

Вестник кибернетики
Proceedings in Cybernetics

№ 4 (36)

12+

2019

**БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
ХАНТЫ-МАНСИЙСКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА – ЮГРЫ
«СУРГУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Вестник кибернетики

Proceedings in Cybernetics

№ 4 (36)

Сургут
2019

Учредитель и издатель
Бюджетное учреждение высшего образования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры
«Сургутский государственный университет»

Главный редактор
Острейковский Владислав Алексеевич, д. т. н., профессор

Заместитель главного редактора
Тараканов Дмитрий Викторович, к. т. н., доцент

Ответственный секретарь
Брагинский Михаил Яковлевич, к. т. н., доцент

Члены редакционной коллегии:
Советов Б. Я., академик РАН и РАО, д. т. н., профессор
Юсупов Р. М., член-корреспондент РАН, д. т. н., профессор
Абрамов О. В., д. т. н., профессор
Анохин А. Н., д. т. н., профессор
Антонов А. В., д. т. н., профессор
Бурханов Р. А., д. филос. н., профессор
Гетман А.Ф., д. т. н., профессор
Григорьев Л. И., д. т. н., профессор
Древс Ю. Г., д. т. н., профессор
Каштанов В. А., д. ф.-м. н., профессор
Керимов Т. Х., д. филос. н., профессор
Леонов Д. Г., д. т. н., профессор
Мальшев Д. С., д. ф.-м. н., профессор
Мельников А. В., д. т. н., профессор
Увайсов С. У., д. т. н., профессор
Цибульский В. Р., д. т. н., профессор
Юрков Н. К., д. т. н., профессор
Микшина В. С., к. т. н.

Выпускающий редактор
Аширова А. В.
Редактор
Бобрус Ю. Р.
Верстка
Мельниковой Е. А.
Переводчик
Бенская М. О.

Рисунок на обложке:
Визуализация магнитогидродинамических расчетов для точного решения внутри сферы
© Галкин В. А., Гореликов А. В.

Решением Высшей аттестационной комиссии с 29 мая 2017 года журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» по следующим группам научных специальностей: 05.13.01 – системный анализ, управление и обработка информации, 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

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: proceed.cyber@mail.ru. Сайт: jc.surgu.ru

Founder and Publisher
Surgut State University

Chief Editor

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

Vice Chief Editor

Dmitry V. Tarakanov, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor

Executive Editor

Mikhail Ya. Braginsky, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor

Editorial Board:

Prof. Sovetov B. Ya., Doctor of Science (Engineering), member of the Russian Academy of Sciences (RAS), the Russian Academy of Education (RAE)

Prof. Yusupov R. M., Doctor of Science (Engineering), member of the Russian Academy of Sciences (RAS)

Prof. Abramov O. V., Doctor of Science (Engineering)

Prof. Anokhin A. N., Doctor of Science (Engineering)

Prof. Antonov A. V., Doctor of Science (Engineering)

Prof. Burkhanov R. A., Doctor of Science (Philosophy)

Prof. Getman A. F., Doctor of Science (Engineering)

Prof. Grigoryev L. I., Doctor of Science (Engineering)

Prof. Drevs Yu. G., Doctor of Science (Engineering)

Prof. Kashtanov V. A., Doctor of Science (Phys&Math)

Prof. Kerimov T. Kh., Doctor of Science (Philosophy)

Prof. Leonov D. G., Doctor of Science (Engineering)

Prof. Malyshev D. S., Doctor of Science (Phys&Math)

Prof. Melnikov A. V., Doctor of Science (Engineering)

Prof. Uvaisov S. U., Doctor of Science (Engineering)

Prof. Tsibulsky V. R., Doctor of Science (Engineering)

Prof. Yurkov N. K., Doctor of Science (Engineering)

Mikshina V. S., Candidate of Science (Engineering)

Publishing Editor

Ashirova A. V.

Editor

Bobrus Yu. R.

Layout

Melnikova E. A.

Translator

Benskaya M. O.

Cover Image:

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

© Galkin V. A., Gorelikov A. B.

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: 05.13.01 – System Analysis, Data Management and Processing; 05.13.18 – Mathematical Modeling, Calculus and Program Complexes; 05.27.01 – Solid-State Electronics, Radio Electronics, Micro and Nano Electronics, Quantum Instruments

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: proceed.cyber@mail.ru. Web: jc.surgu.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Сысоев С. М., Алексеев М. М. Численное моделирование нагрева нефтесодержащего пласта сверхвысокочастотным электромагнитным излучением	6
Волков А. В., Острейковский В. А. Обзор современных подходов к защите Земли от космических угроз	17
Гуз И. Д. Об одном подходе к оценке надежности оборудования центра обработки данных	26
Юдина М. Н. Анализ несмещенности и эффективности оценок частот встречаемости сетевых мотивов в статистических методах расчета	34
Витенбург Е. А. Архитектура программного комплекса интеллектуальной поддержки принятия решений при проектировании системы защиты информационной системы предприятия	46
Зенг В. А., Батенькина О. В. Реализация бесконтактного взаимодействия с прототипом компьютерного интерфейса в Unity 3D	52
Турлай А. А., Заикин П. В., Назина Н. Б. Применение методов машинного обучения и анализа данных при оценке состояния фистулы	61
Хасанов М. М., Галеев Р. М., Маргарит А. М., Краснов Ф. В. Принципы построения цифровой платформы для научно-технического центра	66

CONTENTS

Sysoev S. M., Alekseev M. M. Numerical Simulation of the Microwave Heating of an Oil Reservoir	6
Volkov A. V., Ostreikovskiy V. A. Review of Modern Approaches to Earth Protection from Space Threats	17
Guz I. D. On Certain Approach to Assessment of Reliability for Data Center Equipment	26
Yudina M. N. Analysis of Unbiased and Effective Estimates for Network Motifs Frequencies by Statistical Methods of Calculating	34
Vitenburg E. A. Software Complex Architecture of Intelligent Decision Support in Design of Security Sys- tem for Enterprise Information System	46
Zeng V. A., Batenkina O. V. Implementation of Contactless Interaction with Computer Interface Prototype Using Unity 3D ...	52
Turlay A. A., Zaikin P. V., Nazina N. B. Application of Machine Learning Methods and Data Analysis for Evaluating the State of Fistula	61
Khasanov M. M., Galeev R. M., Margarit A. M., Krasnov F. V. Digital Platform Buildup Principles for Science and Technology Center	66

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА НЕФТЕСОДЕРЖАЩЕГО ПЛАСТА СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

С. М. Сысоев, М. М. Алексеев

*Сургутский государственный университет,
smsysoev57@mail.ru, amm.iff@gmail.com*

В работе выполнено численное моделирование нагрева нефтесодержащего пласта сверхвысокочастотным электромагнитным излучением. В исследуемой модели нагрев пласта происходит за счет объемных источников тепла, возникающих при поглощении электромагнитного излучения. Процессы тепломассопереноса в нефтяном пласте описываются уравнениями теплопроводности и пьезопроводности. Скорость фильтрации нефти в пласте подчиняется закону Дарси. В результате исследования модели получены поля температур, давления, вязкости и скорости фильтрации нефти в пласте. Произведен расчет дебита скважины и объема добытой нефти в течение времени нагрева пласта сверхвысокочастотным электромагнитным излучением. Показано, что при нагреве пласта источником излучения мощностью 10 кВт, работающим на частоте 1 ГГц, за время, равное 120 суткам, происходит увеличение дебита скважины примерно в 3 раза, а объем добытой нефти при нагреве пласта превышает количество нефти, добытой из «холодной» скважины в 2,7 раза. Выполнена оценка эффективности технологии сверхвысокочастотного электромагнитного воздействия на нефтесодержащий пласт с точки зрения энергетического баланса.

Ключевые слова: математическая модель, нефтесодержащий пласт, сверхвысокочастотное электромагнитное излучение, фильтрация нефти, дебит скважины, объем добытой нефти.

NUMERICAL SIMULATION OF THE MICROWAVE HEATING OF AN OIL RESERVOIR

S. M. Sysoev, M. M. Alekseev

*Surgut State University,
smsysoev57@mail.ru, amm.iff@gmail.com*

The article presents the numerical simulation of an oil reservoir heating by microwave radiation. In the model under the study, the oil reservoir is heated using volumetric heat sources arising from the electromagnetic absorption. Heat and mass transfer processes in the oil reservoir are described by the equations of heat-conduction and piezoconductivity. The rate of oil filtration in the reservoir obeys Darcy's law. As a result of the model study, the fields of temperature, pressure, viscosity and oil filtration rate in the reservoir are obtained. The well yield and the volume of produced oil during the heating of the oil reservoir by microwave radiation are calculated. It is shown that when the oil reservoir is heated by a 10 kW radiation source operating at a frequency of 1 GHz for 120 days, the well yield increases by about 3 times, and the amount of oil produced by heating the oil reservoir is 2.7 times the amount of oil produced from a "cold" well. An assessment of the effectiveness of microwave technology of electromagnetic influence on the oil reservoir in terms of energy balance has been performed.

Keywords: mathematical model, oil reservoir, microwave, oil filtration, well yield, volume of produced oil.

Введение. Для увеличения извлечения высоковязких нефтей из коллекторов часто используют тепловые методы воздействия на пласт [1–2]. Однако традиционные тепловые ме-

тоды имеют ряд недостатков и ограничений, связанных с чрезмерными потерями тепла для глубоких скважин, экологическими рисками для гидрогеологической среды и т. д.

Высокочастотный электромагнитный нагрев нефтяного пласта является одним из перспективных методов увеличения добычи высоковязких нефтей [3–12]. Это метод лишен недостатков традиционных тепловых методов, а также имеет более высокую скорость нагрева нефти в пласте [13–14]. Практическое применение данного метода в нефтегазовой отрасли сдерживается недостаточными теоретическими и экспериментальными исследованиями процессов, протекающих в нефтяном пласте при его высокочастотном электромагнитном нагреве. Таким образом, нахождение оптимальных режимов нагрева пласта с помощью численного моделирования является актуальной задачей.

Постановка задачи. Настоящая работа является продолжением проведенных ранее исследований [15–18]. Схема модели представлена на рис.1. Рассматриваемая модель имеет осевую симметрию относительно оси z . Нефтяной пласт 2 находится между кровлей 1 и подошвой 3, которые являются непроницаемыми для нефти. Сверхвысокочастотное электромагнитное излучение генерируется источником, находящимся в скважине напротив середины пласта. Считается, что скважина имеет необсаженный ствол, и сверхвысокочастотное электромагнитное излучение проникает в нефтяной пласт в область, задаваемую диаграммой направленности антенны источника. Глубина проникновения электромагнитного излучения в пласт зависит от частоты излучения и электрофизических свойств среды. В результате поглощения электромагнитного излучения происходит объемный разогрев нефти, скелета пласта и подстилающих пород. Фильтрация нефти, вызванная перепадом давления в скважине и пластового давления, вызывает тепломассоперенос в пласте.

Для решения задачи используется цилиндрическая система координат с осью z , совпадающей с осью скважины. В силу осевой симметрии задачи, электромагнитная волна, излучаемая источником в пласт, описывается с помощью радиальной компоненты электрического поля E_r и азимутальной компоненты магнитного поля H_ϕ [15].

Уравнение для электромагнитного поля в пласте и подстилающих породах имеет вид:

$$\left(\nabla \times \left(\left(\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega\epsilon_0} \right)^{-1} \nabla \times \vec{H} \right) \right)_\phi - \mu_r k_0^2 H_\phi = 0.$$

Граничное условие для перехода электромагнитного излучения из пласта в подстилающие породы записывается следующим образом:

$$\vec{n} \times (\vec{E}_1 - \vec{E}_2) = 0,$$

где индекс «1» относится к нефтяному пласту, а индекс «2» – к подстилающим породам.

Граничные условия при $r = 0$ записываются как:

$$E_r = 0, \quad \frac{\partial E_z}{\partial r} = 0.$$

Объемная плотность тепловыделения, возникающего в результате поглощения энергии электромагнитной волны, находилась как:

$$q(r, z, T, t) = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[(\sigma - j\omega\epsilon_r) \vec{E} \times \vec{E}^* \right],$$

где $\sigma = \epsilon_0 \omega \epsilon'' = \epsilon_0 \omega \epsilon_r \operatorname{tg} \delta$, $\epsilon = \epsilon_r - j\epsilon''$.

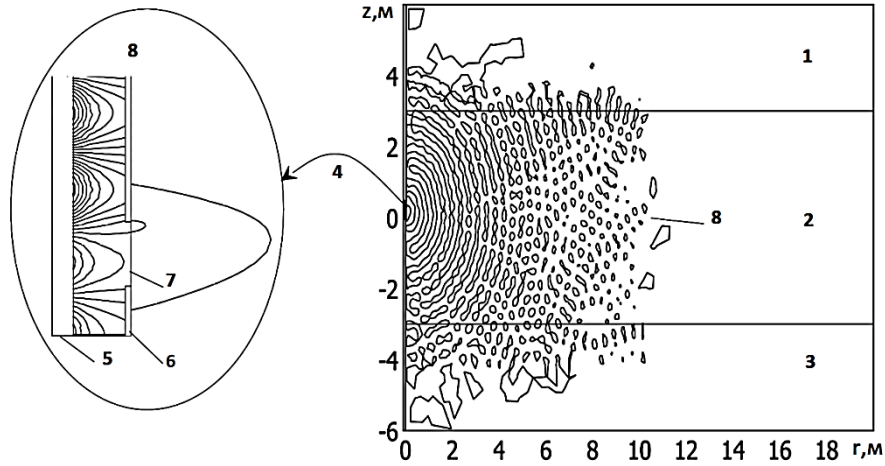


Рис. 1. Двумерная осесимметричная модель нефтяного пласта: 1 – кровля; 2 – нефтяной пласт; 3 – подошва пласта; 4 – источник электромагнитного излучения с коаксиальной щелевой антенной; 5 и 6 – внутренний и внешний проводники антенны; 7 – кольцевая щель антенны; 8 – изолинии напряженности азимутальной компоненты магнитного поля ЭМВ [15]

Уравнения тепло- и пьезопроводности описывают теплоперенос и фильтрацию нефти в пласте:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \times (-\lambda \nabla T) + mc_1 \rho_1 \vec{v} \times \nabla T = q(r, z, T, t),$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{m\beta_p} \nabla \times \left(\frac{k}{\eta} \nabla p \right) + \frac{\beta_T}{\beta_p} \frac{\partial T}{\partial t},$$

где ρ , c , λ – плотность, теплоемкость и теплопроводность среды, усредненные по всем фазам;
 m – пористость среды;

$\rho_1, c_1, \eta, \beta_p, \beta_T$ – плотность, теплоемкость, вязкость, коэффициенты сжимаемости и теплового расширения нефти;

k – коэффициент проницаемости пласта;

$\vec{v} = -\frac{k}{\eta} \nabla p$ – скорость фильтрации нефти (закон Дарси).

В начальный момент времени температура задается во всей рассматриваемой области следующим образом: $T|_{t=0} = T_0$.

Граничные условия для уравнения теплопроводности можно записать в виде:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=b} = 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r \rightarrow \infty} \rightarrow 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z \rightarrow \pm \infty} \rightarrow 0,$$

где b – радиус скважины [15].

Начальные и граничные условия для давления в пласте и скважине представлены в виде:

$$p|_{t=0} = p_0, p|_{r=b} = p_b, p|_{r \rightarrow \infty} \rightarrow p_0, \left. \frac{\partial p}{\partial z} \right|_{z=\pm h/2} = 0,$$

где h – толщина пласта;

p_b – давление в скважине.

Результаты моделирования. В настоящей работе использовались данные о свойствах высоковязкой нефти и горных пород, характерных для Русского месторождения [19].

При исследовании модели были получены пространственные и временные распределения температуры, давления, вязкости и скорости фильтрации нефти в пласте. Нагревание нефти приводит к уменьшению ее вязкости, что, в свою очередь, увеличивает скорость фильтрации нефти в пласте. Значение скорости фильтрации нефти на границе «пласт – скважина» определяет величину дебита скважины.

На рис. 2а приведены изотермы в нефтяном пласте и подстилающих породах после нагрева в течение 30 суток с помощью источника сверхвысокочастотного излучения (далее – СВЧ-излучения) мощностью $W = 10$ кВт, работающего на частоте $f = 1$ ГГц. Источник излучения имеет малые размеры по сравнению с толщиной пласта и находится в скважине посередине пласта (координата $z = 0$).

На рис. 2б приведены зависимости температуры в пласте от радиального расстояния от источника излучения вдоль середины пласта ($z = 0$) при различных временах нагрева.

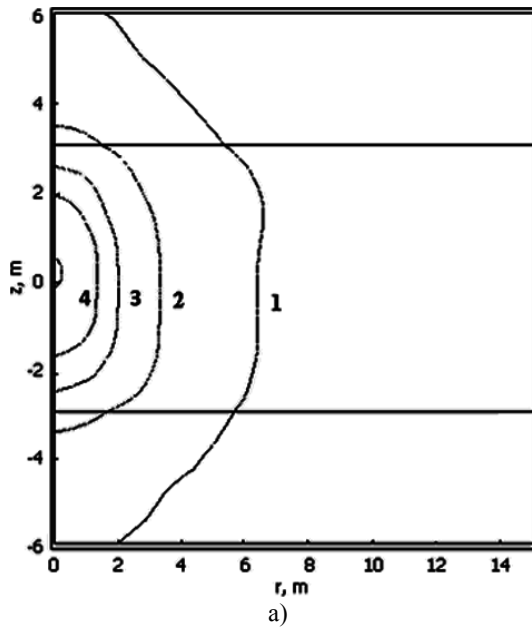


Рис. 2а. Изотермы в нефтяном пласте (начальная температура $T_0=293$ К) 1 – $T = 294$ К; 2 – 300 К; 3 – $T = 310$ К; 4 – $T = 320$ К (время нагрева $t = 30$ сут.);

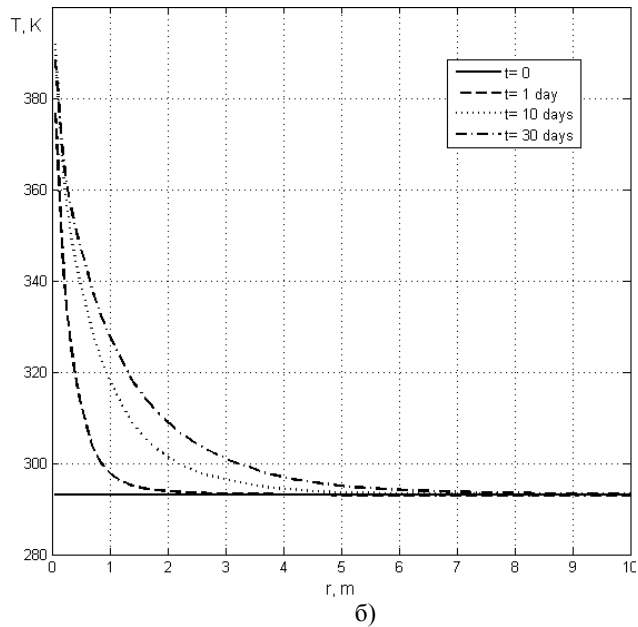


Рис. 2б. Радиальный профиль температуры в пласте ($z = 0$) при различных временах нагрева (параметры источника СВЧ-излучения: $W = 10$ кВт, $f = 1$ ГГц)

Из рисунков видно, что рост температуры наблюдается вокруг источника излучения в области размером около 3 м. Рост температуры вызывает перераспределение давления в пласте (изменяется градиент давления) и уменьшение вязкости нефти, что приводит к росту скорости фильтрации нефти в пласте в соответствии с законом Дарси:

$$\vec{v} = -\frac{k}{\eta} \nabla p,$$

где \vec{v} – скорость фильтрации нефти.

На рис. 3 приведена зависимость давления в нефтяном пласте от радиального расстояния (депресссионная кривая) от источника излучения при различных временах нагрева.

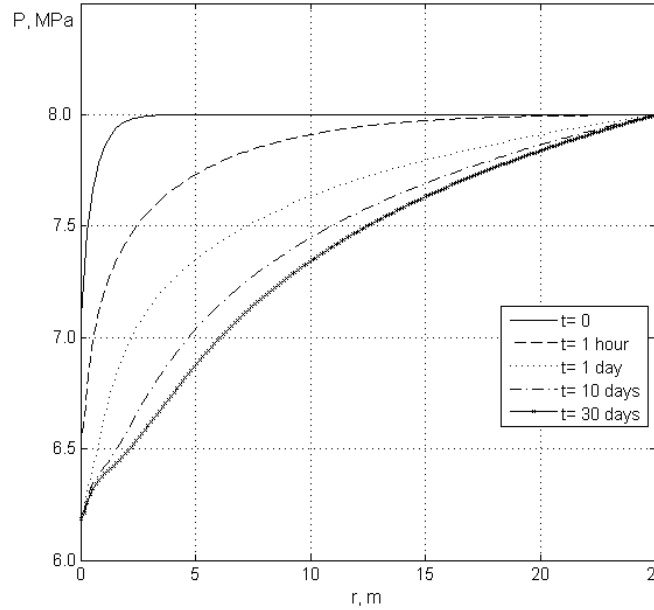


Рис. 3. Зависимость давления в нефтяном пласте от радиального расстояния от источника излучения (параметры источника СВЧ-излучения: $W = 10$ кВт, $f = 1$ ГГц, $z = 0$)

Из рис. 3 видно, что с течением времени воронка депрессии давления расширяется по мере прогрева околоскважинной зоны. Радиус влияния воронки депрессии определяет реальную область ее развития, в пределах которой формируется подавляющая часть забираемого скважиной потока. Воронка депрессии, распространяясь по нефтеносной части пласта, вовлекает в зону действия все более глубокие слои пласта, вызывая в них изменение пластового давления и увеличивая радиус контура питания пласта. Расширение воронки депрессии при нагреве пласта излучением происходит неравномерно: наиболее быстро этот процесс протекает в первые сутки нагрева, затем расширение воронки замедляется и фактически прекращается. Таким образом, при малом времени нагрева воронка депрессии, вследствие близкого к логарифмическому закону распределения давления, имеет большую крутизну вблизи скважины, при дальнейшем нагреве депрессионная кривая становится более полой, и форма ее стабилизируется при времени нагрева около 30 суток.

