 10.11.2017).
12. Armstrong H., Taylor J. Regional economics and policy : 3rd ed. Oxford : Blackwell Publishers, 2000. 448 p.
13. Новиков В. П., Цибульский В. Р. Идентификация стратегий развития региона на базе индекса локализации // Вестн. кибернетики. 2014. № 1 (13). С. 69–75.
14. Койнов С. В. Скрытые стратегии: обзор научных школ, классификация и проблематика // Вестн. кибернетики. 2011. № 10. С. 73–77.

УДК 621.396.42:004.032.26

НЕЙРОСЕТЕВАЯ СИСТЕМА ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ С ВЗАИМОЗАВИСИМОЙ АДАПТАЦИЕЙ КОМПОНЕНТ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ РАДИОСВЯЗИ

С. О. Старков¹, Ю. Н. Лавренков²

¹ Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ, sergeystarkov56@mail.ru

² Калужский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана, georglawr@yandex.ru

В статье рассмотрен вопрос модификации системы обмена информацией, базирующейся на одном из методов расширения спектра передаваемого сигнала – алгоритме скачкообразной перестройки рабочей частоты. Анализ развития систем передачи информации показывает, что основная тенденция изменений на уровне обработки и передачи информации заключается в качественном усложнении физической организации для реализации возможностей новых способов адаптивной обработки сигналов. Для повышения защищенности передаваемой информации предлагается применение клеточной нейронной сети с гистерезисом для выполнения анализа состояния доступных частотных каналов. Результаты функционирования нейронной сети делают возможным сформировать прогноз о возможной загруженности каждого из доступных каналов радиосвязи и вероятности постановки помех в момент передачи информации на определенной несущей частоте. Эти сведения позволяют выполнить коррекцию работы генератора псевдослучайной последовательности, производящего последовательность частотного разбиения доступного беспроводного канала связи. Для повышения эффективности функционирования клеточной нейронной сети связи между нейронными элементами предлагается выполнить в виде адаптивных нейристорных линий, выполняющих обработку сигналов, передаваемых между нейронами. Нейросетевая система получает возможность производить обработку информации не только в нейронах с гистерезисом, но и в пространстве между нейронными элементами, что дает возможность модифицировать поведение нейронной сети в зависимости от динамики распространения сигналов между ее элементами. Далее рассмотрен вопрос о настройке переменных параметров спроектированной комплексной нейронной структуры с помощью модифицированного алгоритма диффузионного итерационного поиска. Применение подобной стратегии оптимизации приводит к формированию метаэвристики, которая способна успешно выполнить настройку и обучение нейросетевого комплекса. Проверка способности сети предсказывать частотные интервалы с минимальным уровнем помех показала, что клеточная сеть способна выполнять перестройку рабочей частоты с учетом особенностей возникновения фоновых шумов и постановки радиопомех в доступных частотных каналах связи.

Ключевые слова: клеточная нейронная сеть, алгоритм итерационного поиска, скачкообразная перестройка частоты, нейристорная линия.

**NEURAL SIGNAL PROCESSING SYSTEMS WITH INTERDEPENDENT
ADAPTATION OF COMPONENTS FOR NOISE IMMUNITY ENHANCEMENT
OF RADIO COMMUNICATION SYSTEM**

S. O. Starkov ¹, Yu. N. Lavrenkov ²

¹ *Obninsk Nuclear Energy Institute,*

National Research Nuclear University MEPhI, sergeystarkov56@mail.ru

² *Bauman Moscow State Technical University, Kaluga site, georglawr@yandex.ru*

The article considers a data transmission system upgrade. It is based on one of the spectrum extension methods of transmitted signal that is the frequency-hopping spread spectrum. Analysis of the data transmission systems development shows that the main trend of changes at a level of data processing and transmission is the qualitative complication of physical organization for realization of new methods of adaptive signal processing. The use of a cellular neural network with hysteresis to perform state analysis of available frequency channels is proposed to increase the security of transmitted information. The results of neural network functioning allow predicting possible occupancy of each available radio channel and the probability of jamming at the moment of information transfer at a certain carrier frequency. This information allows adjusting the pseudo-random sequence generator operation generating the frequency partitioning sequence of available wireless communication channel. The performance in the form of adaptive neuristor lines that process signals transmitted between neurons is proposed to increase efficiency of the cellular neural network functioning communication between neural elements. The neural network system is able to process information not only in neurons with hysteresis, but also in the space between neural elements, which allows modifying the behavior of a neural network depending on the dynamics of signal propagation between its elements. Further the issue of variable parameters control of the designed complex neural structure by means of the modified algorithm of diffusive iterative search is considered. Application of similar optimization strategy leads to formation of metaheuristics which is capable to perform successfully tuning and training of a neural network complex. Check of network ability to predict frequency intervals with the minimal interference has shown that the cellular network is capable of performing reorganization of working frequency with account for features of background noise occurrence and jamming support in available frequency channels.

Keywords: cellular neural network, iterative search, frequency hopping, neuristor line.

Введение

Цель передачи различного рода коммуникационных сообщений – установление связи между объектами, находящимися на определенном удалении друг от друга. Передача информации на значительные расстояния по радиоканалам связана с возникновением ряда проблем, в особенности с преодолением созданных преднамеренных помех, осложняющих работу приемопередающих и ретрансляционных устройств [1]. Для успешного приема полезного сигнала требуется достижение определенного порогового значения в соотношении сигнал/(помеха + шум). В противном случае ошибочные информационные биты не смогут быть восстановлены даже с применением кодов коррекции ошибок, нейросетевых технологий, методов анализа передаваемых сообщений [3]. Одним из способов повышения достоверности передачи информации и повышения скрытности излучателей радиосигналов является применение метода скачкообразной перестройки частоты. В этом случае коммуникационный сигнал распределяет свою энергию по набору доступных несущих частот $\{f_1, f_2, \dots, f_M\}$, значительно расширяя спектр частот, необходимый для передачи информации [4].

Существующие способы подавления полезного сигнала (частичное «зашумление» доступной спектральной полосы частот, создание радиопомех на частоте, используемой для передачи в данный момент времени [5]) базируются на том, что эффективное применение методов расширения спектра передаваемого сигнала достигается только при использовании

качественных генераторов псевдослучайных чисел (ГСЧ), определяющих несущую частоту в каждый момент времени. Если последовательность, получаемая от ГСЧ, не обладает приемлемыми случайными свойствами, то становится возможным раскрытие порядка смены частот [2]. Для работы в сеансовом режиме данная особенность наиболее актуальна, так как наличие этапа синхронизации и его успешное выполнение в значительной степени определяет дальнейшую пропускную способность. Возникает необходимость применения способа перестройки частоты, позволяющего учитывать особенности работы систем постановки помех, путем анализа состояния беспроводных каналов передачи информации и определения частотных диапазонов, которые могут быть использованы для передачи информации в текущий момент времени.