В связи с тем, что коэффициент пьезопроводности пласта $\kappa_0 = k / (m \times \beta_p \times \eta)$ много больше коэффициента температуропроводности пласта $a_0 = \lambda / (c \times \rho)$, давление в пласте устанавливается значительно быстрее температуры, и, вследствие граничных условий (непроницаемые границы пласта при $z = \pm h/2$), изобары представляют собой цилиндрические поверхности, с осью, совпадающей с осью скважины [20]. В непосредственной близости от источника излучения наблюдаются небольшие изгибы изобар.

Данные о вязкости Русской нефти в зависимости от температуры $\eta(T)$ получены в работах [19]. Эта зависимость хорошо аппроксимируется обобщенной формулой Андраде, которая и использовалась при моделировании:

$$\eta(T) = \eta_{\infty} \exp \left\{ E_{\eta} / R(T - T_s) \right\},$$

где η_{∞} — высокотемпературный предел вязкости;

E_{η} — энергия активации вязкости;

T — температура полного затвердевания;

R — универсальная газовая постоянная.

На рис. 4а, 4б приведены радиальный и вертикальный профили вязкости нефти в пласте.

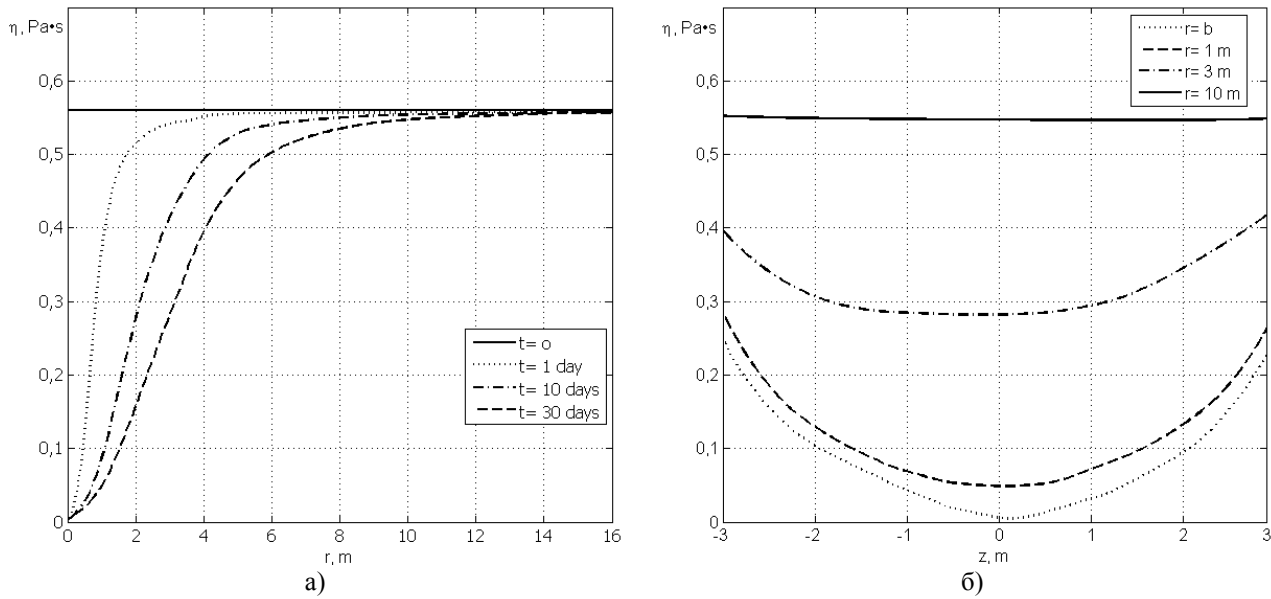


Рис. 4. Радиальный и вертикальный профили вязкости нефти в пласте:

а – радиальный профиль вязкости нефти в пласте ($z = 0$) при различном времени нагрева;
 б – вертикальный профиль вязкости нефти в пласте на различных радиальных расстояниях r от скважины для времени нагрева $t = 30$ сут. (параметры источника СВЧ излучения: $W = 10$ кВт, $f = 1$ ГГц)

Из рис. 4а видно, что область пониженной вязкости нефти в пласте расширяется вглубь пласта по мере увеличения времени нагрева пласта. При времени нагрева, равном 30 суткам, величина этой области достигает 15 метров, но наиболее значительное уменьшение вязкости нефти происходит на расстоянии первых 5 метров от скважины. В зоне пласта вблизи источника излучения вязкость нефти понижается более чем в 10 раз по сравнению с первоначальным значением, равным $0,56 \text{ Па}\cdot\text{с}$.

Из рис. 4б видно, что в силу неравномерного прогрева пласта вязкость нефти в вертикальном сечении (при $r = \text{const}$) имеет наименьшее значение посередине пласта и увеличивается к границам пласта ($r \rightarrow \pm h / 2$) в несколько раз.

Таким образом, в силу закона Дарси поле давления и поле вязкости нефти формируют поле скоростей фильтрации нефти в пласте.

На рис. 5а и 5б приведены радиальный и вертикальный профили скорости фильтрации нефти в пласте.

Из рис. 5а видно, что скорость фильтрации нефти растет с приближением к скважине. Заметное увеличение скорости фильтрации наблюдается при увеличении времени нагрева пласта излучением.

Малые размеры источника СВЧ-излучения обуславливают неравномерный нагрев области на границе «пласт – скважина», что приводит к зависимости скорости фильтрации нефти от вертикальной координаты. На рис. 5б приведена зависимость скорости фильтрации нефти от вертикальной координаты. Видно, что наиболее сильный рост скорости фильтрации нефти происходит вблизи источника излучения на расстоянии около 1 м, при приближении к границам пласта она значительно уменьшается.

Возрастание скорости фильтрации нефти в пласте вызывает увеличение дебита скважины. Для «холодной» скважины скорость фильтрации нефти на границе «пласт – скважина» одинакова и не изменяется с течением времени при установившемся режиме добычи нефти. В этом случае найдем дебит скважины G_0 , умножив скорость фильтрации на границе «пласт – скважина» $v = v(r = b, z) = \text{const}$ на площадь цилиндрической поверхности ствола скважины:

$$G_0 = 2\pi b h \times v(r = b, z).$$

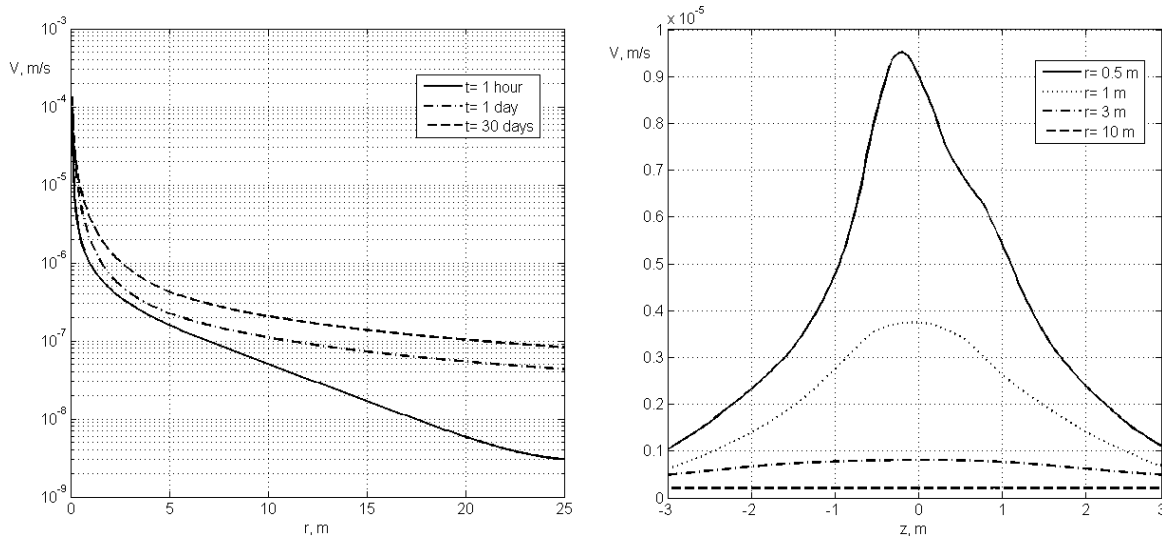


Рис. 5. Радиальный и вертикальный профили скорости фильтрации нефти в пласте:
 а – радиальный профиль скорости фильтрации нефти в пласте ($z = 0$) при различном времени нагрева;
 б – вертикальный профиль скорости фильтрации нефти в пласте на различных радиальных расстояниях r
 от скважины для времени нагрева $t = 30$ сут. (параметры источника СВЧ-излучения: $W = 10$ кВт, $f = 1$ ГГц)

В случае неравномерного нагрева пласта для нахождения дебита скважины G_H необходимо проинтегрировать скорость фильтрации $v = v(r = b, z)$ по вертикальной координате на границе «пласт – скважина»:

$$G_H = 2\pi b \int_{-h/2}^{h/2} v(r = b, z) dz.$$

Наиболее важным с практической точки зрения результатом прогрева является увеличенный дебит скважины по сравнению с дебитом «холодной» скважины. На рис. 6 приведена зависимость найденного таким образом дебита скважины от времени нагрева пласта СВЧ-излучением.

В отсутствие нагрева («холодная» скважина) дебит скважины остается неизменным и составляет $G_0 = 2,2$ м³/сут. Из рис. 6 видно, что величина дебита скважины при нагреве G_H в течение 120 суток возрастает примерно в 3 раза и равна 6,65 м³/сут. Это означает, что прирост дебита $\Delta G = G_H - G_0$ за счет нагрева пласта СВЧ-излучением за 120 суток составил почти 4,5 м³/сут., что больше дебита «холодной» скважины более чем в 2 раза.

Для «холодной» скважины дебит остается неизменным во времени, и расчет количества добытой нефти производится умножением дебита на время добычи нефти:

$$V_0 = G_0 \cdot t.$$

В случае нагрева пласта СВЧ-излучением расчет количества добытой нефти V_H производится интегрированием дебита скважины $G = G_H(t)$ по времени в пределах от начала $t = 0$ до окончания нагрева $t = t_h$:

$$V_H = \int_0^{t_h} G_H(t) dt.$$

На рис. 7 приведена зависимость найденного таким образом количества добытой нефти от времени нагрева пласта СВЧ-излучением.

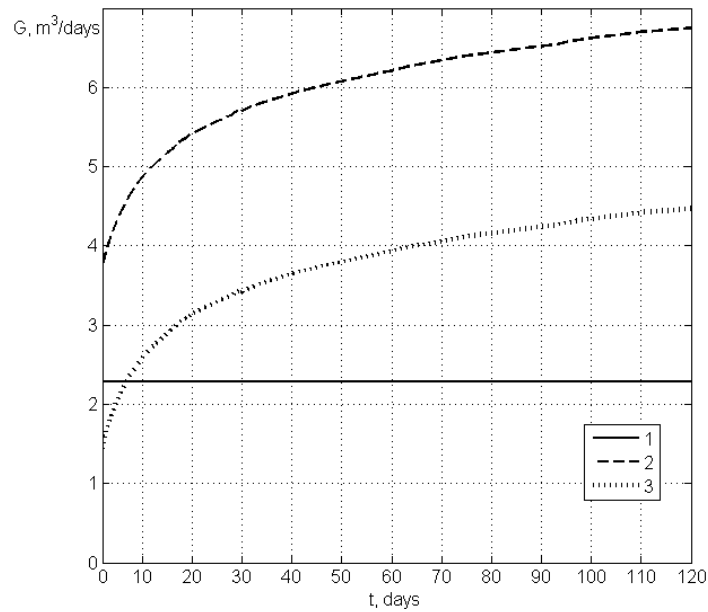


Рис. 6. Зависимость дебита скважины от времени нагрева пласта:

1 – дебит «холодной» скважины G_0 ; 2 – дебит скважины G_H при ее нагреве источником СВЧ-излучения (параметры источника СВЧ-излучения: $W = 10$ кВт, $f = 1$ ГГц); 3 – прирост дебита ΔG за счет нагрева

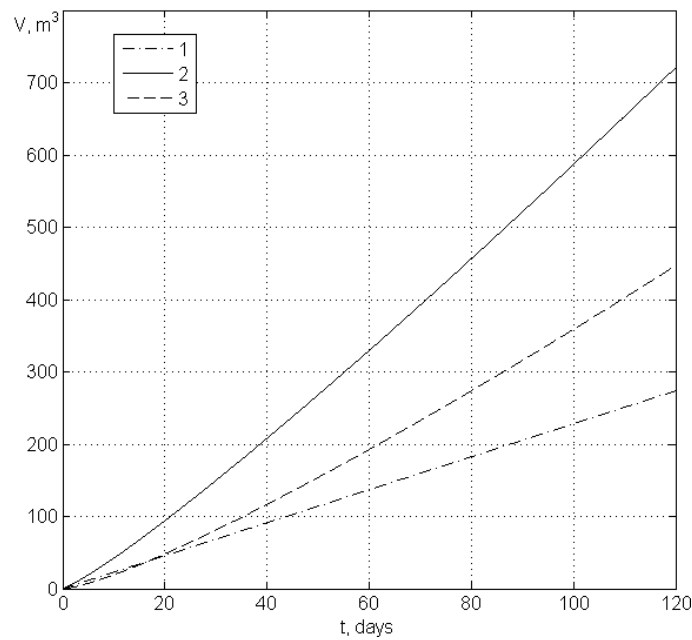


Рис. 7. Зависимость объема добытой нефти от времени нагрева пласта СВЧ-излучением:

1 – объем V_0 добытой нефти из «холодной» скважины; 2 – объем V_H добытой нефти при нагреве пласта источником СВЧ-излучения (параметры источника СВЧ-излучения: $W = 10$ кВт, $f = 1$ ГГц); 3 – объем дополнительно добытой нефти ΔV из-за нагрева пласта

Из рис. 7 видно, что объем добытой нефти из «холодной» скважины за 120 суток составляет 264 м^3 , а объем добытой нефти при нагреве пласта источником СВЧ-излучения – 710 м^3 , что в 2,7 раза больше. Таким образом, объем дополнительно добытой нефти из-за нагрева пласта за это время $\Delta V = V_H - V_0$ равен 446 м^3 .

Важным вопросом при внедрении технологии СВЧ ЭМ-воздействия на призабойную зону пласта является оценка эффективности и рентабельности метода с точки зрения энергетического баланса. В настоящей работе применялась известная методика расчета энергетиче-

ского баланса, используемая в задачах подобного типа. В ней оценка энергетического баланса проводится по коэффициенту K_{eff} , равному отношению получаемой энергии в результате дополнительно добытой нефти E_{oil} и потребленной энергии из-за работы источника СВЧ ЭМ-излучения E_s :

$$K_{\text{eff}} = \frac{E_{\text{oil}}}{E_s}.$$

Условная дополнительно получаемая энергия E_d определялась как:

$$\begin{aligned} E_{\text{oil}} &= M_{\text{oil}} \times q_{\text{oil}} = V_{\text{oil}} \times S_{\text{oil}} \times \rho_{\text{oil}} \times q_{\text{oil}}, \\ M_{\text{oil}} &= V_{\text{oil}} \times S_{\text{oil}} \times \rho_{\text{oil}} \end{aligned},$$

где $S_{\text{oil}} = 0,6$ – нефтенасыщенность пласта;

$q_{\text{oil}} = 4,6 \times 10^7$ Дж/кг – теплотворная способность нефти;

$\rho_{\text{oil}} = 940$ кг/м³ – плотность нефти;

$V_{\text{oil}} = 700$ м³ – объем дополнительно добытой нефти;

M_{oil} – масса дополнительно добытой нефти.

Выполненный расчет условной дополнительно получаемой энергии E_{oil} дал результат:

$$E_{\text{oil}} = 18,16 \times 10^{12} \text{ Дж} = 18,16 \text{ ТДж}.$$

Потребленная энергия из-за работы источника СВЧ ЭМ-излучения E_s определялась умножением общей потребляемой мощности W на время нагрева пласта t_h :

$$E_s = W \times t_h = \frac{W_s}{\eta_e \times \eta_l \times \eta_s \times \eta_{\text{oth}}} \times t_h,$$

где $\eta_e = 0,35$ – КПД электростанции;

$\eta_l = 0,56$ – КПД линии электропередачи;

$\eta_s = 0,6$ – КПД источника СВЧ ЭМ излучения;

$\eta_{\text{oth}} = 0,5$ – учет прочих потерь;

$t_h = 720$ час. – время работы источника СВЧ ЭМ-излучения;

$W_s = 10$ кВт – мощность источника СВЧ ЭМ-излучения.

Выполненный расчет потребленной энергии из-за работы источника СВЧ ЭМ-излучения E_s дал результат:

$$E_s = 0,44 \times 10^{12} \text{ Дж} = 0,44 \text{ ТДж}.$$

Оценка энергетического баланса по коэффициенту K_{eff} равна

$$K_{\text{eff}} = \frac{E_{\text{oil}}}{E_s} = \frac{18,16}{0,44} = 41,3.$$

Результат показывает, что получаемая энергия в результате дополнительно добытой нефти E_{oil} более чем в 40 раз превышает потребленную энергию из-за работы источника СВЧ ЭМ-излучения E_s . Принято считать, что технология эффективна, если $K_{\text{eff}} \geq 10$. Результат для $K_{\text{eff}} = 41,3$ позволяет сделать вывод о том, что эффективность технологии СВЧ ЭМ-воздействия на призабойную зону пласта является приемлемой с практической точки зрения.

Заключение. Исследование модели показало, что использование для нагрева пласта электромагнитного излучения в СВЧ-диапазоне частот позволяет прогреть только призабойную зону пласта размером около 3 метров. Но этого оказывается достаточно, чтобы существенным образом увеличить дебит скважины. Источники СВЧ-излучения (например, магнетроны) в диапазоне частот 1–5 ГГц имеют достаточно малые габаритные размеры, позволяющие их опустить в скважину на глубину расположения нефтяного пласта. Это снимает проблему транспортировки электромагнитной энергии от источника излучения, находящегося на поверхности, до нефтяного пласта.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что технологию СВЧ ЭМ-воздействия на призабойную зону пласта целесообразно применять на малодебитных скважинах, у которых дебит составляет несколько кубических метров нефти в сутки. Это позволит значительно увеличить темп отбора нефти из коллектора, сократить срок разработки таких месторождений, сделать добычу нефти из вышеописанных скважин эффективной и рентабельной. Дополнительным преимуществом технологии является очистка призабойной зоны пласта от отложений смол и парафинов за счет их расплавления. Ограничением данной технологии является необходимость иметь либо необсаженную часть скважины (открытый ствол), либо радиопрозрачные стеклопластиковые обсадные трубы, которые производятся отечественными предприятиями.

Литература

1. Бурже Ж., Сурио П., Комбарну М. Термические методы повышения нефтеотдачи пластов. М. : Недра, 1988. 424 с.
2. Малофеев Г. Е., Мирсаатов О. М., Чоловская И. Д. Нагнетание в пласт теплоносителей для интенсификации добычи нефти и увеличения нефтеотдачи. Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика» ; Институт компьютерных исследований, 2008. 224 с.
3. Саяхов Ф. Л., Багаутдинов Н. Я., Салихов Ю. Б. Физико-технические основы электромагнитной технологии извлечение нетрадиционных углеводородов // Вестн. БГУ. 2000. № 1. С. 19–26.
4. Vermeulen F., McGee B. In situ Electromagnetic Heating for Hydrocarbon Recovery and Environmental Remediation // J. Can. Pet. Technol. 2000. Vol. 39. P. 25–29.
5. Саяхов Ф. Л., Багаутдинов Н. Я. Электротепловые методы воздействия на гидрато-парафиновые отложения. М. : Недра-Бизнес-центр, 2003. 119 с.
6. Chetri A. B., Islam M. R. A Critical Review of Electromagnetic Heating for Enhanced Oil Recovery // Petroleum Science and Technology. 2008. Vol. 26. P. 1619–1631.
7. Фатыхов М. А., Худайбердина А. И. Комбинированные методы воздействия на нефтяные пласты на основе электромагнитных эффектов : моногр. Уфа : Изд-во БГПУ, 2010. 112 с.
8. Davletbaev A., Kovaleva L., Babadagli T. Mathematical Modeling and field Application of Heavy Oil Recovery by Radio-Frequency Electromagnetic Stimulation // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2011. Vol. 78. P. 646–653.
9. Mukhametshina A., Martynova E. Electromagnetic Heating of Heavy Oil and Bitumen: A review of Experimental Studies and Field Applications // Journal of Petroleum Engineering. 2013. Vol. 2013. 7 p.
10. Bera A., Babadagli T. Status of Electromagnetic Heating for Enhanced Heavy Oil / Bitumen Recovery and Future Prospects: A review // Applied Energy. 2015. Vol. 151. P. 206–226.
11. Oloumi D., Rambabu K. Microwave Heating of Heavy Oil Reservoirs: a Critical Analysis // Microwave and Optical Technology Letters. 2016. Vol. 58, No. 4. P. 809–813.
12. Саитов Р. И., Абдеев Р. Г., Швецов М. В. Математическая модель процесса электромагнитного нагрева многофазного многокомпонентного пласта тяжелой нефти // Вестн. Акад. наук РБ. 2018. Т. 29, № 4 (92). С. 73–79.

13. Кислицын А. А., Нигматулин Р. И. Численное моделирование процесса нагрева нефтяного пласта высокочастотным электромагнитным излучением // ПМТФ. 1990. Т. 31, № 4. С. 59–64.

14. Кислицын А. А. Численное моделирование прогрева и фильтрации нефти в пласте под действием высокочастотного электромагнитного излучения // ПМТФ. 1993. Т. 34, № 3. С. 97–103.

15. Сысоев С. М., Кислицын А. А. Моделирование теплопереноса в нефтесодержащем пласте под действием сверхвысокочастотного электромагнитного излучения // Вестн. Тюмен. Гос. ун-та. Физ.-мат. моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2009. № 6. С. 119–126.

16. Сысоев С. М., Заводовский А. Г., Кислицын А. А. Численное моделирование высокочастотного электромагнитного прогрева и фильтрации нефти в пласте // Труды 20-й Международ. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, 2010. С. 1095–1096.

17. Sysoev S., Kislitsin A. Modeling of Microwave Heating and Oil Filtration in Stratum // Numerical Simulations – Applications, Examples and Theory. 2011. P. 237–250.

18. Сысоев С. М. Численное моделирование фильтрации высоковязкой нефти в пласте под воздействием сверхвысокочастотного электромагнитного излучения // Тезисы Международ. конф. «Математика и информационные технологии в нефтегазовом комплексе». Сургут, 2014. С. 77–79.

19. Кислицын А. А., Фадеев А. М. Диэлектрическая релаксация в высоковязких нефтях // ЖФХ. 1994. Т. 68, № 2. С. 340–343.

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К ЗАЩИТЕ ЗЕМЛИ ОТ КОСМИЧЕСКИХ УГРОЗ

А. В. Волков, В. А. Острейковский

*Сургутский государственный университет,
volkov@lcreator.ru*

В статье рассмотрены глобальная проблема астероидно-кометной опасности и поэтапная защита Земли от космических угроз. Приведен краткий обзор развития технологий обнаружения опасных небесных тел; описаны проекты, по итогам реализации которых достигнуты важные результаты; а также обозначены ключевые страны и организации, занимающиеся проблемой защиты Земли.

Отдельно рассматриваются концепции технологий обнаружения и отражения астероидно-кометной опасности, предложенные учеными разных стран. Выполнена классификация существующих концепций по эшелону применения и способу отклонения опасного небесного тела от траектории столкновения с Землей.

Ключевые слова: космическая угроза, опасное небесное тело, защита Земли, астероидно-кометная опасность, система поражения астероидов.

REVIEW OF MODERN APPROACHES TO EARTH PROTECTION FROM SPACE THREATS

A. V. Volkov, V. A. Ostreikovsky

*Surgut State University,
volkov@lcreator.ru*

The article considers the global problem of asteroid–comet hazard and graded protection of the Earth from space threats. A brief review of the development of technologies for detecting dangerous celestial bodies is given; projects, the implementation of which achieved important results are described, as well as major countries and organizations involved in the protection of the Earth are pointed out.

The concepts of technologies for the detection and elimination of asteroid–comet hazard, proposed by scientists from different countries, are considered separately. The classification of existing concepts by the level of application and the method of deviation of a dangerous celestial body from the trajectory of collision with the Earth is done.

Keywords: space threat, dangerous celestial body, Earth protection, asteroid–comet hazard, asteroid destruction system.

Введение. Нельзя возразить тому факту, что защита Земли от космических угроз является одной из самых важных проблем человечества. Падение на Землю астероида диаметром больше 1 км приведет к глобальной катастрофе, а астероиды меньшего диаметра могут вызвать локальные и региональные катастрофы.

На сегодняшний день насчитывается свыше 11 тысяч космических объектов, сближающихся с Землей. Из них 863 астероида имеют диаметр свыше 1 км [1]. При этом есть вероятность существования меньших астероидов, обнаружить которые значительно труднее, так как телескопы Земли спроектированы для обнаружения больших астероидов.

В истории насчитывается не так много случаев, когда астероид получилось обнаружить до падения на Землю. Например, 7 октября 2008 г. был обнаружен астероид (идентификатор – 2008 TC3) диаметром 4 м всего за 19 ч до столкновения с Землей. Еще одним случа-

ем обнаружения астероида (2014 AA) является событие 2 января 2014 г. [2], когда астероид диаметром 2–4 м обнаружили примерно за 21 ч до входа в атмосферу. А в июне 2018 г. космический объект (2018 LA) диаметром 2 м был обнаружен всего за несколько часов до попадания в атмосферу Земли.

Все три случая не вызвали больших повреждений и последствий, так как метеориты имели малый диаметр. Хотя, например, в г. Челябинске в 2013 году, когда астероид диаметром около 17 м, не обнаруженный до момента входа в атмосферу, достиг Земли, пострадали более полутора тысяч человек [3]. По оценкам национального управления по авиации и исследованию космического пространства NASA США, это самое большое из известных небесных тел, падавших на Землю после Тунгусского метеорита в 1908 г. [4].

Следует учитывать, что астероиды даже малого диаметра способны причинить колоссальный ущерб в том случае, если место падения астероида придется на критически важный объект. Так, падение небольшого астероида на ядерный или биологически-опасный объект будет являться уже не локальной, а глобальной катастрофой. А поражение зданий аппаратов высших органов государственной власти и управления может на время парализовать управление страной.

По словам директора корпорации «Роскосмос» А. Н. Иванова, на 2016 г. у человечества не существовало технологий, позволяющих отражать астероиды [5]. Основное число разработок в этой области было направлено на своевременное обнаружение крупных космических объектов.

В XXI веке проводилось большое количество научно-исследовательских работ, направленных на изучение вопроса обнаружения опасных небесных тел (далее – ОНТ) и систем защиты Земли от космических угроз (далее – СЗЗКУ). Исследователи многих стран выдвинули свои концепции СЗЗКУ, но на сегодняшний день в России не существует утвержденного к реализации проекта (по открытым данным), вероятно, из-за неоднозначного преимущества той или иной системы и огромных экономических затрат. Целью настоящей статьи является краткий обзор упомянутых работ и выделение ключевых преимуществ и недостатков каждой из них.

Этапы защиты Земли от опасных небесных тел. Процесс защиты Земли от космических угроз (далее – КУ) можно описать следующими этапами:

1. Обнаружение опасных объектов, сближающихся с Землей (далее – ОСЗ).
2. Расчёт траектории и вероятности столкновения с Землей.
3. Оценка последствий и минимизация рисков.
4. Противодействие ОСЗ (в случае риска для населения).

Обнаружение объектов, сближающихся с Землей. Своевременное обнаружение ОСЗ является первым шагом для успешного отражения космической угрозы (далее – КУ). Член-корреспондент РАН В. В. Лебедев в своей работе [6] описал обсерватории, с помощью которых обнаруживается и каталогизируется большая часть ОНТ. На территории России, например, еще со времен СССР располагается широкая сеть, состоящая примерно из 70 телескопов, предназначенных для обнаружения ОНТ. Ввиду того, что в течение времени эти телескопы не модернизировались, Россия на сегодняшний день отстает в области обнаружения ОНТ от других стран. К примеру, в России самый крупный оптический телескоп – «большой телескоп азимутальный» (начал работать в 1975 г.) диаметром всего 6 м, в то время как в других странах используются телескопы диаметром 10–12 м.

Организация «Центр малых планет» при содействии Международного астрономического союза собирает и систематизирует данные наблюдений малых тел Солнечной системы, в том числе комет, вычисляет их орбиты и публикует эту информацию в циркуляре малых планет. На сегодняшний день в реестре потенциально опасных объектов (далее – ПОО) содержится 1972 объекта [7]. Как видно из рис. 1, их обнаружение получило широкое развитие в 1995 году, что связано с открытием лаборатории LINEAR – совместного проекта ВВС США, NASA и лаборатории Линкольна Массачусетского технологического института.

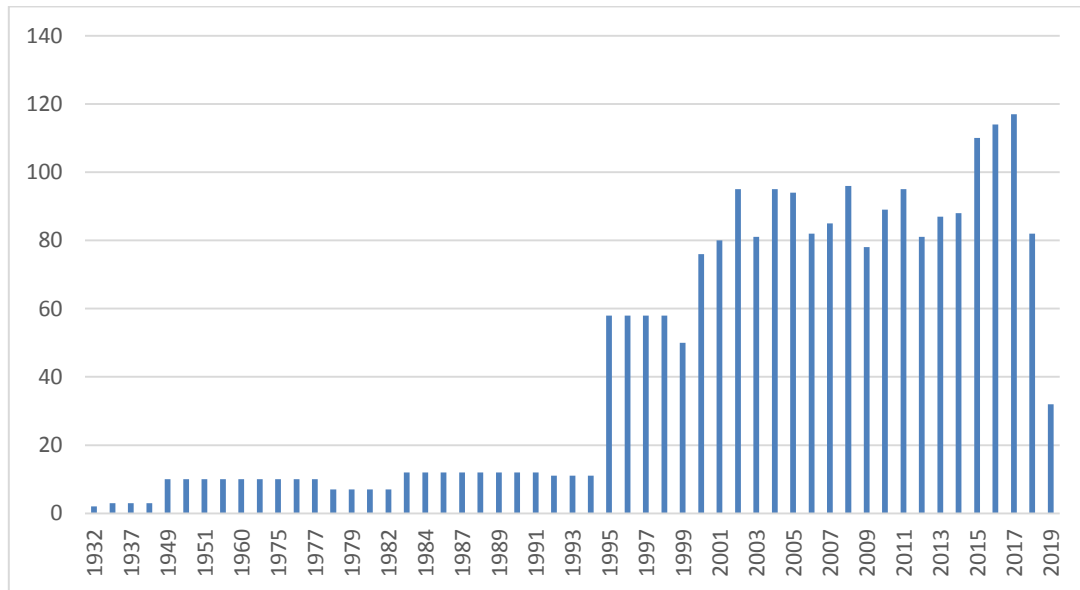


Рис. 1. Количество обнаруженных ПОО в разные годы

Помимо LINEAR хорошими результатами обнаружения ПОО отличаются следующие проекты:

1. Catalina – обсерватория Steward Аризонского университета.
2. NEAT (Near-Earth Asteroid Tracking) – проект Лаборатории реактивного движения NASA по поиску околоземных объектов.
3. Spacewatch – проект университета Аризоны, целью которого является поиск и открытие малых тел Солнечной Системы.
4. LONEOS (Lowell Observatory Near-Earth-Object Search) – проект обсерватории Лоуэлла по поиску околоземных астероидов и комет.
5. Pan-STARRS (Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System) – проект Гавайского университета.

Обнаружение ОНТ производится как с помощью наземных телескопов, так и с помощью космических аппаратов (далее – КА), расположенных на орбите Земли. Современные телескопы, расположенные на КА, позволяют обнаружить более удаленные от Земли ОНТ, чем их наземные аналоги.

В 2016 г. в России утверждена концепция космической системы обнаружения ОНТ, приближающихся к Земле с дневного неба, – система обнаружения дневных астероидов «СОДА», разработанная Институтом астрономии Российской академии наук [8].

На рис. 2 представлена концепция системы «СОДА». Согласно этой концепции предлагается разместить несколько КА в точке Лагранжа L1 между Солнцем и Землей – на расстоянии примерно 1,5 млн километров от Земли. Данные КА будут сканировать космическое пространство и обнаруживать ОНТ примерно за сутки до их возможного столкновения с Землей. За 10 ч до падения точность определения точки входа в атмосферу составит 100 км, за 4 ч до столкновения – 10 км. Проект «СОДА» будет способен обнаружить до 60 % всех тел размером от 10 м, приближающихся к Земле [8].

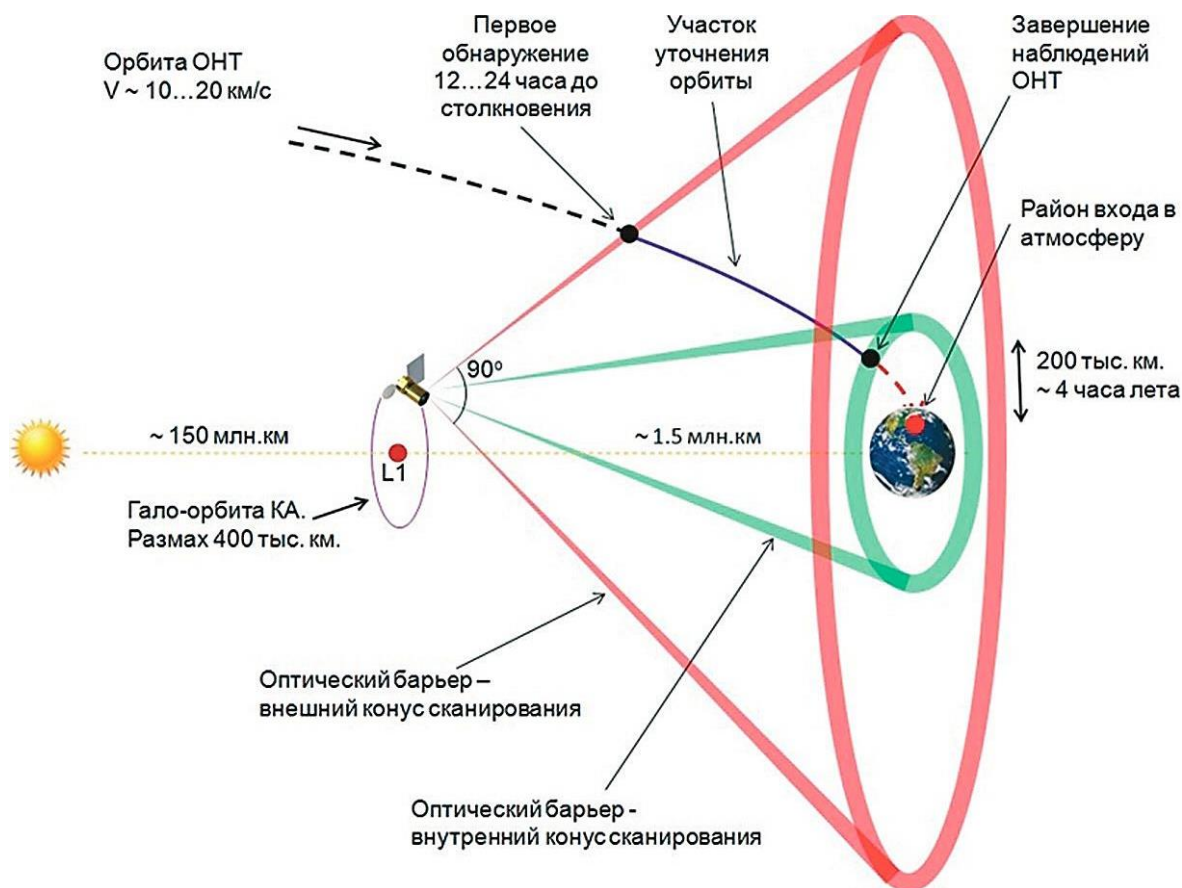


Рис. 2. Концепция системы «СОДА»

Согласно результатам моделирования [8], в ходе работы системы «СОДА» в течение 5 лет будет обнаружено 3 000 ОНТ размером более 10 м, сближающихся с Землей со стороны Солнца. По прогнозам, за 5–10 лет работы будут обнаружены одно-два тела на столкновительных орбитах, для которых будет заблаговременно (4–10 ч) с точностью 10–50 км определена точка входа в атмосферу Земли. За срок активного существования КА «СОДА» сработает по прямому назначению как минимум один раз. Хотя событий, требующих внимания, таких как пролет тел вблизи Земли, будет существенно больше.

Можно сделать вывод, что успешная реализация проекта «СОДА» приблизит Россию к успехам обнаружения ОНТ в других странах. Концепция не предполагает разработки новых технологий – ее выполнение возможно с использованием существующих космических телескопов и КА. Реализацию проекта планируется осуществить в течение 10 лет. Предполагаемый бюджет – около 50 млрд рублей.

Похожая концепция была выдвинута в Институте прикладной математики им. М. В. Келдыша. Концепция «космического патруля», так же направленная на раннее обнаружение ОНТ (представлена в работе [9]), предполагает расстановку на орбите Земли некоторого числа (от 4) космических аппаратов с телескопами. С помощью данной системы за относительно короткое время (5–10 лет) возможно обнаружить и каталогизировать большинство небесных тел диаметром от нескольких сотен метров.

Расчет траекторий ОНТ выполняется известными способами (например, метод Монте-Карло) и сводится к итерационному уменьшению области неопределенности (эллипсоид ошибок) астероида (рис. 3). На каждой итерации, при появлении новых данных об астероиде, область неопределенности уменьшается в размерах. Это может привести к тому, что если изначально в области находилась Земля, то при уменьшении области, планета может оказаться снаружи. Это будет означать отмену угрозы столкновения объекта с Землей.



Рис. 3. Эллипсоид ошибок траектории астероида

Минимизация рисков. После расчета траектории следует этап минимизации рисков для населения и принятия решения об отражении угрозы. Во многих случаях удастся локализовать место столкновения астероида с Землей. К примеру, можно рассмотреть случай астероида 2008ТС3, когда его удалось обнаружить за 20 ч до столкновения, а место падения (Нубийская пустыня) удалось вычислить за 13 ч до столкновения. Была произведена эвакуация населения из опасной зоны и тем самым минимизированы риски. Благодаря раннему обнаружению и большому количеству наблюдающих обсерваторий, разница между фактическими и расчетными параметрами столкновения была незначительной.

Системы и способы противодействия ОСЗ. В случае, если существуют большие риски поражения населения и объектов Земли, имеет смысл разработка систем защиты от опасности. Институтом прикладной астрономии РАН и Государственным ракетным центром им. академика В. П. Макеева предложено несколько вариантов эшелонов противодействия КУ [10, 11]:

1. Дальний эшелон – противодействия на больших расстояниях с временем до столкновения от года до нескольких десятилетий. Включает в себя защиту как от хорошо известных объектов (ОСЗ), так и от объектов с плохо определенными орбитами (нумерованные ОСЗ, короткопериодические кометы).
2. Средний эшелон – противодействие с временем до столкновения не более года. Обеспечивается защита от «объектов непосредственной угрозы» (недавно открытые малые планеты, долгопериодические кометы).
3. Ближний эшелон – противодействие в непосредственной близости от Земли или даже в ее атмосфере. Защита от «объектов неотвратимой угрозы» (неизвестные ОСЗ, долгопериодические кометы, метеороиды типа Тунгусского).

Для каждого из трех эшелонов возможно использование своего способа **противодействия КУ**. В табл. 1 представлена краткая сводка вариантов противодействия КУ, предложенных исследователями разных стран:

Таблица 1

Виды противодействия КУ

Способ	Отражение ОНТ	Разрушение ОНТ	Эшелон
Ядерный взрыв	+	+	Дальний
Передача импульса от КА к ОНТ с помощью кинетического удара	+	+	Средний, ближний
Направленное лазерное излучение	+	+	Дальний
Гравитационный буксир	-	+	Средний
Ракетные ускорители на поверхности ОНТ	-	+	Средний
Покрытие астероида специальными материалами для увеличения солнечного давления	-	+	Дальний
Торможение астероида облаками частиц	-	+	Дальний

Ядерный взрыв может применяться как для разрушения, так и для отклонения ОНТ. При этом его применение целесообразно только на дальних дистанциях, так как на ближнем эшелоне существует вероятность поражения Земли осколками ОНТ или нарушения озонового слоя Земли. В [12] и ряде других работ приведены расчеты мощности заряда для разрушения ОНТ различных размеров. Результаты этих расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Мощность заряда для разрушения ОНТ [12]

Диаметр ОНТ, м	Мощность заряда, Мт	Масса заряда, кг
30	0.003	50
300	3.38	1127
700	20	6000
1000	100	20 000
1500	421	140 330
10 000	125 000	42 000 000

Отклонение ОНТ происходит за счет придания импульса скорости, возникающего вследствие реактивных сил. Результаты расчетов, представленные в работах, показывают, что контактные подрывы ядерных устройств мощностью 10–20 Мт на ОНТ до 2,5 км могут создать приращение скорости 1–2 м/с. При этом контактный подрыв оказывается эффективнее неконтактного. Его эффективность может быть существенно увеличена путем заглубленного подрыва ядерного устройства. По оценкам, проведенным в РФЯЦ – ВНИИТФ, заглубление ядерного устройства на 1–2 м увеличивает приращение скорости в 2 раза, а заглубление на 10–15 м – в 7 раз [12].

Замечено, что раннее обнаружение и отражение ОНТ потребует меньшей энергии взрыва и при этом вызовет большее отклонение ОНТ (рис. 13). Согласно расчетам воздействие на ОНТ заряда 0.1 Мт за 16.6 лет до столкновения аналогично применению заряда 1 Мт за 1.6 лет. Помимо использования меньшего количества взрывчатого вещества, снижается вероятность поражения Земли осколками разорвавшегося астероида и исключается вероятность повреждения озонового слоя Земли.

Учитывая то, что полная масса КА обычно не превышает 2 000 кг, становится очевидно, что доставка заряда на ОНТ является главным ограничением данного подхода противодействия крупным ОНТ.

Для противодействия мелким ОНТ (до 300 метров) допустимо использовать малоэнергетичный ядерный взрыв на ближнем эшелоне. Е. П. Минаков и Б. В. Соколов [14] исследовали варианты размещения и применения моноблочных стационарных наземных средств поражения астероидов и предложили варианты размещения систем поражения астероидов наземного базирования (СПА НБ), обеспечивающих практически равную единице вероятность защиты Земли от астероидов и метеоритов.

Большинство ученых России считают, что для защиты Земли от ОНТ вариант ядерного взрыва вблизи поверхности ОНТ является наиболее эффективным средством [11–19]. При этом можно добиться двух основных типов последствий:

- раздробить космический объект на фрагменты такого размера (< 10–30 м) и придать им такие скорости (> 0.1–1 м/с), что вблизи Земли фрагменты эти окажутся на достаточном расстоянии друг от друга и сгорят в верхних слоях атмосферы, не оказав разрушительного воздействия на ее поверхность;
- придать космическому объекту, не разрушая его, такой импульс, который приведет к изменению его орбиты и обеспечит пролет на безопасном расстоянии от Земли [16].

Так, в работе [19] выделяются два типа ракетно-космических комплексов перехвата (далее – РККП) опасных небесных тел (РККП ОНТ):

1) РККП дальнего перехвата – предназначается для решения задачи перехвата наиболее крупных ОНТ (до 3–4.5 км в диаметре) и оснащается ядерным взрывным устрой-

ством мощностью 10–20 Мт. РККП может быть выполнен с разгонным блоком на основе традиционных двигательных установок или электроракетных двигателей с ядерным источником энергии при ресурсе нахождения на траектории движения к ОНТ до 2–3 лет. Суммарный вес комплекса перехвата (далее – КП) и разгонного блока до 51–65 т позволяет производить запуск КП ракетой-носителем «Энергия»;

2) РККП ближнего перехвата – предназначается для решения задачи разрушения на безопасные фрагменты ОНТ размером до 100–150 м (в перспективе до 500 м), наиболее часто встречающихся с Землей. РККП ближнего перехвата оснащается комплектом кинетического звездообразного проникателя (далее – КЗП) суммарным весом до 10 т и может быть выполнен на основе отработанной двигательной установки традиционного типа, выполняющей функции разгонного блока и двигателя коррекции КП. Суммарный вес КП ближнего перехвата и комплекта КЗП до 21 т позволяет производить запуск КП ракетой-носителем типа «Протон», «Ариан-5», «Ангара» и другими ракетами аналогичной или большей грузоподъемности.