Разработка нейросетевого комплекса

Для решения поставленной проблемы предлагается использовать клеточную нейронную сеть с гистерезисом в цепи обратной связи нейронного элемента [6]. Обучение предлагаемой нейросетевой структуры осуществляется путем подачи на слой входных нейронов информации об уровне сигнала в наборе радиочастот, доступных для передачи информации. После выполнения обучения клеточная сеть будет способна перестраивать несущую частоту, учитывая уровень фоновых шумов и вероятность постановки помех на конкретной частоте радиодиапазона.

Динамика функционирования одиночного нейрона в простой нейронной сети с гистерезисом описывается следующим уравнением:

$$\begin{cases} \beta_{ij} \dot{x} = -x_{ij} + \sum_{k \in M} \sum_{l \in M} a_{kl} y_{i+k, j+l} + \sum_{k \in M} \sum_{l \in M} b_{kl} u_{i+k, j+l} + z \\ y_{ij} = h(x_{ij}) = \begin{cases} +1, & x_{ij} > -Th \\ -1, & x_{ij} < +Th \end{cases} \end{cases}, \quad (1)$$

где x – внутреннее состояние ячейки;

y – выходной сигнал;

z – пороговое значение;

M – количество нейронов-соседей;

u – входной сигнал;

a, b – весовые коэффициенты;

β – временная константа;

Th – параметр функции биполярного гистерезиса [7].

Применение функции гистерезиса позволяет получить более сложную динамику функционирования сети, чем при использовании кусочно-линейных функций. При компоновке независимых нейронных ячеек получается система с высокой надежностью, обладающая достаточной вычислительной простотой для реализации. В качестве базовой топологии организации нейронов использовалась гексагональная плотноупакованная решетка, допускающая наличия до 6 соседей у нейрона [2]. Для обеспечения стабильности функционирования и повышения эффективности обучения нейронной сети связи между нейронами-соседями были реализованы в виде управляемых электрических структур, моделирующих распространение сигналов по отросткам нервных клеток.

На данном этапе проектирования нейронной сети требуется учесть необходимость настройки параметров искусственных аксонов, соединяющих все нейросетевые элементы [8]. Моделирование пространственного нейронного взаимодействия осуществляется через сеть нейристорных линий, которые обеспечивают связь между отдельными нейронами. Нейристор реализован в виде проводника нейронной активности, способный изменять проходящий по нему сигнал в зависимости от состояния нейронов, влияющих на каждый из участков

нейристора, а также от состояния соседних нейристорных элементов. В результате процедура обучения нейронной сети состоит не только из этапов настройки весовых коэффициентов и внутренних структур нейрона, но и требуется использование алгоритма оптимизации коммутирующих соединений нейристорных линий, определение нейронов, воздействующих на конкретные нейристорные элементы, вычисление оптимального соседства нейристоров. Для реализации процесса моделирования нейристорной проводимости требуется процедура расчета активности множества ионных каналов на поверхности мембраны нейронного элемента, сопротивления и емкостных свойств мембраны, толщины и удельного сопротивления аксонов, а также расчет состояния внутренней среды клетки нейрона [9]. Исходя из сложности математического моделирования приведенной комплексной структуры и для увеличения производительности, нейристорная линия была реализована в виде аналоговой системы (оптико-электронный нейристор), схема которой представлена на рис. 1.