Для безопасного отклонения ОНТ авторы работы [9] предлагают использовать **космический аппарат-перехватчик**, расположенный на окололунном рубеже поражения астероидов. В этом случае, во-первых, возможно поражать астероиды на большом расстоянии ($\approx 384\,400$ км) от Земли; во-вторых, обеспечивать с высокой вероятностью поражение астероидов, движущихся в плоскостях, близких к плоскости экватора (плоскости орбиты) Земли.

Способ отклонения ОНТ с помощью **передачи импульса от КА к ОНТ с помощью кинетического удара** уже принят к тестированию в NASA. Проект AIDA (The Asteroid Impact & Deflection Assessment) – совместный проект ESA-NASA, который включает в себя КА AIM (Asteroid Impact Mission) и КА DART (Double Asteroid Redirection Test) [10].

Оба проекта AIM и DART были одобрены для фазы исследования с начала 2015 года. В 2019 г. аппарат отправится к астероиду Дидим (NEA 65803), которого достигнет в 2022 г. Дидим в этот момент приблизится к Земле на расстояние примерно 11 млн км. Астероид двойной – вокруг него на расстоянии 1.1 км вращается спутник диаметром в 150 м. В этот спутник и должен врезаться на скорости около 6.5 км/с зонд DART массой 300 кг, что, согласно расчетам, приведет к отклонению орбиты спутника.

Ракетные ускорители на поверхности ОНТ, **тормозное облако** и **покрытие ОНТ специальным материалом** для увеличения солнечного давления также сообщают ему дополнительную кинетическую энергию, с той лишь разницей, что передача импульса производится не кратковременно, а в течение продолжительного времени. А значит, применение данного способа недопустимо для обнаруженных ОНТ с прогнозируемым сроком столкновения с Землей менее 2 лет.

Направленное лазерное излучение применяется в концепции DE-STAR, разрабатываемой в Калифорнийском университете. Идея проекта заключается в использовании комплекса последовательно расположенных в космосе лазеров, фокусирующих солнечную энергию на удаленном ОНТ. Система способна одновременно испарять астероид и при этом придавать ему приращение скорости за счет выброса испаряемого вещества. Комплекс лазеров диаметром в 10 км получит достаточно энергии, чтобы всего за год полностью испарить астероид диаметром в 500 м. Небольшие тела DE-STAR сможет уничтожить за считанные дни или даже часы.

Астронавты Эдвард Лу и Стэнли Лав из Космического центра им. Л. Джонсона (NASA) предложили метод **гравитационной буксировки** [12]. Этот метод предусматривает вывод специального аппарата на низкую астероидоцентрическую орбиту вокруг астероида, подлежащего уводу. Такой КА должен быть оснащен реактивными двигателями малой тяги. Идея буксировки использует неподвижное зависание КА над астероидом за счет тяги своих реактивных двигателей (рис. 4).

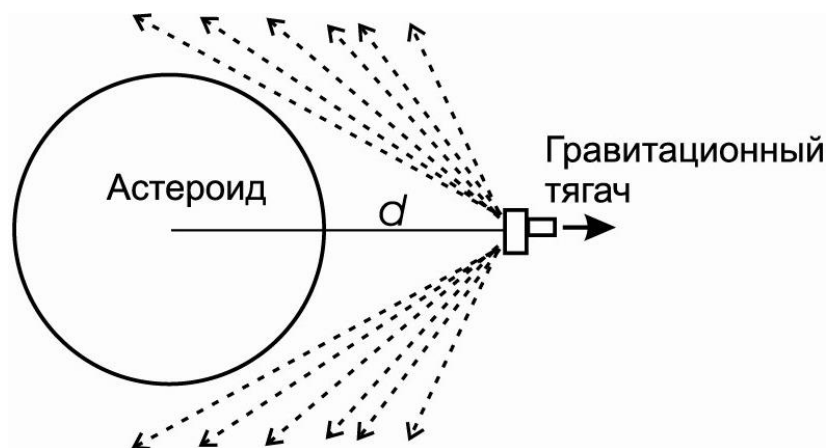


Рис. 4. Гравитационный буксир

Данный способ хоть и требует длительного воздействия и точного поддержания заданной конфигурации, но в то же время обладает рядом преимуществ:

- 1) точный контроль силы и направления воздействия с помощью регулирования положения КА;
- 2) нет необходимости останавливать вращение астероида;
- 3) нет необходимости изучать состав астероида;
- 4) отсутствие какого-либо астероида деления на фрагменты, как в случае с ядерным взрывом;
- 5) возможность реализации проекта существующими технологиями.

В соответствии с прогнозом научно-технологического развития России до 2025 года конечная цель технологического развития оборонно-промышленного комплекса на период до 2025 г. – обеспечение оснащения Вооруженных Сил и других силовых структур новыми образцами, типами и видами вооружения, военной и специальной техники (ВСВТ) в требуемых количествах в заданные сроки, а также сохранение за Россией статуса одного из мировых лидеров в области военно-технического сотрудничества. Разработка СЗЗКУ имеет мировое значение и усиливает статус России в оборонно-промышленной и ракетно-космической областях.

Заключение. На сегодняшний день в мире не существует готовых к эксплуатации систем для защиты Земли от ОНТ. Невозможно отрицать тот факт, что до тех пор, пока такая система не начнет функционировать, Земля находится в опасности.

1. В разных странах ведутся научно-исследовательские работы по разработке систем отклонения траектории движения ОНТ от Земли или безопасного разрушения ОНТ. Большинство ученых России для защиты Земли от космической угрозы склоняются к варианту ядерного взрыва вблизи поверхности ОНТ.

2. Обнаружение астероидов как один из этапов защиты Земли от космических угроз на данный момент развито гораздо в большей степени, чем противодействие. Так, например, уже обнаружено большинство астероидов диаметром больше 1 км. Астероиды меньшего диаметра, особенно приближающиеся к Земле со стороны Солнца, труднее обнаружить существующими системами. По этой причине в России разработан и утвержден проект «СОДА», предназначенный для обнаружения небесных тел диаметром от 10 м, приближающихся со стороны Солнца.

3. Уже на предпроектной стадии создания систем защиты Земли (далее – СЗЗ) необходимо, кроме оценки экономической эффективности, разрабатывать меры эксплуатационного характера, например, определение и обеспечение долговечности СЗЗ как одного из самых важных параметров любой системы.

Литература

1. Галушина Т. Ю. Популяция астероидов, сближающихся с Землей // Вестн. СибГАУ. 2014. № 4. С. 33–40.
2. Пятиметровый астероид упал на Землю. URL: <https://ria.ru/20140102/987728057.html> (дата обращения: 15.11.2019).
3. Челябинцы, пострадавшие от метеорита, получают компенсации от региона. URL: <https://ria.ru/society/20130305/925931198.html> (дата обращения: 15.11.2019).
4. Clark S. Streaking meteor unleashed biggest blast in a century. URL: <https://spaceflightnow.com/news/n1302/15meteor/> (дата обращения: 15.11.2019).
5. Роскосмос: в РФ пока нет технологий, позволяющих поражать астероиды. URL: <https://ria.ru/space/20160120/1362270936.html> (дата обращения: 15.11.2019).
6. Лебедев В. В. Готовность России к защите от астероидной опасности // Берегиня. 777. Сова: Общество. Политика. Экономика. 2013. № 3 (18), С. 134–141.
7. The International Astronomical Union Minor Planet Center (MPC) // List of Potentially Hazardous Asteroids (PHAs) URL: <https://minorplanetcenter.net/iau/lists/PHAs.html> (дата обращения: 07.11.2019).
8. Зверева М. А., Нароенков С. А., Шугаров А. С., Шустов Б. М. Космическая система обнаружения опасных небесных тел, приближающихся к Земле с дневного неба («СОДА») // Космич. исслед. 2018. № 56. С. 300–310.
9. Энеев Т. М., Ахметшин Р. З., Ефимов Г. Б. К вопросу об астероидной опасности // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2011. № 35. 40 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2011-35> (дата обращения: 15.11.2019).
10. Железнов Н. Б. Астероидно-кометная опасность. URL: http://iaaras.ru/media/practice/zheleznov_ach_2018.pdf (дата обращения: 07.11.2019).
11. Калашников С. Т. Возможности ракетно-космических комплексов для уменьшения угрозы астероидно-кометной опасности : доклад. URL: <http://www.niini.ru/upload/iblock/6a9/6a95b7527bc08bf863e8ef0158494d75.pdf> (дата обращения: 15.11.2019).
12. Артемьева Н. А., Баканас Е. С., Барабанов С. И., Витязев А. В., Волков В. А. [и др.] Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра : моногр. М. : Физико-математ. лит., 2010. 384 с.
13. Сазонов В. С. Взрыв как средство отклонения от земли опасных небесных тел при их раннем и позднем обнаружении // Эколог. вестн. науч. центров Черномор. экономич. сотрудничества. 2013. № 4. С. 118–122.
14. Минаков Е. П., Соколов Б. В. Исследования характеристик размещения и вариантов применения моноблочных стационарных наземных средств поражения астероидов // Тр. СПИИРАН. 2016. № 5. С. 182–197.
15. Шустов Б. М. Астероидно-кометная опасность, проблема и решения. URL: <http://www.sai.msu.su/EAAS/coll/shustov.pdf> (дата обращения: 11.10.2019).
16. Минаков Е. П., Соколов Б. В., Шалдаев С. Е. Исследование характеристик и вариантов применения околунной системы поражения астероидов // Тр. СПИИРАН. 2017. № 5, С. 106–129.
17. Кошкин Р. П. Потенциальные угрозы из космоса и планы по его освоению. Применение сверхтяжелых ракет-носителей // Аналит. материалы. Вып. 4. М. : Стратегич. приоритеты, 2014. 40 с.
18. Нечай В. З., Ногин В. Н., Петров Д. В., Симоненко В. А., Шубин О. Н. Ядерный взрыв вблизи поверхности астероидов и комет // Космическая защита Земли. Изв. Челябинск. науч. центра. Спец. вып. 1997. С. 179–182.
19. Алексеев А. С., Величко И. И., Волков В. А., Ведерников Ю. А. Ракетная концепция противометеоритной защиты земли // Космич. защита Земли. Изв. Челябинск. науч. центра. Спец. вып. 1997. С. 55–77.

УДК 004.052

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ОЦЕНКЕ НАДЕЖНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ЦЕНТРА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

И. Д. Гуз

Сургутский государственный университет,
idguzzz@gmail.com

В статье даны определения центра обработки данных, отказоустойчивости, доступности информации; описаны способы оценки стоимости вынужденного простоя для компании; выполнен расчет показателей доступности информации и показателей надежности. Целью работы является анализ надежности элементов инфраструктуры центра обработки данных на основе эксплуатационных данных. Основным свойством, которым должен обладать центр обработки данных высокого уровня надежности, является отказоустойчивость, которая оценивается при помощи показателей доступности информации. При анализе доступности информации оценивались частота отказов компонентов и среднее время ремонта, определяемые в понятиях среднего времени безотказной работы и среднего времени восстановления. После обработки входных данных были рассчитаны средний период доступности информации и средний период простоя в год.

Ключевые слова: центр обработки данных, отказоустойчивость, доступность, сбой, простой, среднее время безотказной работы, среднее время восстановления, период доступности информации.

ON CERTAIN APPROACH TO ASSESSMENT OF RELIABILITY FOR DATA CENTER EQUIPMENT

I. D. Guz

Surgut State University,
idguzzz@gmail.com

The article gives definitions to the data center, fault tolerance, information availability, and describes methods for estimating the cost of forced downtime for a company. The calculations for the indicators of information availability and reliability indicators are made. The aim of the study is to analyze the reliability of the data center infrastructure elements based on operation data. The main property that a data center of a high level of reliability must have is the fault tolerance. Fault tolerance of data center is assessed using information accessibility indicators. The component of the failure rate (mean time to failure) and the average repair time (mean time to recovery) are assessed during the analysis of the information availability. After processing the input data, the average information availability period and the average downtime per year are calculated.

Keywords: data center, fault tolerance, availability, failure, downtime, meant time to failure, mean time to recovery, information availability period.

Введение. В наши дни без непрерывного доступа к информации невозможно обеспечить должное проведение бизнес-операций. Очень велика цена недоступности информации, так как даже час простоя в ключевых отраслях промышленности грозит миллионными убытками.

В современных условиях наличие развитой и гибкой в управлении IT-инфраструктуры является залогом успешной деятельности в любой сфере, так как информационные инфраструктуры позволяют решать как текущие, так и глобальные бизнес-задачи. Разветвленная структура IT-систем и необходимость в автоматизации бизнес-процессов требуют создания

дата-центров для обработки и хранения информации, которые дают возможность эффективно управлять всеми ресурсами компании, грамотно их распределять и принимать своевременные решения. К системам хранения и обработки данных сегодня предъявляются особые требования, основными из которых являются адаптация под меняющиеся условия бизнеса, повышение надежности хранения информации, способность работать с большими объемами информационных ресурсов и сокращение затрат на обслуживание дата-центров [1].

Целью работы является анализ надежности элементов инфраструктуры центра обработки данных (далее – ЦОД) на основе эксплуатационных данных.

Характеристики отказоустойчивости ЦОД. Центр обработки данных (или дата-центр) – это комплекс взаимосвязанных элементов, включающий в себя вычислительные компоненты, элементы IT-инфраструктуры, строительных и инженерных систем. Его основными задачами являются хранение, обработка и передача информации. В дата-центре на небольшой площади сосредоточены мощные вычислительные ресурсы: серверы и системы хранения данных (далее – СХД), обеспечивающие хранение и обработку информации; сетевое оборудование, поддерживающее непрерывный обмен данными внутри ЦОД, а также связь с внешними потребителями; инженерные системы, системы безопасности, системы мониторинга и диспетчеризации, гарантирующие эффективную работу и защиту вычислительного центра [2].

Основным свойством, которым должен обладать ЦОД высокого уровня надежности, является отказоустойчивость. Отказоустойчивость – свойство технической системы сохранять свою работоспособность после отказа одного или нескольких составных компонентов. Высокий уровень отказоустойчивости достигается уменьшением количества «узких мест» в инфраструктуре ЦОД с помощью:

- резервирования физических и виртуальных компонентов ЦОД;
- применения специализированного программного обеспечения, позволяющего избежать или минимизировать простои систем;
- создания резервных копий баз данных и операционных систем.

Отказоустойчивость ЦОД оценивается при помощи показателей доступности информации. Под доступностью информации понимается возможность инфраструктуры, занимающейся ее обработкой, функционировать в течение временного периода, требуемого для выполнения определенной операции. Доступность информации обеспечивает пользователям беспрепятственный доступ к информации в любой необходимый момент времени [3].

Для обеспечения надежности основные системы ЦОД обычно резервируются, т. е. не устанавливаются в единственном экземпляре. Например, система электропитания ЦОД должна иметь вводы от двух подстанций системы электроснабжения, а для большей надежности устанавливаются дизель-генераторы и батареи на случай полного отключения электропитания в районе расположения ЦОД. Следует заметить, что аналогичным образом резервируются также и элементы сетей связи телекоммуникационных операторов.

Виртуальная инфраструктура предназначена для распределения и диспетчеризации физических вычислительных ресурсов между виртуальными машинами, используемыми для доступа к терминальным приложениям.

Виртуальная инфраструктура позволяет решить следующие задачи:

- обеспечение высокой доступности серверов и приложений;
- уменьшение количества серверного оборудования за счет увеличения коэффициента использования серверных ресурсов;
- уменьшение затрат на энергопотребление оборудования и уменьшение затрат на охлаждение оборудования ввиду консолидации различных физических серверов на меньшем количестве серверов виртуализации;
- быстрое восстановление серверов и приложений после системных ошибок.

Архитектура гипервизора обеспечивает:

- оптимизацию производительности виртуальной среды;
- быстрое развертывание, запуск и перезагрузку виртуальных машин.

Подключение серверного оборудования по принципу plug-and-play обеспечивает мгновенное наращивание ресурсов для предоставления мощностей по требованию.

Для подключения виртуальных машин к локальной сети на серверах виртуализации эмулируются сетевые коммутаторы. Для виртуального коммутатора доступно создание трех типов сетей:

- внешняя сеть – позволяет виртуальным машинам взаимодействовать с внешними сетями и хостом. При создании внешней сети гипервизор создает виртуальный коммутатор, к которому могут подключаться как виртуальные машины, так и хост посредством виртуальных сетевых адаптеров. Физический адаптер при этом отключается от хоста и становится портом виртуального коммутатора, через который происходит подключение к внешней сети;

- внутренняя сеть – предназначена для взаимодействия хоста и виртуальных машин без доступа к внешним сетям. При создании внутренней сети гипервизор создает виртуальный коммутатор, к которому подключаются хост и виртуальные машины посредством виртуальных сетевых адаптеров. Адаптеры должны быть настроены в соответствии с настройками виртуальной сети [4];

- частная сеть – предназначена для создания изолированных участков сети. При создании частной сети гипервизор создает виртуальный коммутатор, к которому могут подключаться только виртуальные машины. От хоста виртуальный коммутатор изолирован. В этом случае связь между внешней и частной сетью будет осуществляться через выделенную виртуальную машину, которая должна быть подключена к обеим сетям.

Причинами недоступности информации, как правило, являются различные запланированные и незапланированные события. К запланированным простоям относятся установка, сервисное обслуживание оборудования, профилактические работы, обновление операционных систем и программ, резервное копирование, восстановление данных, перенос программ из среды тестирования в среду продуктивную и т. д. Незапланированными простоями являются сбои, произошедшие по вине персонала, потеря данных, выход из строя физических и виртуальных составляющих. Кроме того, природные или техногенные катастрофы, такие как наводнения, пожары, землетрясения, также нередко становятся причинами незапланированных сбоев [5].

Возможные аварийные ситуации вычислительного кластера. Режим работы с недоступностью части функционала системы характеризуется отказом на уровне одной из функциональных подсистем:

- отказ подсистемы вычислений;
- отказ подсистемы визуализации;
- отказ подсистемы резервного копирования;
- отказ подсистемы мониторинга;
- отказ подсистемы управления аппаратным обеспечением.

Причиной неработоспособности на уровне функциональной подсистемы может быть как отказ компонентов подсистемы, так и отказ одной из технических подсистем комплекса, а именно:

- отказ сети передачи данных будет иметь последствия в виде неработоспособности подсистемы вычислений;
- отказ сети управления будет иметь последствия в виде неработоспособности подсистемы управления аппаратным обеспечением.

Также возможны ситуации с ограничением функциональности в границах отдельных подсистем, например:

- отказ сети управления будет иметь последствия в виде ограничений в функциональности подсистемы вычислений и подсистемы мониторинга;

- сбой в работе одного из модулей пакета программного обеспечения подсистемы.

Режим полной неработоспособности системы характеризуется недоступностью функционала двух ключевых функциональных подсистем одновременно – вычислительного кластера и подсистемы визуализации. Такая ситуация возможна по следующим причинам:

- отказ системы хранения данных (недоступность данных для проведения расчетов и результатов уже выполненных расчетов приводит к невозможности выполнения кластером и подсистемой визуализации своих функций);

- отказ продуктивной сети в целом (приводит к невозможности осуществления продуктивного информационного взаимодействия между всеми техническими компонентами системы).

Вычислительная система переводится в режим проведения регламентного технического обслуживания с целью выполнения мероприятий, направленных:

- на снижение вероятности возникновения сбоев и отказов;

- устранение обнаруженных уязвимостей программного обеспечения путем установки обновлений операционной системы (далее – ОС) и программного обеспечения, установленного в ОС;

- устранение обнаруженных уязвимостей аппаратного обеспечения путем установки обновлений микрокода оборудования (BIOS, микрокода плат ввода\вывода);

- изменение функциональности комплекса;

- повышение эффективности работы комплекса.

Переход в режим регламентных работ осуществляется в плановом порядке. В данном режиме допускается полная или частичная потеря производительности, функциональности и доступности комплекса в зависимости от характера производимых изменений.

В системе хранения данных возможны различные аварийные ситуации, например выход из строя отдельных накопителей. В этом случае СХД автоматически инициирует подмену вышедшего из строя накопителя на аналогичный из назначенного конкретной RAID-группе SparePool. Далее запустится процесс восстановления информации на новом накопителе. После исключения системой неисправного накопителя из RAID-группы от администратора требуется заменить вышедший из строя накопитель на исправный.

Статистические данные сбоев и отказов ЦОД. На рис. 1 представлена статистика потерь данных и их причины по данным Ассоциации защиты информации (далее – АЗИ) Российской Федерации.

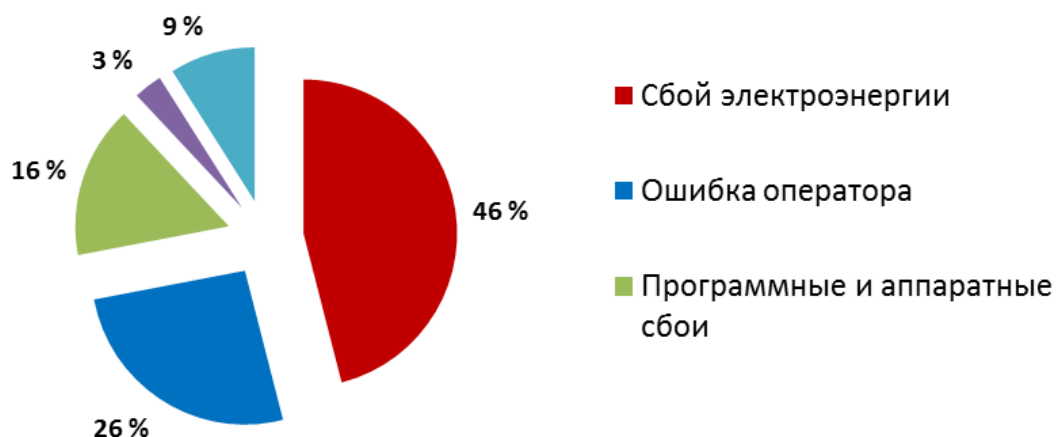


Рис. 1. Статистика потерь данных и их причины

По данным аналитического агентства «ИКС-Консалтинг» [6] была собрана статистика отказов ЦОД компании «РТК-ЦОД», расположенного в г. Екатеринбурге, за 2015–2018 гг. Данные статистики отказов представлены в табл. 1–3, а также на диаграмме (рис. 2).

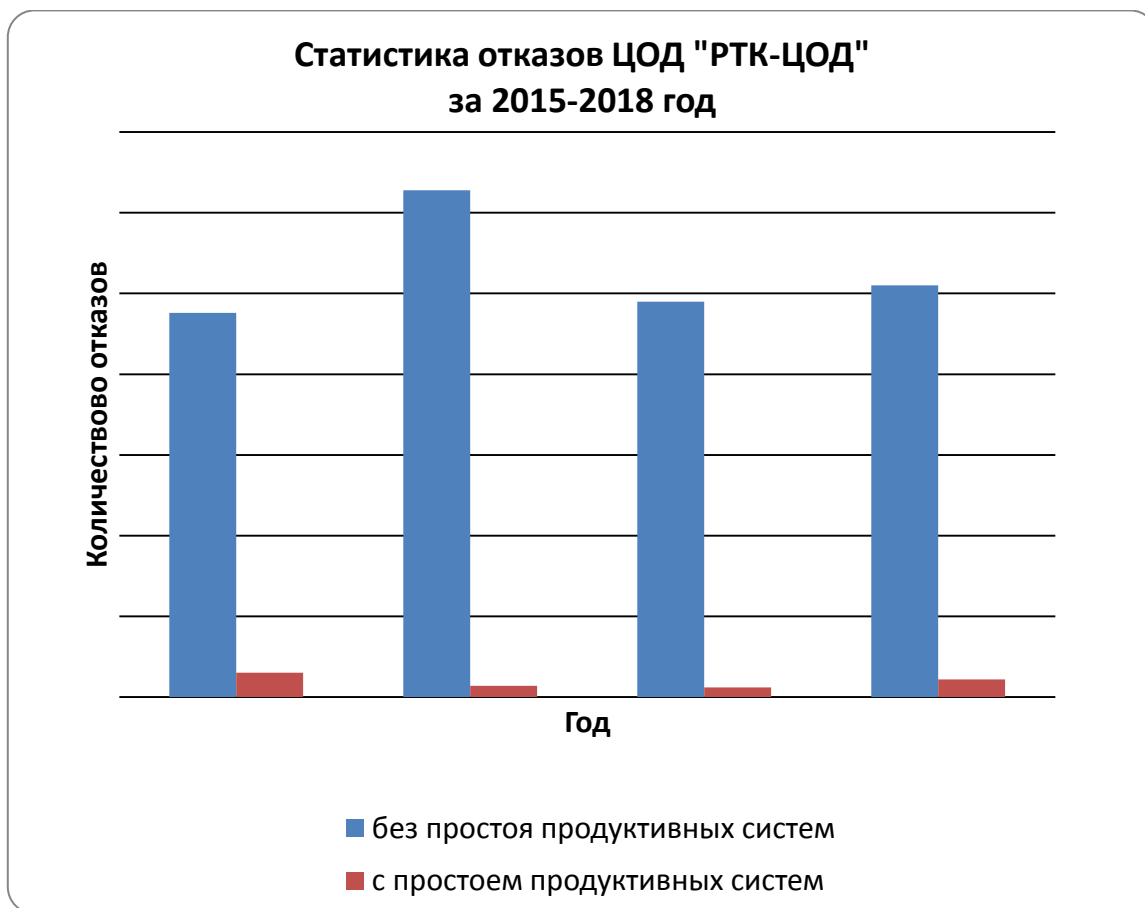


Рис. 2. Диаграмма статистики отказов ЦОД компании «РТК-ЦОД» за 2015–2018 гг.

Таблица 1

Статистика отказов продуктивных систем

Отказы	2015	2016	2017	2018
Без простоя продуктивных систем	238	314	245	255
С простоем продуктивных систем	15	7	6	11
Всего	253	321	251	266

Таблица 2

Статистика сбоев физических компонентов

Тип ситуации	Без простоя	С простоем	Всего
Выход из строя жесткого диска	471	0	471
Неисправность ленточной библиотеки	61	0	61
Выход из строя модуля (платы, процессора, контроллера)	74	7	81
Неисправность блока питания, батареи, вентиляторов	88	0	88
Неисправность коммутатора	29	2	31
Сбой кондиционера	60	1	61
Ошибки программного обеспечения (микрокода, операционной системы, приложения)	92	22	114
Сбой источника бесперебойного питания, бросок питания	143	1	144
Повышение температуры в помещении	5	1	6
Пропадание питания на удаленных площадках	29	5	34

**Данные по единицам оборудования, периодам работы
и простоям ЦОД компании «РТК-ЦОД»**

Показатели	Количественные данные
Всего единиц оборудования	463
Отказы с простоем	39
Период работы 2015–2018 гг., час	35040
Период простоя 2015–2018 гг., час	49,98

Методика расчета стоимости вынужденного простоя. Вынужденные простои приводят к потерям дохода предприятия, а также наносят огромный урон репутации компании. Потери доходов влекут за собой компенсационные выплаты, оплату счетов клиентов за понесенные убытки, потерю инвестиций. Кроме того, простои отрицательно сказываются на репутации компании, что влечет за собой потерю доверия со стороны клиентов и партнеров по бизнесу.

Влияние простоя на доходы предприятия оценивается такими показателями, как средняя стоимость простоя в час (далее – C_{np}), средняя потеря продуктивности в час (далее – P_{nom}), средняя потеря дохода в час (далее – D_{nom}), которые вычисляются по формулам [7]:

$$C_{np} = P_{nom} + D_{nom}, \quad (1)$$

$$P_{nom} = \frac{C_{зн}}{T_{раб}}, \quad (2)$$

где $C_{зн}$ – общая сумма зарплат и пособий всех работников за неделю;

$T_{раб}$ – среднее количество рабочих часов в неделю;

$$D_{nom} = \frac{D_{орг}}{T_{бизнес}}, \quad (3)$$

где $D_{орг}$ – общий доход организации за неделю;

$T_{бизнес}$ – среднее количество часов в неделю, когда организация открыта для бизнес-операций.

Расчет показателей доступности информации. Доступность информации зависит от доступности физических и виртуальных компонентов дата-центра. При анализе доступности информации оцениваются частота отказов компонентов и среднее время ремонта, которые определяются в понятиях среднего времени безотказной работы и среднего времени восстановления.

Под средним временем безотказной работы (далее – $T_{без}$) понимается период времени, в течение которого система или компонент ЦОД может выполнять свои функции без сбоев.

Под средним временем восстановления (далее – $T_{восст}$) понимается период времени, в течение которого можно восстановить отказавший компонент.

При вычислении $T_{восст}$ предполагается, что неисправность (физический дефект на компонентном уровне, способный привести к недоступности данных) обнаружена и необходимые детали и персонал доступны. На рис. 3 представлена диаграмма доступности информации, описывающая процессы устранения неисправности компонентов ЦОД [8].

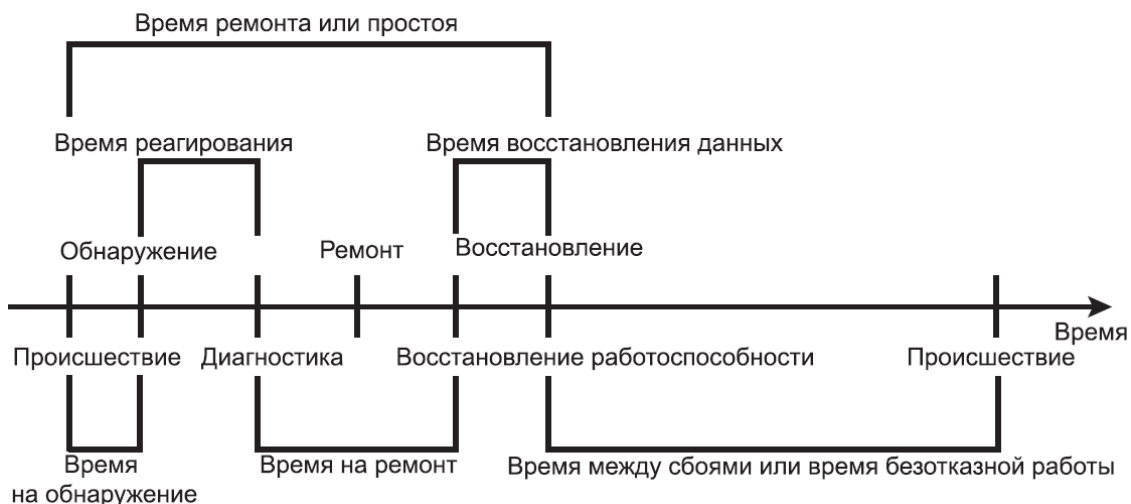


Рис. 3. Диаграмма доступности информации

Повышение готовности информационной системы – один из способов снижения времени ее простоя. Коэффициент готовности ($T_{\text{дост}}$) – это выраженное в процентах отношение времени, когда система предоставляет сервисы своим пользователям, к общему времени работы системы, вычисляется по формуле:

$$T_{\text{дост}} = \frac{T_{\text{без}}}{T_{\text{без}} + T_{\text{восст}}} \times 100\%. \quad (4)$$

Значение коэффициента готовности в течение года основано на конкретных требованиях к своевременности предоставления рассматриваемой службы.

По данным, приведенным в табл. 1–3, по выражению (4), а также по выражениям, приведенным в [9], были рассчитаны показатели доступности информации (табл. 5).

Таблица 5

Показатели доступности информации

Показатели	Количественные данные
Период безотказной работы, час	34990,017
Коэффициент готовности ($T_{\text{дост}}$), %	99,857
Средний период простоя в год, час	12,496
Коэффициент простоя, %	0,143
Среднее время безотказной работы ($T_{\text{без}}$), час	897,180
Среднее время восстановления ($T_{\text{восст}}$), час	1,282

Выводы. После обработки входных данных были рассчитаны коэффициент готовности (4) – 99,8 %, средний период простоя в год – 12,5 часов. Таким образом, из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. ЦОД компании «РТК-ЦОД» имеет высокий уровень надежности, и, следовательно, обладает всеми необходимыми системами восстановления после сбоев.

2. При наличии данных о численности работников компании, средней заработной плате и среднем доходе предприятия по выражениям (1), (2) и (3) можно вычислить стоимость 1 часа простоя продуктивных систем и стоимость среднего периода простоя в год.

3. Необходимо пересмотреть статистику сбоев и отказов, определить самые длинные периоды простоя и принять меры по предотвращению долгих и непредвиденных отказов путем использования технологий резервирования продуктивных систем, закупки нового оборудования и т. д.

Литература

1. Басина Н. Д. Центры обработки данных: существенные факты // СЮ. 2015. № 2. С. 5–9.
2. Губарева Т. В., Патрусова А. М. Центры обработки данных в Российской Федерации // Проблемы социал.-экономического развития Сибири. 2015. № 2. С. 16–23.
3. Вильчинский Н. В. От хранения данных к управлению информацией. СПб. : Питер, 2016. 544 с.
4. Сэвилл Д. Знакомимся с Hyper-V в Windows Server 2012 // WINDOWS IT PRO/RE. 2013. № 8. С. 58.
5. Гоменюк А. Р., Сопенко С. И. Строим центр обработки данных // Корпоратив. системы. 2017. № 5. С. 6–11.
6. Облачный провайдинг 2014–2018: экономика, стратегии, бизнес-модели. URL: <http://www.iksconsulting.ru/reports-91.html> (дата обращения: 15.09.2019).
7. Джош Дзад Основы проектирования SAN. М. : Brocade Россия и СНГ, 2008. 589 с.
8. Таненбаум Э., Уэзеролл Д. Современные компьютерные сети. Изд. 5-е. СПб. : Питер, 2015. 960 с.
9. Острейковский В. А. Теория надежности. М. : Высш.шк., 2003. 463 с.

УДК 519.2:519.67

**АНАЛИЗ НЕСМЕЩЕННОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЦЕНОК
ЧАСТОТ ВСТРЕЧАЕМОСТИ СЕТЕВЫХ МОТИВОВ
В СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДАХ РАСЧЕТА**

М. Н. Юдина

*Омский государственный технический университет,
mg-and-all@mail.ru*

Рассмотрены статистические методы расчета частот встречаемости сетевых мотивов, в частности метод случайного выбора ребра, метод Верника – Раше, метод случайной выборки каркасов и комбинированный метод случайной выборки каркасов. Выполнен сравнительный анализ по показателям качества исследуемых статистических методов. Для комбинированного метода случайной выборки каркасов выведены математические выражения, позволяющие получить состоятельные, несмещенные и эффективные оценки частот встречаемости 4-мотивов.

Ключевые слова: статистические методы расчета, сетевые мотивы, несмещенные эффективные статистические оценки.

**ANALYSIS OF UNBIASED AND EFFECTIVE ESTIMATES FOR NETWORK MOTIFS
FREQUENCIES BY STATISTICAL METHODS OF CALCULATING**

M. N. Yudina

*Omsk State Technical University,
mg-and-all@mail.ru*

The article describes statistical methods for calculating network motifs frequency of occurrences. In particular, the Edge Sampling method, the method by S. Wernicke and F. Rasche, the method of random sampling of frames and the mixed method of random sampling of frames are analyzed. A comparative analysis of the quality indicators of the investigated statistical methods is done. For the mixed method of random sampling of frames, the mathematical expressions that allow obtaining consistent, unbiased, and effective estimates of frequencies for the 4-motifs are derived.

Keywords: statistical methods, network motifs, unbiased effective statistical estimates.

Введение. В «Науке о сетях» большое распространение получил подход, заключающийся в анализе частот встречаемости сетевых мотивов [1–3].

Множество всех возможных попарно неизоморфных связных графов на трех вершинах называется множеством сетевых мотивов на трех вершинах (3-мотивов). Множество всех попарно неизоморфных связных графов на четырех вершинах называется множеством сетевых мотивов на четырех вершинах (4-мотивов). Так, на рис. 1 представлено множество 4-мотивов в неориентированном графе.

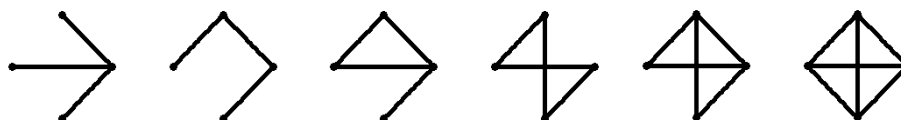


Рис. 1. Все возможные 4-мотивы на в неориентированном графе

Как правило, целью анализа является поиск таких сетевых мотивов, которые встречаются в графе G чаще, чем в рандомизированных версиях этого же графа G , т. е. поиск статистически значимых сетевых мотивов.

Задачу нахождения значимых сетевых k -мотивов в графе G можно разбить на три подзадачи:

1. Получение множества G_R рандомизированных версий графа G .
2. Подсчет в графе G и в каждом графе множества G_R частот встречаемости k -мотивов (при этом решается задача распознавания изоморфизма каждого найденного связного подграфа на k -вершинах одному из k -мотивов).
3. Расчет значимости сетевых мотивов на основе их встречаемости в графе G и в графах множества G_R .

Существует большое разнообразие программ, позволяющих рассчитывать частоты встречаемости сетевых мотивов. Некоторые из этих программ позволяют оценивать значимость сетевых мотивов. Среди таких программ следует назвать MFinder [2] (2003 год создания), Mavisto [4] (2005), Fanmod [5] (2006), NeMoFinder [6] (2006) и более поздняя реализации того же функционала в программе LaMoFinder, Kavosh [7] (2009), библиотека igraph для системы R (2013), AccMotif [8] (2013), MotifNet [3] (2017). Все перечисленные программы не позволяют за приемлемое время рассчитывать частоты встречаемости сетевых мотивов больших графов. Так, в работах [2, 4, 6–8], в которых предлагаются новые алгоритмы точного расчета 4-мотивов, исследуемым графом с наибольшим числом вершин является граф Foldoc. При этом граф Foldoc содержит всего 12 905 вершин и 109 092 дуги и описывает сеть терминов онлайн-библиотеки <http://www.foldoc.org/>. Узлы сети представляют собой термины онлайн-библиотеки, связь (X, Y) от термина X к Y существует, если термин Y используется для описания термина X . При расчетах на моноблоке HP Z1 с тактовой частотой 3,3 ГГц и 8 ГБ оперативной памяти наиболее быстрой из рассмотренных программ потребовалось следующее время для расчета: Kavosh – 559 с, Fanmod – 580 с, функции motifs библиотеки igraph – 18 с, программе AccMotif – 6 с. Из этих результатов следует, что самой быстрой является программа AccMotif. Но более тщательное экспериментальное исследование показало, что программа AccMotif требует значительно большего объема оперативной памяти, чем аналоги. При использовании указанной выше конфигурации оборудования программа AccMotif не позволяет эффективно работать с графами, содержащими более двадцати тысяч вершин, из-за недостатка оперативной памяти, таким образом, AccMotif не может работать с большими графами.

Отметим, что основной вычислительной проблемой при расчете значимых сетевых мотивов является сложность расчета частот встречаемости сетевых мотивов, а не генерация рандомизированных графов. Даже при использовании наиболее быстрых программ, позволяющих рассчитывать частоты встречаемости сетевых мотивов, требуется неприемлемо большое время.

Основные понятия. Введем следующие понятия. Реализацией i -го сетевого мотива в графе назовем подграф, полученный в результате статистического эксперимента для расчета частот встречаемости сетевых мотивов и изоморфный i -му сетевому мотиву. Пусть S – множество всех реализаций сетевых мотивов, содержащих заданное число k -вершин графа G . Множество S можно разбить на подмножества $S_i(G)$, в каждом из которых содержатся реализации i -го сетевого мотива в графе G , $i \in X$, где X – множество сетевых мотивов. Таким образом, относительная частота встречаемости i -го сетевого мотива:

$$C_i(G) = \frac{|S_i(G)|}{|S(G)|} = |S_i(G)| \times \left(\sum_{j \in X} |S_j(G)| \right)^{-1}.$$

Для множества S реализаций k -мотивов, случайным образом взятых в G по некоторому алгоритму A , отображение $\hat{C}_i^A : (S, G \rightarrow [0,1])$ называется статистической оценкой относительной частоты встречаемости $C_i(G)$ сетевого мотива i , полученной при использовании алгоритма A . Отображение $\hat{n}_i^A : (S, G \rightarrow \{0, 1, \dots\})$ называется статистической оценкой абсолютной частоты $|S_i(G)|$ встречаемости i -го сетевого мотива в графе G .

Будем говорить, что полученные при использовании алгоритма A статистические оценки \hat{C}_i^A или \hat{n}_i^A несмещенные, если математическое ожидание оценки $M(\hat{C}_i^A) = C_i(G)$ или $M(\hat{n}_i^A) = |S_i|$.

Будем говорить, что статистические оценки являются состоятельными при использовании A , если при достаточно больших значениях объема выборки оценки \hat{C}_i^A или \hat{n}_i^A сходятся к истинному значению $C_k^i(G)$ и $|S_i|$ соответственно.

Будем говорить, что статистические оценки \hat{C}_i^A или \hat{n}_i^A являются эффективными, если они имеют наименьшую дисперсию среди всех соответствующих несмещенных оценок, вычисленных по выборкам одного и того же объема.

Метод случайного выбора ребра. Рассмотрим метод случайного выбора ребра (далее – СВР), предложенный Каштаном и соавторами в работе [9], для получения статистических оценок $\hat{C}_k^{CBP}(S, G)$ относительных частот встречаемости сетевых мотивов.

Метод СВР основан на реализации случайного процесса, который начинается с равновероятного выбора ребра. Далее из ближайшего окружения вершин $Nei(\{u, v\})$, инцидентных выбранному ребру $\{u, v\}$, выбирается третья вершина. Потом из ближайшего окружения этих трех вершин – четвертая и т. д. до получения реализации сетевого мотива желаемого размера k . Алгоритм, реализующий метод СВР, представлен на рис. 2.

НАЧАЛО

Ввод: граф $G = (V, E)$,

N – число опытов для расчета относительных частот встречаемости k -мотивов

Вывод: Счетчики $C[i]$ частот встречаемости мотива $i \in X$, где X – множество мотивов

1. Для всех $i \in X$ делай: $C[i] \leftarrow 0$

2. Для всех $j = 1, N$ делай

2.1. $\{u, v\} \leftarrow$ получить случайное ребро из E

2.2. $V' \leftarrow \{u, v\}$

2.3. Пока $|V'| \neq k$ делай

2.4. $\{u, v\} \leftarrow$ получить случайное ребро между V' и $Nei(V')$

2.5. $V' \leftarrow V' \cup \{u, v\}$

2.6. $Num = GetISO[G[V']]$ // получить класс изоморфизма $Num \in X$

2.7 $C[Num] = C[Num] + 1$

3. Для всех $i \in X$ делай $C[i] = C[i]/N$

КОНЕЦ

Рис. 2. Алгоритм, реализующий метод СВР

Заметим, что метод СВР является первым статистическим методом расчета частот встречаемости сетевых мотивов, но при использовании метода СВР одни сетевые мотивы систематически находятся чаще других [10], что привело к появлению алгоритмов, позволяющих уменьшить величину «смещения» [11].

Рассмотрим «смещение» получаемых оценок относительных частот встречаемости «треугольников» (полный граф на трех вершинах) при расчетах графа, изображенного на рис. 3.

Число реализаций сетевых мотивов на трех вершинах в графе на рис. 3 равно 15, причем только одна из этих реализаций является «треугольником». Очевидно, что истинное значение относительной частоты встречаемости сетевого мотива «треугольник» $C_{\Delta}^{CBP} = 1/15$.