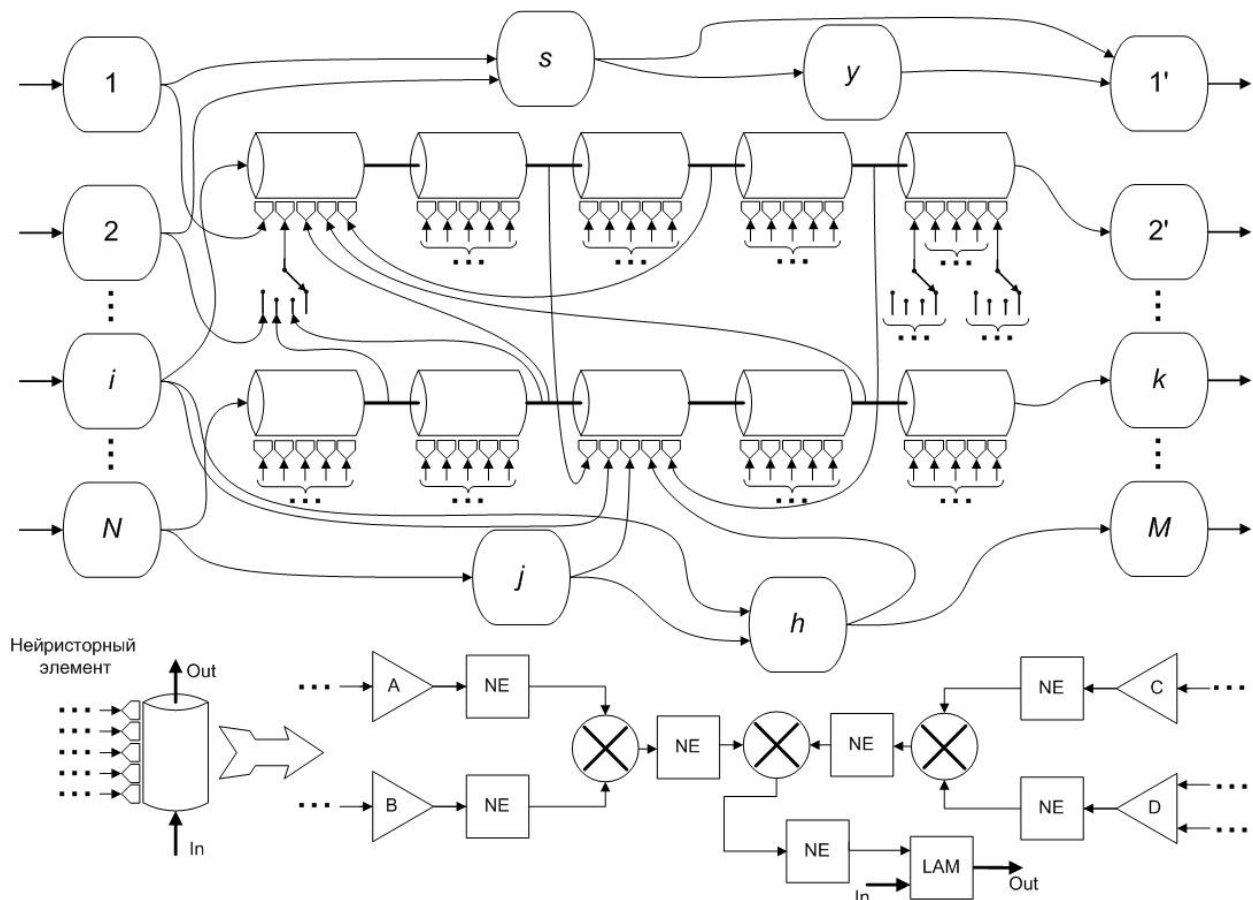


Рис. 1. Структурная схема нейронной сети с адаптивными нейристорными линиями

На рис. 1 показана схема нейронной сети, в которой нейроны соседних слоев, содержащих N и M элементов, взаимодействуют между собой как через вспомогательные нейронные элементы (нейроны s, y, j, h), так и через нейристорные линии. Нейристорная ячейка составлена из четырех усилителей ($A-D$): A – термостабилизированный логарифмический фотодиодный усилитель [10] (фотодиод **5003MD**, операционные усилители LM358N, массив транзисторов СА3096Е, применяемый в схеме термостабилизации); B – регистрирующий фотодиодный усилитель [11] (фотодиод **5003MD**, операционные усилители LM358N); C – фототранзисторный усилитель, выполненный на основе мостовой схемы и инструментального усилителя AD623; D – дифференциальный фотодиодный усилитель [12]. Блок NE – нелинейный элемент, реализованный на основе вложенных функций гиперболического тангенса:

$$g(x) = h \left[\left\{ \sum_{j=1, Q} w_{3j} h(w_{2j} h(w_{1j} x - \delta_{1j}) - \delta_{2j}) \right\} - \delta_3 \right], \quad h(a) = \frac{1 - \exp(-2\gamma a)}{1 + \exp(-2\gamma a)}, \quad (2)$$

где x – входной сигнал;

$g(x)$ – выход нелинейного элемента;

δ, γ – переменные параметры;

w – настраиваемые весовые коэффициенты;

Q – количество уровней нелинейной цепи.

Так как нейристорная линия обрабатывает аналоговый сигнал, то необходимо применение цепочки из аналогово-цифрового преобразования (МСР3201), вычисление результата (микроконтроллер stm32f103zet6) и дальнейшее его преобразование в аналоговую форму (МСР4921).

Для перемножения сигналов применялась микросхема аналогового умножителя AD633JN. Результирующий сигнал от нейристорного элемента и входной сигнал смешивались при помощи линейного амплитудного модулятора [13] (рис. 1, блок LAM), выполненного на основе умножителя AD633JN.

Нейристорные элементы соединены между собой оптической связью, обеспечивающей передачу информации между нейристорными элементами и нейронами. Оптическая система коммутации выполнена на основе составного призматического массива [14], составленного из призм размером 15 x 15 x 21 мм., изготовленных из прозрачного оптического стекла. Путем комбинации расположения призматических элементов по схеме добавочной и компенсирующей конфигурации [15] выполняется построение оптического канала связи между отдельными элементами нейросетевого вычислителя, что позволяет создать гибкую коммуникационную сеть, которая может быть изменена в процессе настройки нейронной сети.

Рассмотрим функционирование единичного нейристорного элемента. На рис. 2 и 3 показаны образцы выходных сигналов усилителей А–В и С–D.