Если же посчитать математическое ожидание относительной частоты встречаемости «треугольников», то получим $M(\hat{C}_{\Delta}^{CBP}) = 1/7 \cdot 1 + (2/7) \cdot (2/6) = 5/21$.

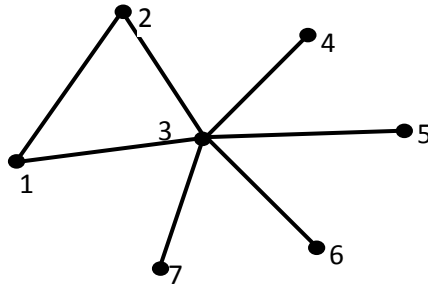


Рис. 3. Изображение графа, содержащего 15 реализаций 3-мотивов, среди которых один «треугольник»

Действительно, если в результате выполнения шага 2.1 алгоритма, реализующего метод СВР (рис. 2), будет выбрано ребро (1, 2), что произойдет с вероятностью $1/7$, то на следующих шагах алгоритма (шаги 2.2–2.6) с вероятностью, равной единице, будет найден сетевой мотив «треугольник». Если будет выбрано ребро (1, 3) или (2, 3), что может произойти с вероятностью $2/7$, то для получения реализации «треугольника» необходимо, чтобы на следующих шагах алгоритма было выбрано ребро (1, 2) или (2, 3) в первом случае и ребро (1, 2) или (1, 3) – во втором. Каждый такой выбор возможен с вероятностью $2/6$.

Поскольку $C_{\Delta}^{CBP} \neq M(\hat{C}_{\Delta}^{CBP})$ оценка частот встречаемости сетевых мотивов методом СВР является смещенной.

Метод Верника – Раше. Для перечисления всех сетевых мотивов размера k в графе $G = (V, E)$ в работе [5] предложен метод, который будем называть методом Верника – Раше по фамилиям его авторов. Также в работе [5] предложена статистическая версия метода, которую будем называть статистическим методом Верника – Раше. Чтобы лучше описать эти методы, необходимо использовать ряд соглашений. Во-первых, положим, что все вершины графа G помечены целыми числами. Для вершин v и множества $V' \subset V$ окрестность исключения N_{ext} вершины v относительно V' определяется как $N_{\text{ext}}(v, V') = \text{Nei}(\{v\}) \setminus \text{Nei}(V')$. Иначе говоря, окрестность исключения – это множество тех вершин, которые входят в окрестность вершины v , но не являются смежными какой-либо вершине из множества V' .

Рассмотрим алгоритм метода Верника – Раше на рис. 4. В алгоритме рассчитываются частоты встречаемости k -мотивов. Работа алгоритма начинается с перебора всех вершин i графа G , $i = 1, |V|$; эти вершины добавляются в соответствующие множества V_{sub} . После выполнения строки 3 алгоритма в каждом таком множестве V_{sub} содержится одна вершина (на рис. 5 обозначение V_{sub}^i означает, что множество V_{sub} содержит вершину i). В дальнейшем во множествах V_{sub} будут содержаться две, три и т. д. вершины, входящие в соответствующие реализации сетевых мотивов. Для добавления новых вершин во множества V_{sub} используется вспомогательное множество V_{ext} , в которое на первом шаге добавляются все вершины из ближайшего окружения вершины $i - \text{Nei}(v_i)$, причем номер добавленной в V_{ext}^i вершины должен быть больше, чем i . Далее работа алгоритма выполняется рекурсивно. На каждом шаге рекурсивного вызова функции (см. функцию ExtendSubgraphs на рис. 4) происходит расширение множества V_{sub} . Расширение множества V_{sub} выполняется, пока число элементов в нем не достигнет значения k (т. е. найдена очередная реализация сетевого мотива) или пока множество V_{ext} не станет пустым. Получаемые множества V_{sub} можно представить в виде корневого дерева Верника – Раше. На первом ярусе дерева Верника – Раше в множествах V_{sub}^i задаются все реализации связных подграфов на одной вершине, на втором – на двух вершинах V_{sub}^{ij} (т. е. все ребра $\{i, j\}$), на третьем – на трех вершинах V_{sub}^{ijk} и т. д. (рис. 5).

Начало алгоритма метода Верника – Раше
Ввод: граф $G(V, E)$, целое $1 \leq k \leq |V|$
Вывод: Все сетевые мотивы в графе G , которые содержат k вершин

1. Для всех $v \in V$ делай
2. $V_{ext} \leftarrow \{u \in Nei(v) : u > v\}$
3. $V_{sub} = \{v\}$
4. Выполнить процедуру $ExtendSubgraphs(V_{sub}, V_{ext}, v)$

Конец алгоритма метода Верника-Раше
Начало процедуры $ExtendSubgraphs(V_{sub}, V_{ext}, v)$
 E1. Если $|V_{sub}| = k$ то верни $G[V_{sub}]$ и Конец
 E2. Пока $V_{ext} \neq \emptyset$ делай
 E3. Удалить случайно выбранную вершину w из V_{ext}
 E4. $V'_{ext} \leftarrow V_{ext} \cup \{u \in N_{ext}(w, V_{sub}) : u > v\}$
 E5. Выполнить процедуру $ExtendSubgraphs(V_{sub} \cup \{w\}, V'_{ext}, v)$
Конец процедуры $ExtendSubgraphs(V_{sub}, V_{ext}, v)$

Рис. 4. Алгоритм, реализующий метод Верника – Раше

В процедуре $ExtendSubgraphs(V_{sub}, V_{ext}, v)$ множество V_{sub} расширяется путем добавления одной вершины из множества V_{ext} – вершины w . После этого множество V_{ext} изменяется следующим образом. Во-первых, из него удаляется добавленная во множество V_{sub} вершина w , во-вторых, в него добавляются вершины, метка которых больше метки вершины v и которые находятся в окрестности исключения w относительно множества V_{sub} .

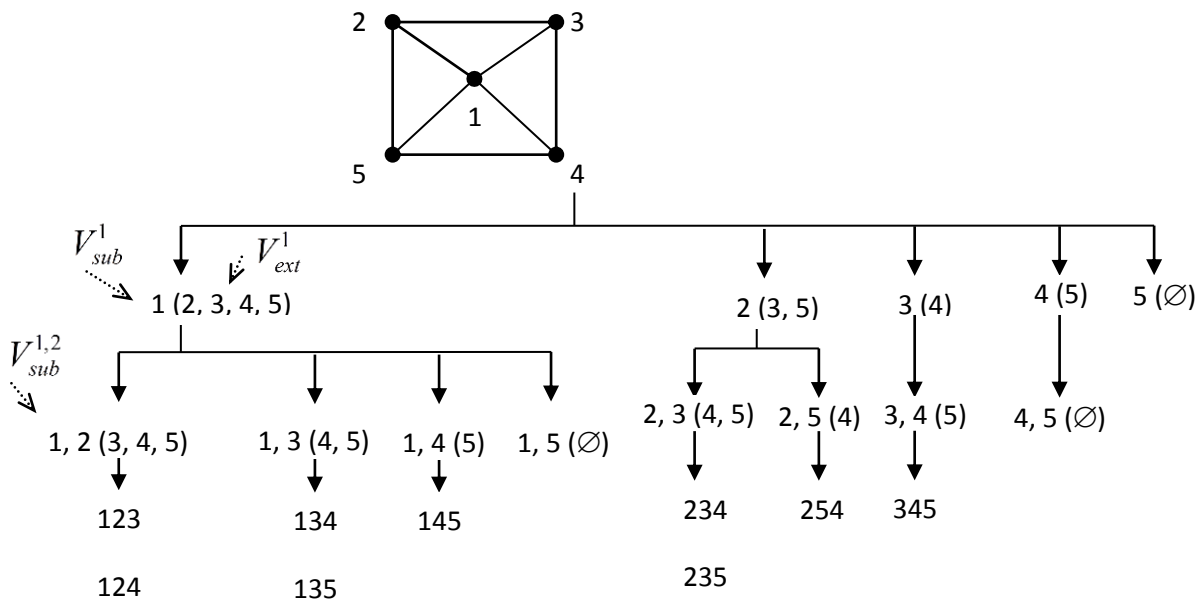


Рис. 5. Граф и соответствующее ему дерево Верника – Раше

Предложенный метод перебирает все сетевые мотивы заданного размера, не допуская перечисления одних и тех же сетевых мотивов больше одного раза. В работе [12] предложена итерационная версия метода Верника – Раше [13].

Если в алгоритме метода Верника – Раше заменить «Выполнить процедуру» в строках 4 и E5 на «Выполнить процедуру с вероятностью p_d », где $d = 1$ в строке 4 и $d = |V_{sub}| + 1$ в строке E5, то мы получим алгоритм статистического метода Верника – Раше [5].

Однако, вопреки утверждениям авторов [5], метод Верника – Раше в общем случае дает смещенные оценки частот встречаемости сетевых мотивов.

Ранее на большом количестве проведенных расчетов в работе [14] было показано, что использование метода Верника – Раше приводит к получению смещенных оценок частоты встречаемости k -мотивов. Рассмотрим здесь теоретическое доказательство. Действительно, как можно видеть, в графе на рис. 5 имеются 10 различных реализаций 3-мотивов, из них 4 реализации сетевого мотива «треугольник» (выделены фоном на рис. 5). Истинное значение частоты встречаемости сетевого мотива «треугольник» – $C_{\Delta} = 4/10$. При этом если вероятность выполнения строки 4 в алгоритме на рис. 4 равна p , то математическое ожидание частоты встречаемости сетевого мотива «треугольник» по формуле полной вероятности:

$$M(C_{\Delta}^{BP}) = \sum_{i=1}^{N_C} P_i \times C_i, \quad (1)$$

где N_C – количество различных значений относительных частот встречаемости «треугольников», которые могут быть получены в результате проведения статистического эксперимента,

P_i – вероятность получения значения C_i .

При подсчете суммы (1) можно рассматривать только ненулевые множители C_i . Для графа на рис. 5 таких значений всего четыре. Во-первых, относительная частота встречаемости «треугольников» будет ненулевой, если в результате выполнения строки 4 останется только вершина «1», вероятность этого события равна $p(1-p)^2$, а значение относительной частоты встречаемости «треугольников» при этом будет равно $4/6$. Во-вторых, относительная частота встречаемости «треугольников» будет ненулевой, если в результате выполнения строки 4 на рис. 4 останутся вершины «1» и «2», вероятность этого события равна $p^2(1-p)$, а значение относительной частоты встречаемости «треугольников» при этом равно $4/9$. В-третьих, относительная частота встречаемости «треугольников» будет ненулевой, если в результате выполнения строки 4 останутся вершины «1» и «3», вероятность этого события также равна $p^2(1-p)$, а значение относительной частоты встречаемости «треугольников» при этом будет равно $4/7$. Наконец, относительная частота встречаемости «треугольников» будет ненулевой, если в результате выполнения строки 4 останутся вершины «1», «2» и «3», вероятность этого события равна p^3 , а значение относительной частоты встречаемости «треугольников» при этом будет равно $4/10$.

Соответственно, математическое ожидание частоты встречаемости сетевого мотива «треугольник» C_{Δ}^{BP} будет:

$$M(C_{\Delta}^{BP}) = \sum_{i=1}^{N_C} p_i \cdot C_i = (4/6)p(1-p)^2 + (4/9 + 4/7)p^2(1-p) + (4/10)p^3.$$

На рис. 6 можно видеть, что при различных значениях вероятности p частота встречаемости «треугольников» оказывается заниженной, достигая истинного значения $C_{\Delta} = 4/10$ при вероятности выполнения строки 4 алгоритма на рис. 4 равной единице.

Таким образом, оценка частот встречаемости, получаемая статистическим методом Верника – Раше, в общем случае является смещенной.

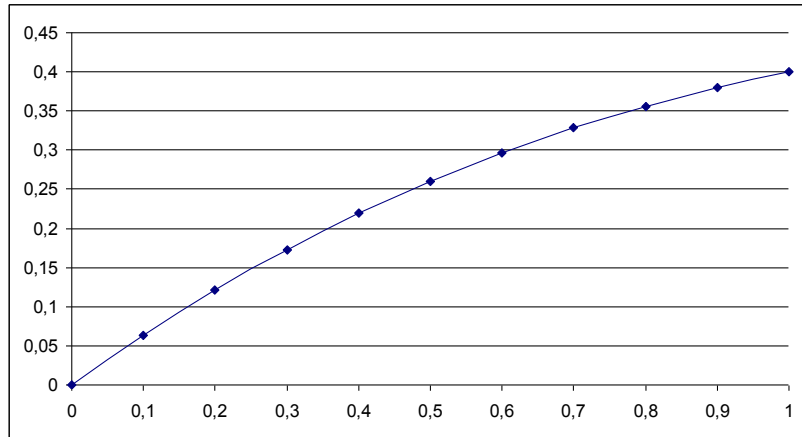


Рис. 6. График зависимости математического ожидания частоты встречаемости «треугольника» от вероятности p выполнения строки 4 алгоритма на рис. 4

Представленное в работе [10] доказательство теоремы о несмещенности оценки в методе Верника – Раше является ошибочным. Это доказательство основывается на том, что вероятность «сохранения» любого k -мотива в соответствии со статистическим методом Верника – Раше одинакова для всех сетевых мотивов на заданном числе вершин, что действительно так. И для графа, представленного на рис. 5, математическое ожидание числа «треугольников» при вероятности p выполнения строки 4 алгоритма на рис. 4 действительно будет $M(\Delta) = p(4 + 0 + 0 + 0 + 0) = 4p$. Математическое ожидание числа всех 3-мотивов $M(N) = p(6 + 3 + 1 + 0 + 0 + 0) = 10p$. Однако ошибочно полагать, что относительную частоту реализации «треугольников» можно считать по формуле $M(C_\Delta) = M(\Delta)/M(N)$, поскольку найденное число «треугольников» и найденное число реализаций всех 3-мотивов в статистическом эксперименте метода Верника – Раше – это зависимые случайные величины. Единственная корректная реализация статистического метода Верника – Раше, при которой отсутствует смещение оценок (поскольку все реализации сетевых мотивов, полученные в результате выполнения метода Верника-Раше, независимы), – это реализация, когда отсекаются ветви дерева Верника – Раше только на последнем ярусе.

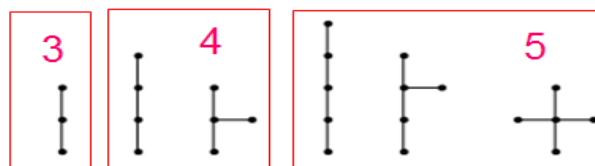


Рис. 7. Остовные деревья на 3, 4 и 5 вершинах

Метод случайной выборки каркасов. Метод случайной выборки каркасов (далее – СВК) является реализацией метода Монте-Карло, в котором выборочное пространство определяется как множество экземпляров одного и того же каркаса [15], содержащихся в рассматриваемом графе и наделенных равными вероятностями выбора. Чтобы получить оценки встречаемости для всех возможных k -мотивов, очевидно, необходимо использовать столько каркасов, сколько существует попарно неизоморфных остовных деревьев на k -вершинах. В неориентированном графе на трех вершинах существует только одно остовное дерево (рис. 7), на четырех вершинах – 2 остовных дерева, на пяти – 3, на шести – 6.

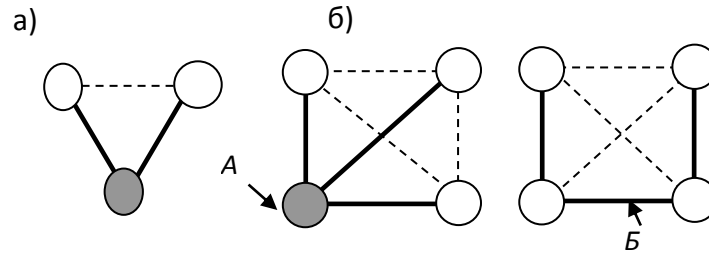


Рис. 8. Каркасы на трех и четырех вершинах,
 жирная линия – ребро, присутствующее в экземпляре каркаса;
 пунктирная – ребро, которое может быть найдено в сетевом мотиве

Метод СВК, предложенный в работе [15], позволяет рассчитывать частоты встречаемости сетевых мотивов на трех и четырех вершинах в неориентированном графе. Для этого используются три разных каркаса. Первый – каркас «вилка», экземпляры которого представляют собой путь длиной в два ребра. В каркасе «вилка» вершина, инцидентная обоим ребрам каркаса, считается центром каркаса, (рис. 8а). Каркас «вилка» используется для расчета 3-мотивов. Для расчета 4-мотивов используются два каркаса, каждый из которых содержит три связных ребра. Эти каркасы изображены на рис. 8б: слева – каркас «ветвление», справа – каркас «цепочка». Для «ветвления» центром каркаса (рис. 8б слева) называется вершина А, инцидентная всем трем ребрам каркаса. Для «цепочки» центром считается ребро Б, смежное двум другим ребрам каркаса (рис. 8б справа).

Основой метода СВК является равновероятный выбор в графе экземпляров каркаса и основанный на этом расчет несмещенной оценки доли \hat{q} экземпляров каркаса, «несущих» соответствующий мотив. Поскольку общее число N экземпляров каркаса в графе известно точно (оно легко рассчитывается), несмещенная оценка числа \hat{n} реализаций мотива в графе определяется в виде $\hat{n} = \hat{q} N$.

Алгоритм статистического расчета абсолютной частоты встречаемости сетевых мотивов методом СВК представлен на рис. 9.

НАЧАЛО

Ввод: граф $G(V,E)$, массив поправочных коэффициентов $coef[i], i \in X$,

где X – множество сетевых мотивов

Вывод: оценки абсолютных частот встречаемости сетевых мотивов $n[i], i \in X$

1. Для всех $i \in X$ делай $n[i] \leftarrow 0; C[i] \leftarrow 0$;

2. Рассчитать общее число каркасов N^+

3. Для $j = 1, \dots, N$ выполнить

3.1. Выбрать равновероятно каркас C_j , содержащий множество вершин V'

3.2. $Num = GetISO[G[V']]$ // получить класс изоморфизма $Num \in X$

3.2. $C[Num] = C[Num] + 1$;

3. Для всех $i \in M$ делай $n[i] \leftarrow N^+ C[i] / coef[i]$.

КОНЕЦ

Рис. 9. Статистический расчет для получения оценки абсолютной частоты встречаемости сетевых мотивов методом СВК

В алгоритме на рис. 9 на шаге 2.1 равновероятно выбираются экземпляры каркаса, определяется найденная на каждом из этих экземпляров реализация сетевого мотива и наращивается счетчик найденных реализаций сетевых мотивов. После выполнения статистического эксперимента (на шаге 2 алгоритма на рис. 9) на шаге 3 с учетом поправочных коэффициентов рассчитываются оценки абсолютных частот встречаемости сетевых мотивов.

Метод СВК позволяет получить несмещенные и эффективные оценки только числа встречаемости 3-мотивов. Для расчета 4-мотивов, с одной стороны, использование одного вида каркаса («ветвление» или «цепочка») не позволяет получить оценки для частот встречаемости всех возможных 4-мотивов. С другой стороны, при использовании каркасов «ветвление» и «цепочка» для некоторых 4-мотивов могут быть получены две различные оценки числа реализаций мотива.

Комбинированный метод случайной выборки каркасов. В комбинированном методе случайной выборки каркасов (в методе КСВК) итоговая оценка числа встречаемости мотивов строится в виде линейной комбинации оценок, полученных при использовании различных каркасов. Для 4-мотивов в методе КСВК используется формула:

$$\hat{n} = \hat{n}_A + \lambda(\hat{n}_B - \hat{n}_A), \text{ где } 0 < \lambda < 1. \quad (2)$$

Заметим, что случайные величины \hat{n}_A и \hat{n}_B при большом числе испытаний N_A^+ и N_B^+ соответственно имеют нормальное распределение, что вытекает из центральной предельной теоремы, поскольку оценки получены при использовании схемы Бернулли, причем выполняется большое число независимых равновероятных выборов сетевых мотивов. Величина \hat{n} тоже имеет нормальное распределение, поскольку строится как линейная комбинация двух нормальных величин. Для любого нормального закона распределения вероятность, что значение случайной величины отклонится от ее математического ожидания более чем на три среднеквадратических отклонения, не превышает 0,28 %, т. е. пренебрежимо мала. Поэтому в качестве абсолютной погрешности для случайной величины \hat{n} можно рассматривать величину 3σ . В качестве аналога относительной погрешности для величины \hat{n} следует рассматривать ее коэффициент вариации $v(\hat{n}) = \sigma(\hat{n})/M(\hat{n})$, а в качестве самой относительной погрешности – величину $3v$.

В работе [16] приведен критерий выбора λ для минимизации коэффициента вариации (относительной погрешности вычислений) интегральной оценки числа встречаемости сетевого мотива \hat{n} . В данной работе рассмотрим такой выбор значения параметра λ , который минимизирует абсолютную погрешность.

Для минимизации абсолютной погрешности расчетов и получения эффективной статистической оценки частот встречаемости 4-мотивов параметр λ в выражении (2) определим из условия минимизации дисперсии $D(\hat{n}(\lambda))$.

Случайная величина \hat{n} определяется через линейную комбинацию независимых случайных величин в выражении (2), ее математическое ожидание $M(\hat{n})$ при любом $0 < \lambda < 1$ будет $M(\hat{n}) = M(\hat{n}_A + \lambda(\hat{n}_B - \hat{n}_A)) = M((1-\lambda)\hat{n}_A + \lambda\hat{n}_B) = (1-\lambda)M(\hat{n}_A) + \lambda M(\hat{n}_B) = (1-\lambda)M_A + \lambda M_B$, а дисперсия:

$$D(\hat{n}(\lambda)) = D((1-\lambda)\hat{n}_A) + D(\lambda\hat{n}_B) = (1-\lambda)D(\hat{n}_A) + \lambda D(\hat{n}_B) = (1-\lambda)^2 D_A + \lambda^2 D_B. \quad (3)$$

Дифференцируя (3) по λ и приравнявая полученное выражение к нулю, получим:

$$((1-\lambda_{opt})^2 D_A + \lambda_{opt}^2 D_B)' = -2D_A + 2\lambda_{opt} D_A + 2\lambda_{opt} D_B = 0.$$

Откуда выразим искомое λ_{opt} :

$$\lambda_{opt} = \frac{D_A}{D_B + D_A}. \quad (4)$$

Найденное значение λ_{opt} действительно является минимумом, поскольку вторая производная $D(\hat{n}(\lambda))'' = 2D_A + 2D_B$ положительна, в том числе в точке λ_{opt} . Случай, когда дисперсии

D_A и D_B одновременно равны нулю следует рассмотреть отдельно. Эта ситуация возможна только тогда, когда все связные подграфы на четырех вершинах в исследуемом графе являются реализацией искомого 4-мотива и находятся одновременно как при использовании каркаса «цепочка», так и при использовании каркаса «ветвление»; в этом случае $M(\hat{n})=M(\hat{n}_A)=M(\hat{n}_B)$. Иначе, при $0 < \lambda < 1$ $M(\hat{n}(\lambda))=(1-\lambda_{opt})M_A+\lambda_{opt}M_B$, где λ_{opt} вычисляется по формуле (4).

Сравнение статистических методов расчета по показателям качества. При анализе статистических методов расчета частот встречаемости сетевых мотивов выявлено, что метод Верника – Раше (в общем случае) не позволяет получить несмещенные оценки частот встречаемости сетевых мотивов. Выявлен единственный режим работы статистического метода Верника – Раше, позволяющий получить состоятельную оценку относительных частот встречаемости сетевых мотивов, причем для его реализации необходимо построение всех ярусов дерева Верника – Раше, за исключением последнего его яруса, который достраивается частично. Назовем этот режим работы методом Верника – Раше (*). Метод СВК дает несмещенные оценки частот встречаемости сетевых мотивов, однако при использовании различных каркасов могут быть получены различные оценки, а использование одного из каркасов не позволяет получить статистические оценки числа всех возможных 4-мотивов. Метод КСВК решает эту проблему, представляя оценку числа 4-мотивов в виде линейной комбинации оценок, полученных при использовании различных каркасов. В таблице представлены основные характеристики статистических методов расчета 4-мотивов.

Таблица

Характеристики статистических методов расчета числа встречаемости 4-мотивов

Название метода	Оценка относительных частот встречаемости 4-мотивов			Оценка числа 4-мотивов		
	Состоятельность	Несмещенность	Эффективность	Состоятельность	Несмещенность	Эффективность
Метод СВР	нет	нет	нет	–	–	–
Метод Верника – Раше	–	нет	нет	–	–	–
Метод Верника – Раше (*)	да	да	да	–	–	–
Метод СВК	да	да/нет	да/нет	да	да/нет	да/нет
Метод КСВК	да	да	да	да	да	да

Выводы. Возникший в рамках «Науки о сетях» подход к исследованию больших сетей путем анализа частот встречаемости сетевых мотивов используется для сетей белковых взаимодействий и генных сетей [1], трофических сетей [2], сетей химических реакций [17–18] и сетей передачи электроэнергии [19], сетей телекоммуникаций и транспортных сетей [20–21]. Этот топологический подход позволяет прогнозировать белок-белковые взаимодействия [22], пути конструирования новых химических взаимодействий [23]. Сетевые мотивы широко используются при классификации сетевых структур [2, 21].

Тем не менее при большом числе вершин и ребер анализируемых графов точный расчет частот встречаемости 4-мотивов становится практически нереализуемым. Поэтому широкое распространение получили статистические методы расчета: метод случайного выбора ребра (СВР), метод Верника – Раше, метод случайной выборки каркасов (СВК), комбинированный метод случайной выборки каркасов (КСВК). Однако характеристики (состоятельность, несмещенность, эффективность) получаемых статистическими методами оценок все еще требуют углубленного анализа. В данной работе получены следующие новые результаты:

1. Проведен анализ известных статистических методов расчета частот встречаемости сетевых мотивов, таких как метод СВР, метод Верника – Раше, метод СВК и КСВК. Впервые показывается, что статистический метод Верника – Раше не гарантирует получения несмещенных оценок частот встречаемости сетевых мотивов. Выявлен режим работы метода Вер-

ника – Раше, при использовании которого будут получены несмещенные оценки частот встречаемости сетевых мотивов.

2. Метод СВК позволяет получить несмещенные и эффективные оценки частот встречаемости только 3-мотивов. Для расчета 4-мотивов, с одной стороны, использование одного вида каркаса («ветвление» или «цепочка») не позволяет получить оценки для частот встречаемости всех возможных 4-мотивов. С другой стороны, при использовании каркасов «ветвление» и «цепочка» для некоторых 4-мотивов могут быть получены две различные оценки числа реализаций мотива. Впервые для метода КСВК приводится режим работы для получения состоятельных, несмещенных и эффективных оценок частот встречаемости 4-мотивов.

Следует выделить следующие перспективные направления исследований в области разработки статистических методов расчета сетевых мотивов:

- разработка алгоритмов, обеспечивающих остановку расчетов при достижении заданной точности расчета;
- разработка программных комплексов специализированных программ [24–25];
- использование параллельных и распределенных алгоритмов для ускорения расчетов;
- разработка веб-сервиса для расчета сетевых мотивов методом КСВК (по аналогии с веб-сервисом MotifNet [3], реализующим статистический метод Верника – Раше);
- доработка метода КСВК для расчета частот встречаемости сетевых мотивов более высокого порядка.

Литература

1. Ma'ayan A., Jenkins S. L., Neves S., Hasseldine A., Grace E., Dubin-Thaler B., Eungdamrong N. J., Weng G., Ram P. T., Rice J. J., Kershenbaum A., Stolovitzky G. A., Blitzer R. D., Iyengar R. Formation of Regulatory Patterns During Signal Propagation in a Mammalian Cellular Network // *Science*. 2005. Vol. 310. P. 1078–1083.
2. Milo R., Shen-Orr S., Itzkovitz S., Kashtan N., Chklovskii D., Alon U. Network Motifs: Simple Building Blocks of Complex Networks // *Science*. 2002. Vol. 594, No. 298. P. 824–827.
3. Smoly I. Y., Lerman E., Ziv-Ukelson M., Yeger-Lotem E. MotifNet: A Web-Server for Network Motif Analysis // *Bioinformatics*. 2017. Vol. 33, No. 12. P. 1907–1909.
4. Schreiber F., Schwobbermeyer H. Frequency Concepts and Pattern Detection for the Analysis of Motifs in Networks // *Transactions on Computational Systems Biology III*. 2005. Vol. 3737. P. 89–104.
5. Wernicke S., Rasche F. FANMOD: a Tool for Fast Network Motif Detection // *Bioinformatics*. 2006. Vol. 22, No. 9. P. 1152–1153.
6. Chen J., Hsu W., Lee M. L., Ng S.-K. NeMoFinder: Dissecting Genome-Wide Protein-Protein Interactions with Meso-Scale Network Motifs // *Proceedings of the 12th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. Philadelphia, Pennsylvania, USA, 2006. P. 106–115.
7. Kashani Z. R., Ahrabian H., Elahi E., Nowzari-Dalini A., Ansari E. S., Asadi S., Mohammadi S., Schreiber F., Masoudi-Neja A. Kavosh: a New Algorithm for Finding Network Motifs // *BMC Bioinformatics*. 2009. No. 10. P. 318.
8. Meira L. A. A., Máximo V. R., Fazenda Á. L., da Conceição A.F. acc-Motif: Accelerated Network Motif Detection // *IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics*. Vol. 11, No. 5. P. 853–862.
9. Kashtan N., Itzkovitz S., Milo R., Alon U. Efficient Sampling Algorithm for Estimating Subgraph Concentrations and Detecting Network Motifs // *Bioinformatics*. 2004. Vol. 20, No. 11. P. 1746–1758.
10. Wernicke S. A Faster Algorithm for Detecting Network Motifs // *Lecture Notes in Bioinformatics*. 2005. Vol. 3692. P. 165–177.
11. Ray A., Holder L., Bifet A. Efficient Frequent Subgraph Mining on Large Streaming Graphs // *Intelligent Data Analysis*. 2019. Vol. 23, No. 1. P. 103–132.

12. Itzhack R., Mogilevski Y., Louzoun Y. An Optimal Algorithm for Counting Network Motifs // *Physica A*. 2007. Vol. 381. P. 482–490.
13. Wernicke S. Comment on “An optimal algorithm for counting networks motifs” // *Physica A*. 2011. Vol. 390. P. 143–145.
14. Yudina M. N. Assessment of Accuracy in Calculations of Network Motif Concentration by Rand ESU algorithm // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1260. P. 022012.
15. Yudin E. B., Zadorozhnyi V. N. Statistical Approach to Calculation of Number of Network Motifs // *Proceedings – International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON*. Omsk, 2015. P. 1–4.
16. Yudina M. N., Zadorozhnyi V. N., Yudin E. B. Mixed Random Sampling of Frames Method for Counting Number of Motifs // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1260. P. 022013.
17. Jacob P. M., Lapkin A. Statistics of the Network of Organic Chemistry // *Reaction Chemistry & Engineering*. 2018. No. 3. P. 102–118.
18. Menon A., Krdzavac N. B., Kraft M. From Database to Knowledge Graph – Using Data in Chemistry // *Current Opinion in Chemical Engineering*. 2019. Vol. 26. P. 33–37.
19. Dey A. K., Gel Y. R., Poor H. V. What Network Motifs Tell us About Resilience and Reliability of Complex Networks // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2019. Vol. 116, No. 39. P. 19368–19373.
20. Stone L., Simberloff D., Artzy-Randrup Y. Network Motifs and Their Origins // *PLoS Computational Biology*. 2019. Vol, 15. No. 4. P. e1006749.
21. Jain D., Patgiri R. Network Motifs: A Survey // *3rd International Conference on Advances in Computing and Data Sciences, ICACDS 2019*. Ghazibad; India; April 2019. Vol. 1046. P. 80–91.
22. Albert I., Albert R. Conserved Network Motifs Allow Protein–Protein Interaction Prediction // *Bioinformatics*. 2004. Vol. 20, No. 18. P. 3346–3352.
23. Müller I. E., Rubens J. R., Jun T., Graham D., Xavier R., Lu T. K. Gene Networks that Compensate for Crosstalk with Crosstalk // *Nature Communications*. 2019. Vol. 10. 8 p.
24. Юдина М. Н. Узлы в социальных сетях: меры центральности и роль в сетевых процессах // *Омск. науч. вестн.. Сер. Приборы, машины и технологии*. 2016. Т. 148, № 4. С. 161–165.
25. Юдина М. Н. Комплекс программных библиотек для анализа молекулярных сетей клетки // *Омск. науч. вестн.. Сер. Приборы, машины и технологии*. 2018. Т. 162, № 6. С. 265–217.

УДК 004.056

**АРХИТЕКТУРА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ
ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПРЕДПРИЯТИЯ**

Е. А. Витенбург

*Волгоградский государственный университет,
e.vitenburg@ec-rs.ru*

В статье определена необходимость внедрения и модернизации системы защиты информации на предприятии, рассмотрена ее типовая структура. Определена актуальность применения методов интеллектуальной поддержки решений при проектировании систем защиты информации. Сформированы математическая модель данной интеллектуальной поддержки и функциональная модель интеллектуального выбора проекта системы защиты информации. Построена архитектура программного комплекса интеллектуальной поддержки принятия решений при проектировании системы защиты информационной системы предприятия.

Ключевые слова: информационная система предприятия, информационная безопасность, система защиты информации, нейронная сеть.

**SOFTWARE COMPLEX ARCHITECTURE
OF INTELLIGENT DECISION SUPPORT
IN DESIGN OF SECURITY SYSTEM
FOR ENTERPRISE INFORMATION SYSTEM**

E. A. Vitenburg

*Volgograd State University,
e.vitenburg@ec-rs.ru*

The article identifies the need for the introduction and modernization of the information security system in the enterprise. The typical structure of the information security system in the enterprise is considered. The relevance of methods application of intelligent decision support in the design of information security systems is presented. A mathematical model of intelligent decision support and a functional model of intellectual project selection of information security system are formed. The software complex architecture of intelligent decision support in the design of the security system of the enterprise information system is constructed.

Keywords: enterprise information system, information security, information security system, neural network.

Рост числа предприятий, в том числе опасных производств, отнесенных к критической информационной инфраструктуре (далее – КИИ), определяет необходимость обеспечения информационной безопасности информационных систем (далее – ИС) предприятия, обеспечивающих производственный процесс. Данная необходимость ежегодно подтверждается ведущими в области защиты информации аналитическими центрами. Статистика от аналитического центра РТ [1] за 2019 год показывает, что больше половины выявленных уязвимостей информационной системы предприятия относятся к критической и высокой степеням риска в соответствии с оценкой Common Vulnerability Scoring System версии 3 [2]. При этом доля таких уязвимостей выросла на 17 % по сравнению с предыдущим годом. Если уязвимость имеет высокую степень риска, то в большинстве случаев она ставит под удар сразу три свойства безопас-

ности информации: конфиденциальность, целостность и доступность. В 2018 году такое комплексное воздействие имели 58 % уязвимостей (рис. 1).

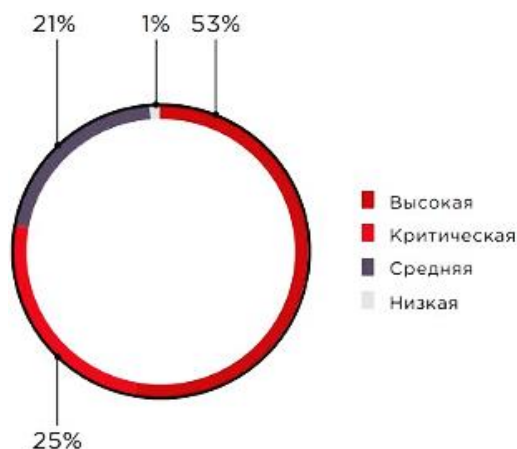


Рис. 1. Степень риска уязвимостей ИС предприятия

При этом среди них только для 4 % сложность атаки была оценена как высокая. Это означает, что в большинстве случаев злоумышленнику не требуется никаких специальных условий, чтобы нарушить защищенность элементов ИС предприятия.

Ввиду ежегодного роста атак на информационные системы предприятий, актуальной задачей является построение и внедрение эффективной системы защиты информации (далее – СЗИ). В случае наличия СЗИ ИС предприятия требуется оперативная корректировка настроек существующих средств защиты информации, входящих в состав системы защиты, корректировка состава подсистем СЗИ, а также установка и настройка новых средств защиты ИС и/или замена устаревших средств защиты информации [3, 4].

Система защиты информации SPI имеет многоуровневую структуру и определяется следующими уровнями (компонентами):

- множество подсистемы защиты информации Subsystem;
- множество средств защиты информации MP.

В общем виде структуру СЗИ можно представить в виде схемы (рис. 2).

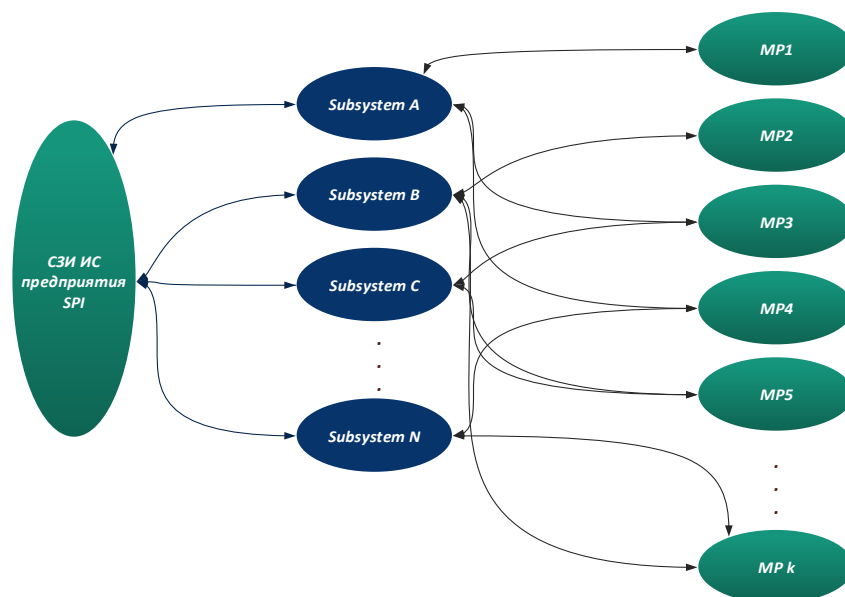


Рис. 2. Обобщенная структура СЗИ ИС предприятия

При формировании СЗИ ИС предприятия SPI в зависимости от исходных данных и модели угроз возможно формирование нескольких проектов системы защиты с различным составом подсистем. Разнообразие подсистем защиты, которые можно использовать для защиты от нескольких видов угроз, усложняет задачу выбора набора подсистем защиты, формирующего систему защиты [5]. Кроме того, выбор подсистем защиты для формирования СЗИ может осуществляться несколько раз в течение жизненного цикла информационной системы. При этом важными характеристиками процесса выбора являются скорость получаемого результата и снижение остаточного риска информационной системе. Поэтому актуальным является применение систем искусственного интеллекта в процессе выбора лучшего набора подсистем защиты – проекта, формирующего систему защиты.

Задача интеллектуального выбора проекта СЗИ сводится к определению важности каждой из типовых подсистем защиты информации. Это позволит специалисту включить в систему защиты именно те средства, которые относятся к наиболее важным подсистемам защиты, т. е. позволит защитить от наиболее актуальных классов угроз.

$$I = N(A), \quad (1)$$

где $I = (I_1, \dots, I_9)$ – вектор важности подсистем защиты информации;

$A = (A_1, \dots, A_6)$ – вектор актуальности классов угроз;

N – функциональная зависимость, представленная нейронной сетью.

Множество угроз нарушения информационной безопасности (далее – ИБ) возможно для удобства разделить на классы CTh , которые определяются в формуле 2:

$$Threat = \{ Breaking, Leak, Distortion, Loss, Blocking, Abuse \}, \quad (2)$$

где $Breaking$ – множество угроз, относящихся к классу «взлом»;

$Leak$ – множество угроз, относящихся к классу «утечка»;

$Distortion$ – множество угроз, относящихся к классу «искажение»;

$Loss$ – множество угроз, относящихся к классу «утрата», множество угроз, относящихся к классу «блокирование»;

$Blocking$ – множество угроз, относящихся к классу блокирование;

$Abuse$ – множество угроз, относящихся к классу «злоупотребление».

Причем для того, чтобы определить вектор актуальности классов угроз на основании статистики угроз или данных мониторинга событий безопасности, определены две матрицы соответствия:

Матрица MTh соответствия между множеством угроз $Threat$ и множеством классов угроз CTh :

$$MTh = Threat \times Cth = (mth_{ij}),$$

где

$$mth_{ij} = \begin{cases} 1/n, & \text{если угроза принадлежит классу угроз} \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}, \quad (3)$$

где n – количество классов угроз, которым принадлежит угроза. При этом $\forall i, \sum_j mth_{ij} = 1$.

Матрица MEv соответствия между множеством событий безопасности Ev и множеством классов угроз CTh :

$$MEv = Ev \times Cth = (mev_{ij}),$$

$$\text{где } mev_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если событие возникает при реализации угрозы класса} \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}, \quad (4)$$

Множество событий безопасности Ev включает в себя следующие типы [6]:

$$Ev == \{ EnterEv, ManagementSubEv, AccessObjEv, PolicyChangeEv, UsePrivilegesEv, ISProcessesEv, LevellSEv \}, \quad (5)$$

где $EnterEv$ – множество событий типа «вход субъектов в систему»;
 $ManagementSubEv$ – множество событий типа «управление субъектами»;
 $AccessObjEv$ – множество событий типа «получение доступа к объектам»;
 $PolicyChangeEv$ – множество событий типа «изменений политики системы»;
 $UsePrivilegesEv$ – множество событий типа «использование субъектом особых привилегий»;
 $ISProcessesEv$ – множество событий типа «функционирование процессов системы»;
 $LevellSEv$ – множество событий типа «уровень системы».

Используемая в программном комплексе нейронная сеть – многослойный персептрон – функционирует согласно формуле 6:

$$\begin{cases} In_{0k} = v_k \\ Out_{ij} = f(\sum_l w_{ijl} In_{ijl} - \theta_{ij}), \\ In_{ijl} = Out_{i-1l} \end{cases} \quad (6)$$

где In_{0k} – k-ый нейрон входного слоя;
 v_k – k-ый элемент входного вектора;
 Out_{ij} – выходное значение j-го нейрона i-го слоя;
 f – функция активации нейрона;
 w_{ijl} – вес l-го входа j-го нейрона i-го слоя;
 In_{ijl} – значение l-го входа j-го нейрона i-го слоя;
 θ_{ij} – уровень активации j-го нейрона i-го слоя;
 Out_{i-1l} – выходное значение l-го нейрона (i-1)-го слоя.

Тогда функциональная модель интеллектуального выбора проекта системы защиты информации будет иметь вид (рис. 3) [7].

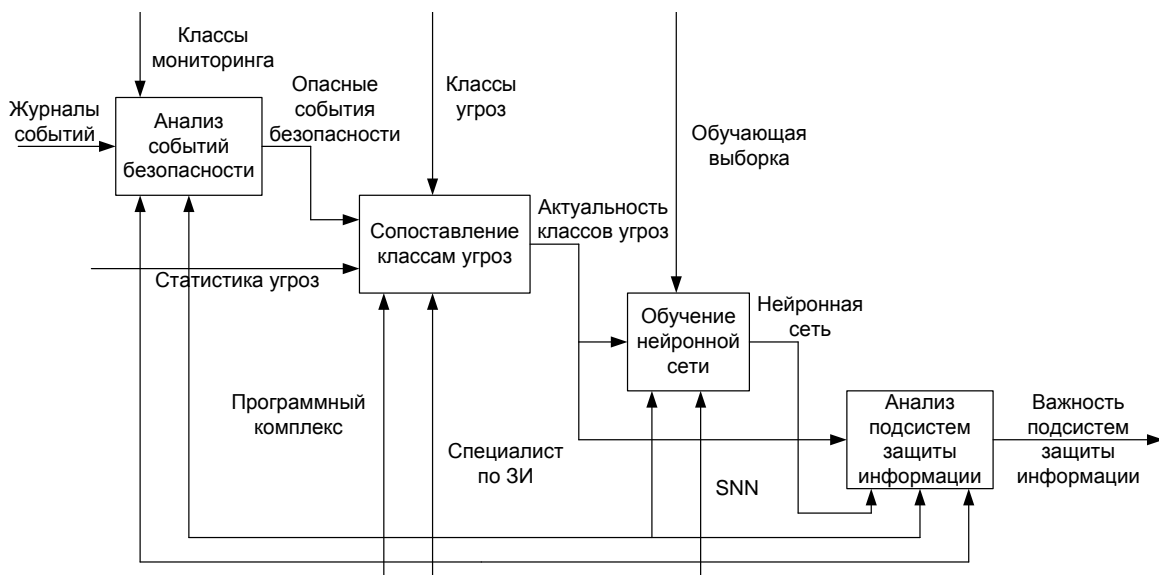


Рис. 3. Функциональная модель интеллектуального выбора проекта системы защиты информации

Входными данными являются либо события безопасности, либо статистика угроз. Из множества событий безопасности выбираются опасные события. Множество опасных со-

бытий безопасности или статистика угроз сопоставляются с классами угроз с помощью матриц соответствия [8]. В результате определяется вектор актуальности классов угроз. Для определения соответствия между актуальностью классов угроз и важностью подсистем защиты информации используется нейронная сеть [9].