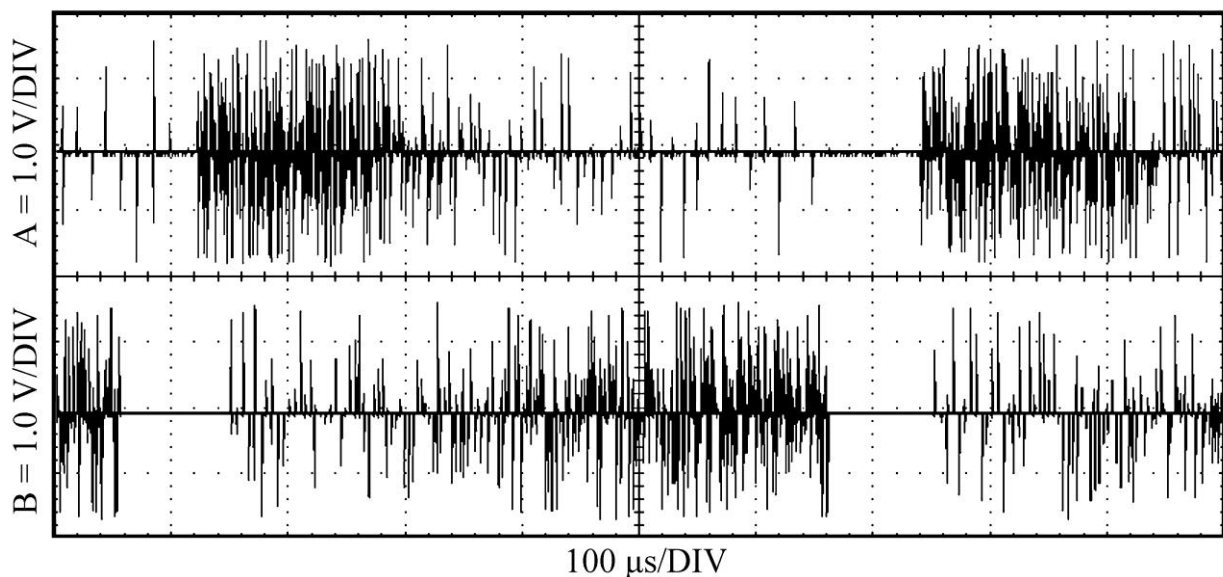


Рис. 2. Образцы выходных сигналов для первой пары усилителей

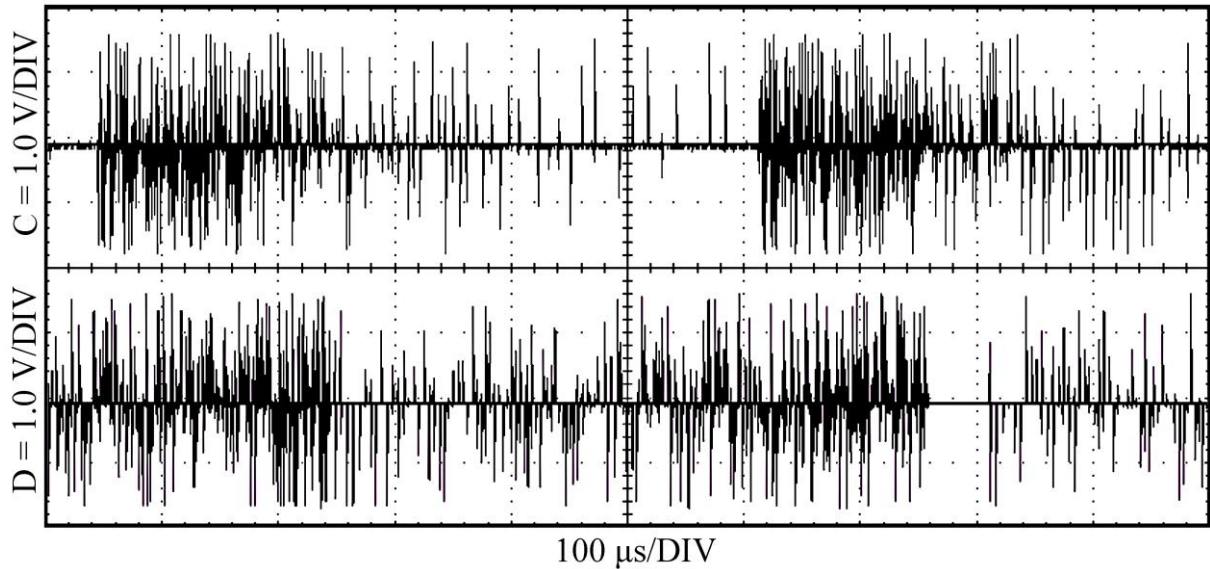


Рис. 3. Образцы выходных сигналов для второй пары усилителей

В предложенной схеме нейриты моделируются в виде совокупности блоков усилительных элементов, взаимодействие между которыми делает возможным организацию процесса обработки сигналов, передаваемых между нейронами [16]. После перемножения сигналов от пар усилителей и выполнения нелинейного преобразования (рис. 4, сигналы *E* и *F*) результирующий сигнал (рис. 5, сигнал *G*) является откликом нейристорного элемента на совокупность входных воздействий. Блок LAM выполняет преобразование сигнала, проходящего по аксону, в соответствии с состоянием нейристорной ячейки. Выходной сигнал рассматриваемой нейристорной ячейки, показанный на рис. 5 (сигнал *H*), является результатом взаимодействия сигнала состояния нейристора и синусоиды частотой 3 кГц, с амплитудой от -3 до 3 вольт.

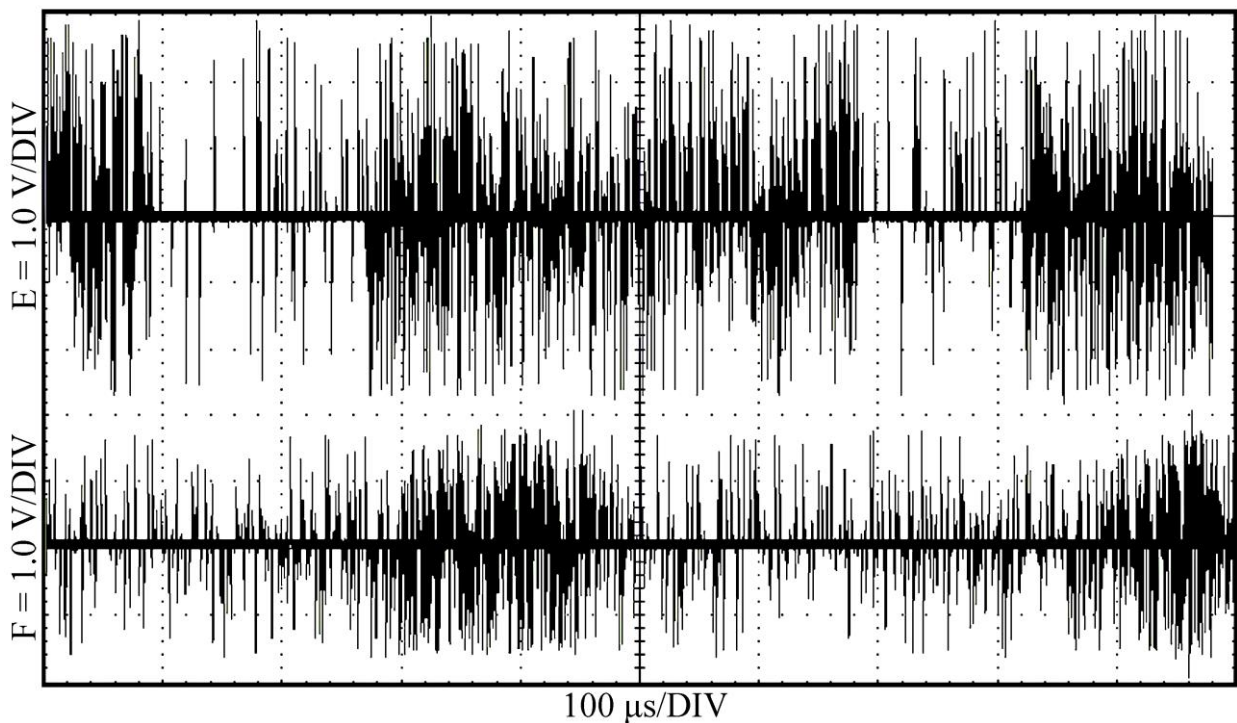


Рис. 4. Выходные сигналы после нелинейного преобразования и перемножения

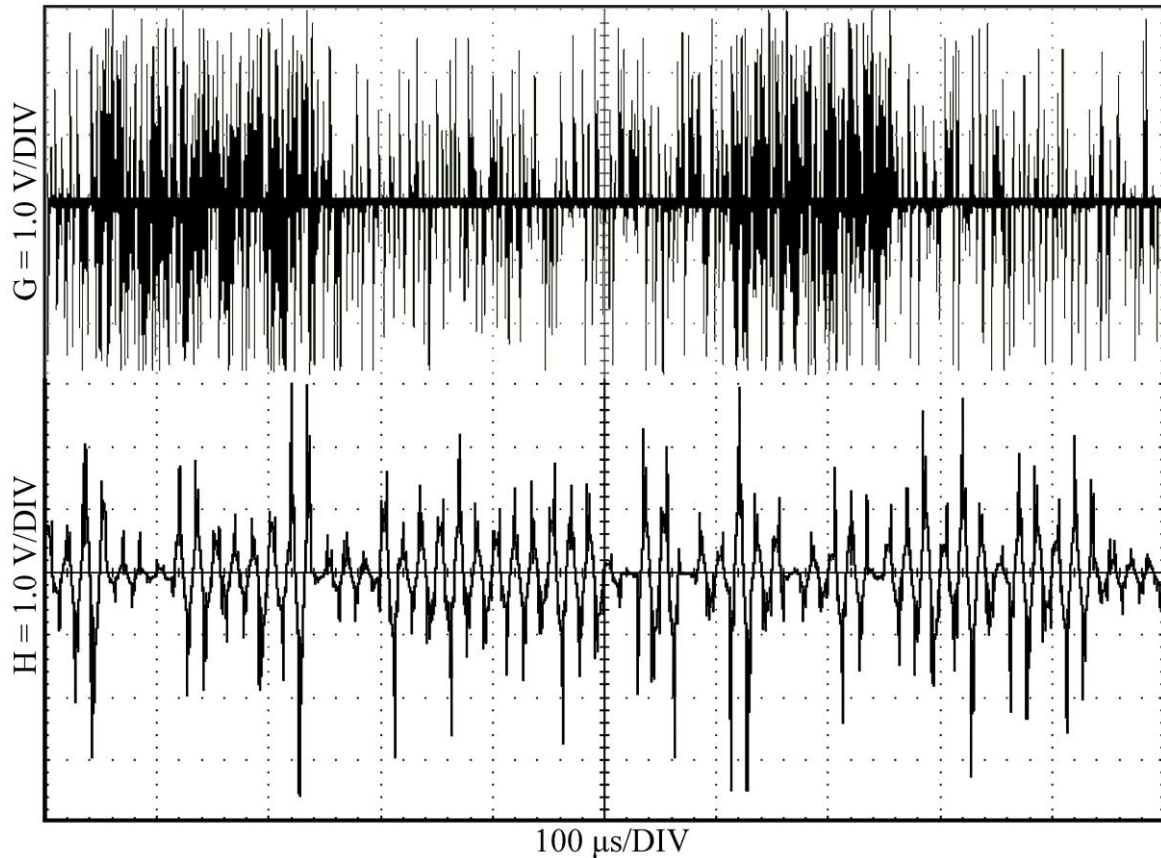


Рис. 5. Результирующие сигналы нейристорного элемента

Полученная зависимость показывает возможность нейристорных линий выполнять сложные нелинейные преобразования, что значительно повышает вычислительные возможности нейронных сетей по сравнению с интеллектуальными системами, преобразование сигналов в которых осуществляется только при помощи искусственных нейронных элементов. Предложенная схема также решает проблему, возникающую при конструировании моделей подобного типа – это необходимость точного моделирования морфологии нейрона для обработки сигналов с учетом пространственного положения нейронного элемента.

Настройка и обучение клеточной нейронной сети

Процедура обучения для разработанной нейросетевой структуры заключается в настройке переменных параметров не только в составе нейронов, но и в блоках коммутации сигналов и нелинейных элементах нейристорных линий. В качестве алгоритма обучения применялась диффузионная модель алгоритма итерационного поиска [17, 18]:

1. Формируется N исходных начальных решений X_n^0 в допустимой области D , в которую входят все переменные параметры, характеризующие нейроны и искусственные оторостки. Счетчик итераций $t = 1$.
2. Исходя из каждого начального состояния, выполняется поиск решений X_n^1 , с применением алгоритма, использующего в качестве метода оптимизации эффект роения бактерий. Далее выполняется случайная диффузия решений между альтернативными популяциями, соседствующими по схеме графа с высоким уровнем связности, и производится еще один этап поиска алгоритмом бактериальной оптимизации.
3. Путем возмущения каждого решения из имеющегося множества популяционных алгоритмов оптимизации пчелиным роем из точки X^1 получаем точку $X^0(t)$. На данном этапе

решение получается не путем выбора из потенциального набора случайно сгенерированных альтернативных вариантов, а путем изменения предыдущего найденного решения. Изменение должно быть достаточным для выхода из зоны локального притяжения текущего вектора параметров нейронной сети. Выбор алгоритма пчелиной оптимизации обусловлен тем, что удается достигнуть выполнения следующих условий: возмущение не является полностью случайным, алгоритм может изменять решение с учетом информации об уже найденных решениях [19].

4. С помощью тасующего алгоритма прыгающих лягушек получаем решение $X^1(t+1)$ из начальной точки $X^0(t)$. Если $E(X^1(t+1)) < E(X^0(t))$, то $X^1 = X^1(t+1)$, в противном случае $X^1 = X^0(t)$. $E(\cdot)$ – ошибка обучения нейронной сети.

5. Если ошибка обучения не достигла требуемого значения, то полагаем $t = t + 1$, и возвращаемся к шагу 3.

Выполнение алгоритма приводит к реализации параллельной метаэвристики [20], которая приводит к осуществлению алгоритма глобальной оптимизации с учетом ограничений решаемой задачи. График изменения среднеквадратической ошибки обучения нейронной сети показан на рис. 6.

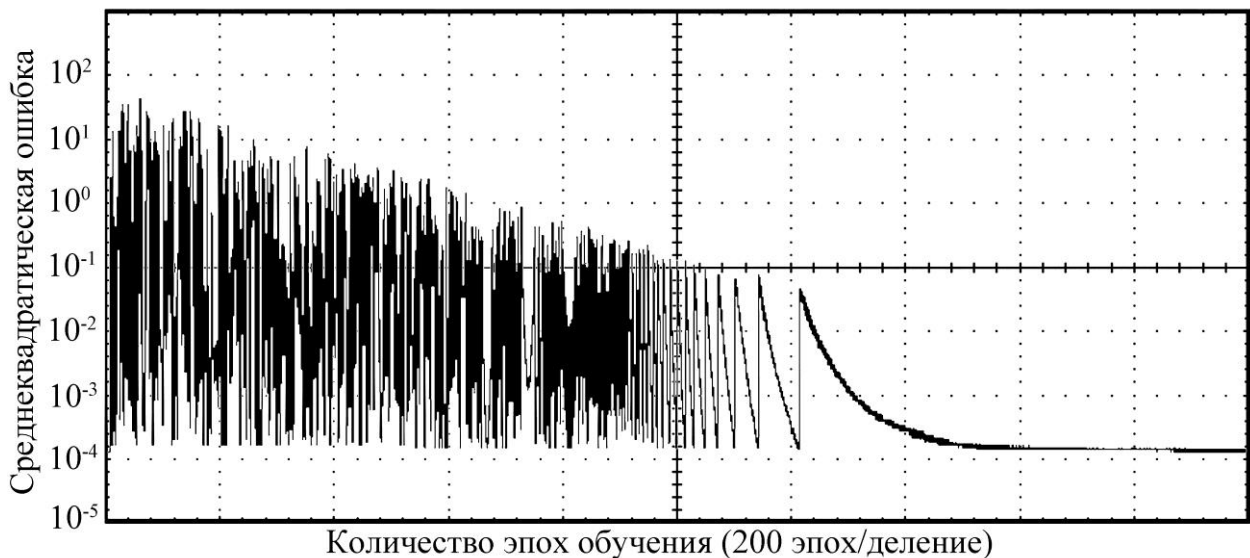


Рис. 6. График среднеквадратической ошибки обучения

Оценка эффективности функционирования нейросетевого комплекса

После выполнения процедуры настройки нейронных элементов и адаптации параметров нейристорных линий нейронная сеть может осуществлять перестройку несущей частоты. Для примера рассмотрим процедуру переключения частоты в диапазоне от 450.500 МГц до 452.500 МГц. В рассматриваемом диапазоне возможна передача информации по 80 каналам, расположенным с интервалом 25 кГц. На рис. 7 показана возможная установка частоты после обучения системы на 450 примерах, имитирующих работу системы отслеживания несущих и постановки помех. Метка A_0 является прогнозом для выполнения перестройки в момент времени t_2 . На рис. 8 показан момент времени после установки частоты, прогноз которой был дан в предыдущий момент времени. Метка A_1 является предпочтительным каналом для следующего момента времени t_3 .

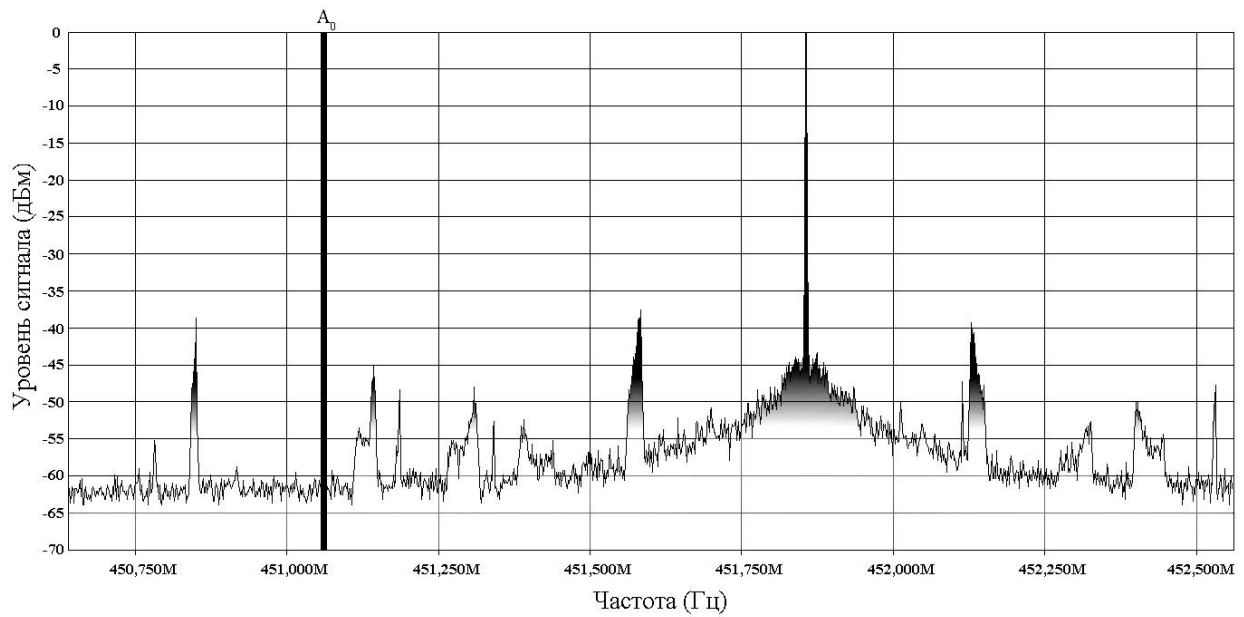


Рис. 7. Спектральная диаграмма (момент времени t_1)

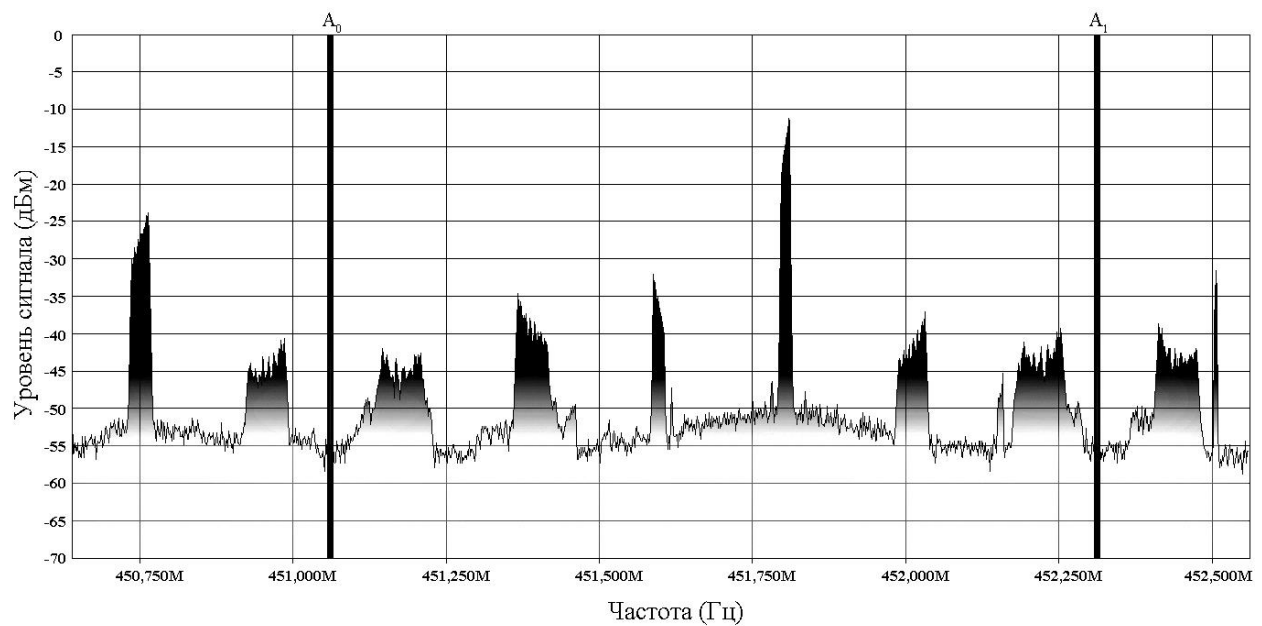


Рис. 8. Спектральная диаграмма (момент времени t_2)

На рис. 9 приведена спектральная диаграмма для t_3 . Метка A_2 – прогноз для момента времени t_4 (рис. 10).

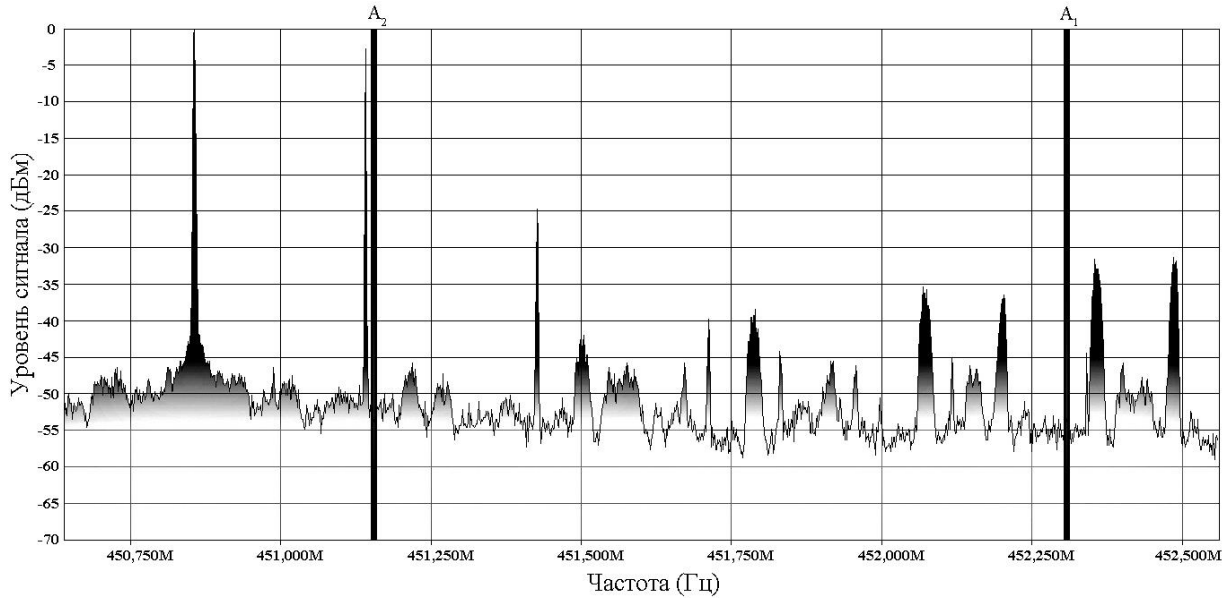


Рис. 9. Спектральная диаграмма (момент времени t_3)

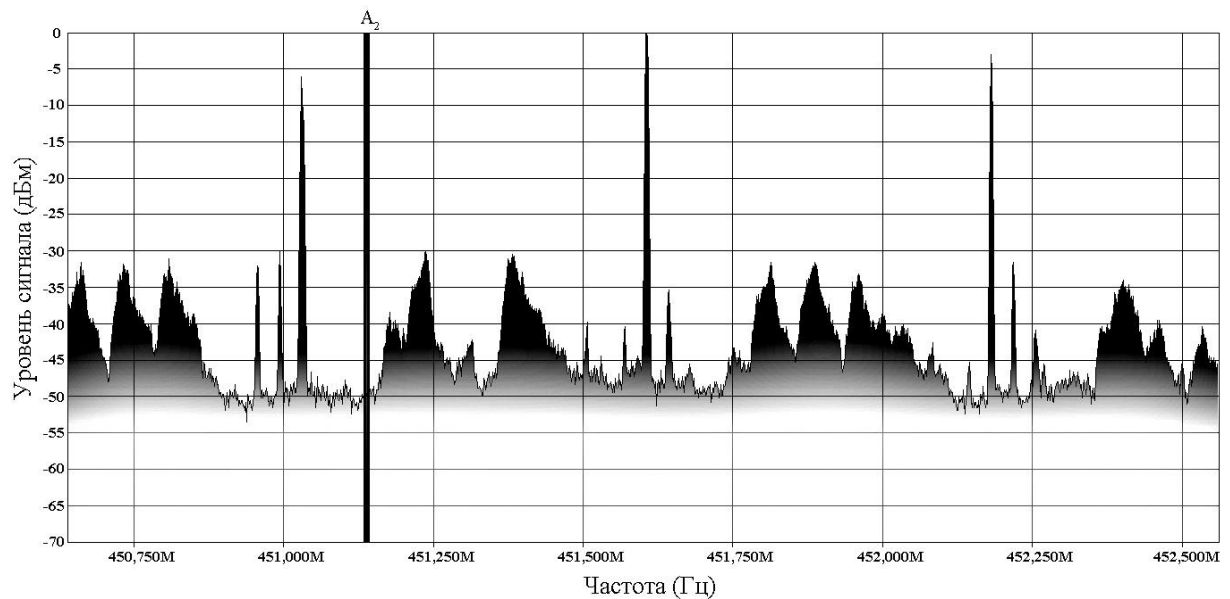


Рис. 10. Спектральная диаграмма (момент времени t_4)

Анализ приведенных примеров показывает, что переключение частоты удастся скорректировать, основываясь на изучении спектральных диаграмм состояния радиоканалов и выполняя процедуру обучения клеточной нейронной системы с адаптивными нейристорными элементами. Применение нейросетевого комплекса обеспечивает достижение необходимых требований к вероятности ошибочного приема на бит, за счет применения комбинированной системы, использующей нелинейные способы обработки информации для предсказания и селекции помех. Кроме того, адаптивная перестройка частоты способствует повышению электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств в условиях неопределенности параметров излучений и не способствует усложнению электромагнитной обстановки. Клеточная нейросетевая структура с нейристорными линиями связи между нейронными модулями показала эффективность построения высокоэффективных алгоритмов адаптивной настройки, которые направлены на работу в конкретной сигнально-помеховой обстановке [2].

Заключение

На рис. 11 показаны графики изменения средней вероятности ошибки (СВО) на бит (P) как функции от коэффициента γ (часть полосы частот, подавляемой помехой) при различных значениях соотношения сигнал/шум, указанного в децибелах.

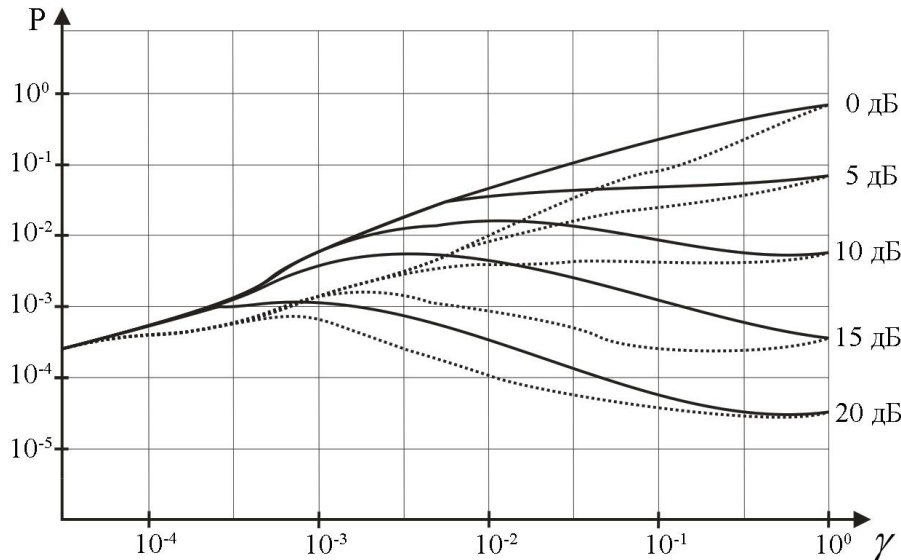


Рис. 11. Средняя вероятность ошибки на бит

Сплошная линия соответствует системе, использующей для перестройки частоты генератор псевдослучайных чисел «вихрь Мерсенна». Прерывистая линия характеризует метод расширения спектра с применением клеточной нейронной сети с нейристорными соединениями между нейронами. Эффективность постановки помех для каждого из возможных вариантов перестройки частоты можно оценить по достижению максимальной СВО на бит для конкретного значения коэффициента воздействия шумовой помехи в части полосы. Из графиков видна зависимость уменьшения СВО на бит при использовании нейросетевой технологии перестройки частоты. Адаптация к окружающей сигнальной обстановке делает возможным определение такой последовательности частот, которая меньше всего подвержена влиянию шумов. Кроме того, клеточная сеть способна сгенерировать алгоритм перестройки, повторение которого является наиболее трудоемким для систем постановки помех.

Литература

1. Sklar B. Digital Communications, Fundamentals and Applications : 2nd edition. N. J. : Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River, 2001. 1079 p.
2. Лавренков Ю. Н. Адаптивное управление частотно-эффективной системой передачи информации на основе нейронной сети с оптически связанными элементами // Прикладная информатика. 2017. Т. 12. № 5(71). С. 56–70.
3. Proakis J. G. Digital Communications : 4th edition. N.Y. : The McGraw-Hill companies Inc., 2000. 936 p.
4. Torrieri D. Principles of Spread Spectrum Communications systems. Springer Science + Business Media Inc., 2005. 444 p.
5. Peterson L., Ziemer R. E., Borth D. E. Introduction to Spread Spectrum Communications. N. J. : Prentice-Hall, 1995.
6. Rabunal J. R., Dorado J. Artificial Neural Networks in Real-Life Applications. IGI Global, 2005. 375 p.

7. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс : 2-е изд. ; пер. с англ. М. : Вильямс, 2008. 1104 с.
8. Graupe D. Principles of Artificial Neural Networks (Advanced Series in Circuits and Systems) : 2nd edition. World Scientific Pub Co Inc, 2007. 303 p.
9. Васильев А. Н., Тархов Д. А. Принципы и техника нейросетевого моделирования. СПб. : Нестор-История, 2014. 217 с.
10. Jerald G. Graeme, Photodiode Amplifiers: Op Amp Solutions. McGraw-Hill, 1995. 252 p.
11. Philip C. D. Hobbs, Building electro-optical systems: making it all work. Hoboken, N. J. Wiley, 2008. 727 с.
12. Крекрафт Д., Джерджи С. Аналоговая электроника. Схемы, системы, обработка сигнала. М. : Техносфера, 2005. 357 с.
13. Гаврилов С. А. Схемотехника. Мастер-класс. СПб. : Наука и Техника, 2016. 384 с.
14. Duarte F. J. Tunable Laser Optics : 2nd edition. N. Y. : CRC Press, 2015. 323 p.
15. Hecht E. Optics. Addison-Wesley, 2002. 704 p.
16. Dreyfus G. Neural Networks: Methodology and Applications : 2nd edition. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2005. 516 p.
17. Карпенко А. П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой : учеб. пособие. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 448 с.
18. Грешилов А. А. Математические методы принятия решений : учеб. пособие ; 2-е изд., испр. и доп. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 647 с.
19. Стронгин Р. Г., Гергель В. П., Гришагин В. А., Баркалов К. А. Параллельные вычисления в задачах глобальной оптимизации : моногр. М. : Изд-во МГУ, 2013. 280 с.
20. Лин К., Снайдер Л. Принципы параллельного программирования : учеб. пособие. М. : Изд-во МГУ, 2013. 408 с.

Памяти профессора В. Л. Якушева

In memory of professor V. L. Yakushev



26 января 2018 г. после продолжительной болезни скончался Заслуженный деятель науки Российской Федерации, доктор физико-математических наук, профессор Владимир Лаврентьевич Якушев.

В. Л. Якушев выпускник ФАКИ МФТИ (1970), в 1973 окончил аспирантуру МФТИ; с 1973 по 1987 старший научный сотрудник, доцент МФТИ; с 1987 г. заведующий отделением, ученый секретарь, и. о. директора, советник, г. н. с. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института автоматизации проектирования Российской академии наук.

В. Л. Якушев – специалист в области нелинейной устойчивости тонких оболочек, вычислительной математики, математического моделирования многомерных нелинейных задач механики сплошной среды. Он автор 176 научных работ, из них одна монографии, пять учебных пособий и 2 авторских свидетельств.

В. Л. Якушев являлся членом нескольких международных научных обществ: Общества прикладной математики и механики (Германия); Европейского общества механиков и Международной ассоциации по оболочкам и пространственным конструкциям. Его работы известны в России и за рубежом.

Основные научные работы В. Л. Якушева посвящены разработке методов численного моделирования нелинейных деформаций и устойчивости тонких оболочек и решению на их основе прикладных задач. Им разработан и обоснован метод дополнительной вязкости, позволяющий по единому алгоритму рассматривать нелинейные деформации и устойчивость тонких оболочек, находить докритические и закритические состояния, верхние и нижние критические нагрузки с учетом начальных несовершенств и нелинейных свойств материала. По существу, это один из эффективных методов регуляризации решения.

Исследования, проведенные ученым, помогли глубже понять механизм потери устойчивости оболочек и выявить качественные и количественные зависимости влияния несовершенств на критические нагрузки и характер изменения формы оболочек в процессе потери устойчивости.

Сетевое издание. Полные тексты статей размещаются на официальном сайте издания surgu.ru и в базе данных Научной электронной библиотеки на сайте elibrary.ru, сведения о публикуемых материалах включаются в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Адрес учредителя и издателя:
бюджетное учреждение высшего образования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры
«Сургутский государственный университет»,
628412, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, Сургут, пр. Ленина, 1. Тел. (3462) 76-30-67.

Дата выхода в свет 22.03.2018.
Формат 60 × 84/8.
Усл. печ. л. 16,8. Уч.-изд. л. 14,5.
Цена свободная.