Такая нейронная сеть – многослойный персептрон, требует предварительного обучения. Для этого используется обучающая выборка, составленная специалистом по защите информации. Обучение проводится с помощью стороннего ПО Statistica Neural Network.

Вектор важности подсистем защиты позволяет определить, какие подсистемы в первую очередь нуждаются в дополнительных средствах защиты информации [10–11].

На основе разработанной математической модели интеллектуальной поддержки принятия решений при проектировании СЗИ предприятия разработана архитектура программного комплекса интеллектуальной поддержки принятия решений при проектировании системы защиты ИС (рис. 4), состоящая из следующих модулей:

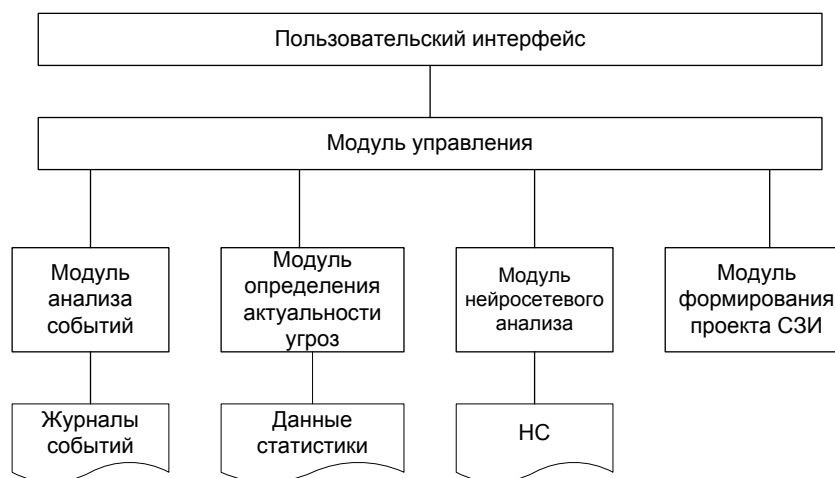


Рис. 4. Архитектура программного комплекса интеллектуальной поддержки принятия решений при проектировании системы защиты информационной системы предприятия

Пользовательский интерфейс необходим для организации интуитивно понятного взаимодействия пользователя с программным комплексом. Модуль управления осуществляет общее управление остальными модулями программного комплекса. Модуль анализа событий осуществляет сбор данных из журналов событий и подсчитывает количество опасных событий безопасности, относящихся к различным классам события (формула 5).

Модуль определения актуальности угроз на основании данных статистики или результата работы модуля анализа данных формирует вектор актуальности классов угроз по формулам 3 и 4.

Модуль нейросетевого анализа формирует вектор входных данных и передает его на вход нейронной сети, а затем получает и интерпретирует ее выход согласно формуле 6.

Модуль формирования проекта СЗИ определяет наиболее важные подсистемы защиты информации, которые нуждаются в дополнительных средствах защиты согласно формуле 6.

На основе описанной математической модели и архитектуры будет разработан программный комплекс, позволяющий как проектировщикам систем защиты информации, так и специалистам по защите информации на предприятии формировать наиболее оптимальные наборы средств защиты информации в проектах, при реализации которых эффективность работы СЗИ будет выше, чем при проектировании без средств принятия решений. Данный вывод следует из того, что при проектировании будет учтено все множество данных о защищаемой системе, что при «ручном» проектировании затруднительно. Кроме того, данный программный комплекс позволит минимизировать субъективные факторы, возникающие при

проектировании со стороны разработчика системы защиты. К ним относятся невнимательность разработчика при анализе исходных данных, сжатые сроки модернизации и/или разработки системы защиты, учет большого количества сведений о защищаемой системе, невозможность в короткие сроки провести глубокий комплексный анализ журналов событий безопасности или статистических данных.

Литература

1. Актуальные киберугрозы: II квартал 2019 года // Positive Technologies. URL: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/cybersecurity-threatscape-2019-q2/> (дата обращения: 28.06.2019).
2. Common Vulnerability Scoring System SIG. URL: <https://www.first.org/cvss/> (дата обращения: 28.06.2019).
3. Международный стандарт ISO 27001:2013 Информационные технологии. Методы защиты. Системы менеджмента информационной безопасности. Требования. URL: [http://www.pqm-online.com/assets/files/pubs/translations/std/iso-mek-27001-2013\(rus\).pdf](http://www.pqm-online.com/assets/files/pubs/translations/std/iso-mek-27001-2013(rus).pdf) (дата обращения 07.07.2019).
4. ГОСТ Р 50922-2006 Защита информации. Основные термины и определения. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200058320> (дата обращения 07.10.2018).
5. Об информации, информационных технологиях и о защите информации : федер. закон от 27 июля 2006 г. № 149-ФЗ. Доступ из СПС Гарант.
6. Описание событий системы безопасности в Windows 7 и Windows Server 2008 R2. URL: <https://support.microsoft.com/ru-ru/help/977519/description-of-security-events-in-windows-7-and-in-windows-server-2008> (дата обращения: 05.08.2019).
7. Машкина И. В., Сенцова А. Ю., Гузаиров М. Н., Кладов В. Е. Использование методов системного анализа для решения проблемы обеспечения безопасности современных информационных систем // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2011. № 12 (125). С. 25–35.
8. Астрахов А. В., Климов С. М., Сычев М. П. Противодействие компьютерным атакам. Технол. основы. М. : МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2013. 70 с.
9. Казимир В. В., Серая А. А. Метод построения информационных атак // Математ. машины и системы. 2010. Т. 1, № 4. С. 52–61.
10. Витенбург Е. А., Пушкарская А. И., Оладько В. С. Модель оценки безопасности на основе мониторинга информационной системы // Информацион. системы и технологии. 2017. № 3 (101). С. 21–30.
11. Витенбург Е. А. Обеспечение информационной безопасности информационных ресурсов предприятия // Материалы науч. сессии ВолГУ, 22–27 апреля. Волгоград : Изд-во ВолГУ, 2018. С. 295–299.

УДК 004.51-056.24

РЕАЛИЗАЦИЯ БЕСКОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ПРОТОТИПОМ КОМПЬЮТЕРНОГО ИНТЕРФЕЙСА В UNITY 3D

В. А. Зенг, О. В. Батенькина

*Омский государственный технический университет,
valeriyazeng@mail.ru, oksi-bat@mail.ru*

В статье рассмотрен процесс реализации прототипа бесконтактного взаимодействия пользователя с системой с помощью игрового движка Unity 3D. Описано создание объектов системы: пяти рабочих экранов, выдвигающейся панели меню, панели программ, приветственного экрана и окна программ. Для управления прототипом с помощью устройства Kinect произведено подключение ряда скриптов, разработанных компанией Microsoft, которые позволяют программно воспринимать любые жесты. Также описан комплект классов, позволяющих обработчику идентифицировать конкретные жесты пользователя и производить соответствующие действия. Приведены параметры анимации объектов для перехода между различными состояниями, которые могут изменяться посредством скриптов. Вся разработанная система методов и классов была аккумулятирована в одном скрипте для удобства управления и вызова функций проверки. Для запуска интерфейса установлен пароль в виде определенного уникального движения, установленного пользователем. Данный прототип реагирует на шесть жестов: активное махание рукой, одновременный взмах руки влево, вправо, вверх, вниз и удержание руки на месте. В качестве альтернативного средства управления прототипом в Unity 3D предусмотрены соответствующие траектории мыши, которые будут восприниматься так же, как и жесты пользователя.

Ключевые слова: человеко-машинное взаимодействие, программное приложение, бесконтактный интерфейс, прототип, захват движения, технологии бесконтактного взаимодействия, пользователи с ограниченными возможностями здоровья.

IMPLEMENTATION OF CONTACTLESS INTERACTION WITH COMPUTER INTERFACE PROTOTYPE USING UNITY 3D

V. A. Zeng, O. V. Batenkina

*Omsk State Technical University,
valeriyazeng@mail.ru, oksi-bat@mail.ru*

The article presents the prototype implementation process of contactless user-machine interaction using the Unity 3D game engine. It describes the creation of system objects: five desktops, a drop-down menu bar, a taskbar, a welcome screen and a program window. To control the prototype using the Kinect, a number of scripts, which were originally developed by Microsoft Corporation, are used. These scripts allow recognizing and identifying all possible gestures in software. A set of classes that allow identifying pre-set user gesture and performing relevant action are also described. Objects animation parameters for a transition between different states, which can be changed by scripts, are described. The entire system of methods and classes is assembled into one piece to make control and verification functionality easier to manage. A password gesture is set as a certain unique movement by the user to start the user session. This prototype responds to six human gestures: active hand waving, one-time hand wave to the left, to the right, up, down and holding a hand still. Mouse's motions that can be recognized as alternative user gestures are provided.

Keywords: human-machine interaction, software application, contactless interface, program prototype, motion capture, contactless interaction technologies, users with disabilities.

Современные научные работы, посвященные исследованию человеко-машинного взаимодействия, направлены в основном на разработку интерфейсов, ориентированных на опытных пользователей, и почти не затрагивают вопросы человеко-машинной коммуникации для лиц с ограниченными возможностями. Так, глухонемые люди не могут использовать речевые интерфейсы, а люди с проблемами мелкой моторики не способны работать с клавиатурой или жестовыми интерфейсами. Разработка универсального бесконтактного интерфейса, пригодного для всех категорий пользователей, и реализация этого интерфейса, демонстрирующего возможности многомодальной человеко-машинной коммуникации, позволят решить такую проблему. Данный интерфейс будет включать различные естественные для человека способы передачи и восприятия информации: речь, жесты, движения головой и телом, чтение по губам, а также комбинации этих бесконтактных модальностей [1].

Для разработки прототипа бесконтактного компьютерного интерфейса был выбран игровой движок Unity 3D ввиду простоты его использования, возможности написания скриптов на языке C#, а также большого объема обучающей информации, доступной как на официальном сайте, так и на многочисленных тематических форумах [2].

Сначала были созданы объекты пяти рабочих экранов посредством двухмерного примитива *Plane* с тем же соотношением сторон, что и разработанные ранее интерфейсы. Подобным образом были созданы такие объекты системы, как выдвигающаяся панель меню, панель программ, приветственный экран и окно программ [3].

Далее следует создать и назначить материалы объектам сцены. Для этого создается пустой материал, на который накладывается текстура и редактируются такие параметры, как отражение, свечение, сглаживание и др. Если материал полупрозрачный, то выбирается отображение не *Standart*, как в случае с обычными текстурами, а *Transperent*, куда потом добавляется текстура типа .png, которая хранит в себе данные о прозрачности. Таким образом создаются и текстурируются все объекты сцены (рис. 1) [4].

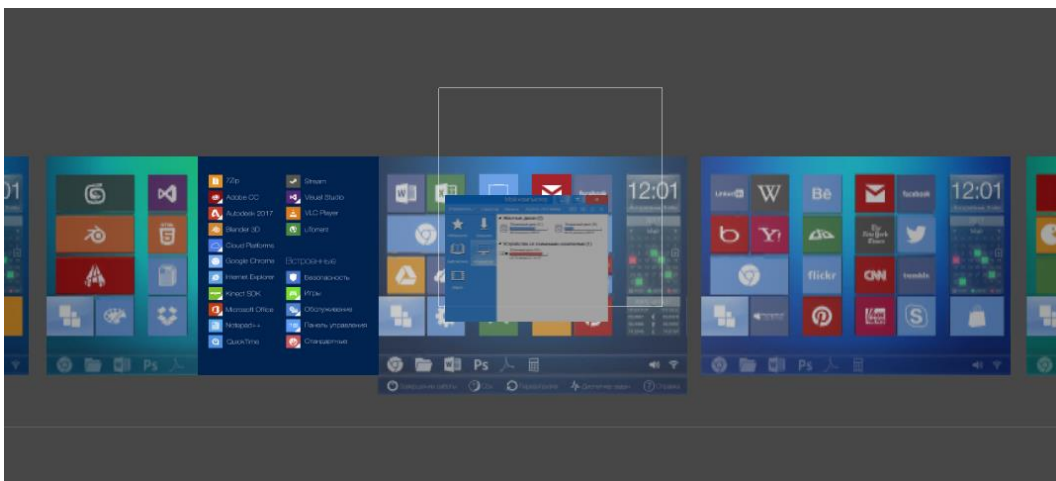


Рис. 1. Отображение рабочих столов в интерфейсе программы Unity 3D

Далее создаются элементы управления системой – кнопки на рабочем столе. Они создаются стандартным UI-примитивом *Button*, который позволяет настраивать анимацию кнопки, не вмешиваясь в программный код. В панели анимации переключаются состояния кнопки и добавляются новые параметры изменений кнопок: размеры, поворот, цвет и др. Также есть возможность с помощью дополнительных настроек функции триггера задать действия, которые будут производить нажатие на кнопку или наведение на нее курсора. Был использован параметр *SetActive()*, который позволяет убирать и восстанавливать видимость объектов сцены. Таким образом настроено появление окна программ и приложений, а также подсказки календаря.

Для реализации взаимодействия пользователя и прототипа посредством устройства Microsoft Kinect требуется подключение ряда скриптов, которые позволяют программно воспринимать жесты.

KinectGestures.cs – скрипт на языке C#, описывающий действия, которые необходимо распознавать, разбит на несколько частей. В первой описываются переменные класса, из которых наибольшее значение имеет переменная *Gestures* типа *enum*. Она используется для объявления, перечисления отдельного типа, состоящего из набора именованных констант, который называется списком перечисления. В данной переменной перечислены названия действий, которые Kinect должен распознавать. Чтобы программный код считывал действия, необходимо снимать информацию о скелете, передаваемую устройством Kinect, и преобразовывать ее в набор переменных, заключенных в переменной *GestureData*, которая описывает идентификатор пользователя, совершаемое действие, время начала действия, сустав скелета и его позицию в 3D-пространстве, и т. д.

Так как прототип интерфейса разрабатывается в качестве системы, адаптированной под людей с ограниченными возможностями здоровья (далее – ОВЗ), было принято решение не проводить идентификацию положения суставов нижней части тела, потому что многие пользователи с ограничениями в передвижении не могут долго стоять, совершая активные движения руками. Поэтому для реализации управления интерфейсов устройству не требуется отслеживать положение головы и ног, а значит, количество суставов ограничено семью элементами: левым/правым запястьем, левым/правым локтем, левым/правым плечом, шейей [5].

Для получения значений положения суставов и занесения их в соответствующие переменные используется метод класса *KinectWrapper*, который также не является стандартной библиотекой – его необходимо подключать вручную. В этом классе каждому из 20 доступных устройству Kinect суставов присваивается свой номер и проводится ряд операций с целью получения информации о положении каждого сустава, а также получения RGB-карты с камеры Kinect и карты глубины с инфракрасного сенсора. После выполнения всех операций в классе *KinectWrapper* продолжается просчет в классе *KinectGestures*.

Следующим шагом является *отслеживание движения*, и при условии, что жест пользователя завершен, вызывается функция *CheckPoseComplete*, в которой по завершении жеста в переменную *gestureData* записывается информация о времени завершения жеста и позиции отслеживаемого сустава в пространстве. Если пользователь по какой-либо причине прервал жест, то вызывается функция *SetGestureCancelled*, которая обнуляет переменную *gestureData*.

При совершении пользователем какого-либо действия вызывается функция *CheckForGesture*, в которой описаны условия каждого жеста из списка *Gestures*, объявленно-го в начале класса. Для создания прототипа интерфейса необходимо отслеживание только четырех действий: *SwipeLeft*, *SwipeRight*, *SwipeDown*, *SwipUp*, *Click*, *Push*, *Pull*, *Wave*.

Вся комплексная система методов и классов собирается в одном месте для управления и вызова функций проверки. В классе *KinectManager.cs* хранятся переменные, отвечающие за выполненное действие, положение всех отслеживаемых суставов во времени, а также информация об этих суставах и пользователях. С помощью скрипта *KinectManager* возможно распознавать два отдельных скелета, разделив их по ID пользователя, и препятствовать потере отслеживаемого скелета при появлении в кадре второго [6].

Для подключения системы распознавания жестов в игровой движок Unity необходимо просто добавить класс *KinectManager* как компонент к активной камере.

Важным элементом работы распознавания жестов является скрипт *GestureListener.cs*, который также добавляется к активной камере в качестве компонента. В самом начале этого скрипта создаются переменные типа *bool*. Эти переменные в дальнейшем используются в функциях, которые возвращают сигнал о том, что действие было завершено.

Функции *UserDetected* и *UserLost* активируют отслеживание выбранных жестов при появлении пользователя перед камерой устройства Kinect и очищают кэш при исчезновении пользователя из кадра соответственно, а функция *GestureCompleted* возвращает информацию о сделанном движении после серии проверок, выполняемых в методе *Gestures* класса *KinectGestures*.

В данном скрипте созданы глобальные переменные, необходимые для связи этого кода и объектов, находящихся на виртуальной сцене прототипа интерфейса. Реализация связи между переменными в коде и объектами на сцене представлена следующим набором строк:

```
public Texture2D cursorTexture;
public CursorMode cursorMode = CursorMode.Auto;
public Vector2 hotSpot = Vector2.zero;
private bool swipeLeft;
private bool swipeRight;
private bool swipeWave;
private bool isMoving;
public GameObject MenuP;
public GameObject All_programs;
public GameObject hello;
private string gestureName;
private MouseSwipe mouseSwipe = new MouseSwipe();
public Transform target;
public float smoothTime = 0.3F;
public Vector3 pos;
private bool t = false;
```

В данном фрагменте кода *public* является определителем режима доступа (*public* – глобальная переменная, *private* – локальная переменная). *GameObject* является типом объекта. В данном случае *GameObject* – игровой объект. Словосочетания *MenuP*, *All_programs* и др. являются названиями переменных.

Уже существующий внешний класс добавляется посредством глобальной переменной, где на месте типа переменной записывается название необходимого класса:

```
Private GestureListener gestureListener.
```

Следующие строки кода обращаются к типам переменных *Animator*. Новые версии Unity включают в себя обновленную систему анимации Mecanim (рис. 2). Ее суть состоит в том, что вся анимация объектов разделяется на различные состояния, переход между ними осуществляется согласно параметрам, которые могут изменяться посредством скриптов.

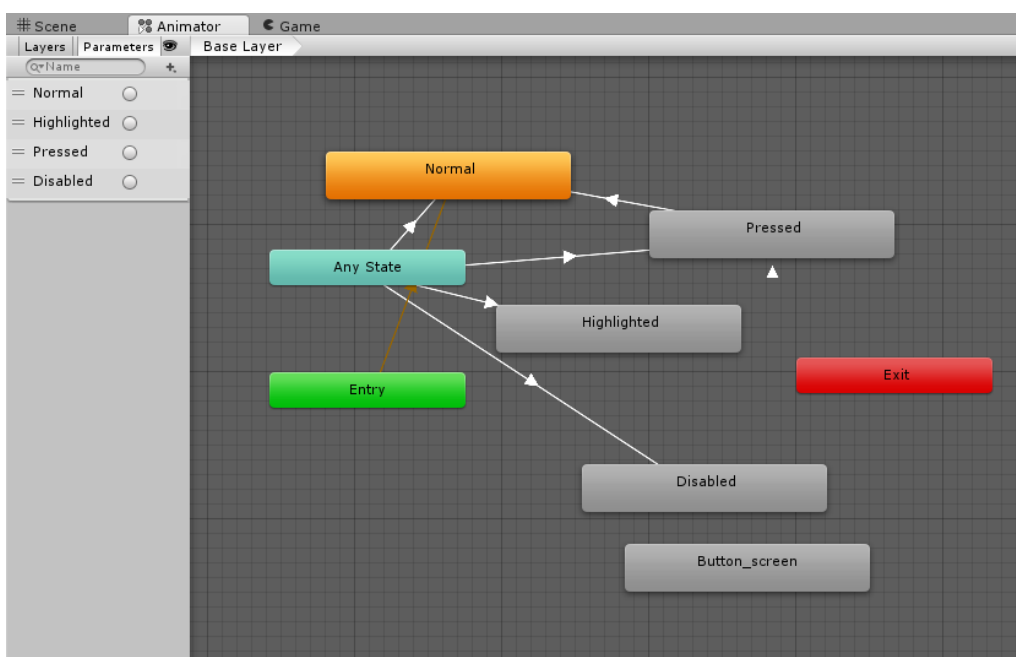


Рис. 2. Окно состояний анимации кнопки в системе Mecanim

В каждом состоянии записана определенная анимация, которая является отдельным объектом типа *Animation*. Все анимационные клипы связаны друг с другом в единый глобальный *Animation Controller* (контроллер анимации). Чтобы изменить его параметры через скрипт, нужно перевести компоненты анимации в переменные. Для доступа к состояниям анимации необходимо создание переменных типа *Animator*:

```
private Animator up;
private Animator programs;
```

Но сами по себе переменные не несут никакой информации об анимации объекта. Для присвоения им соответствующих контроллеров необходимо обратиться к функции *Start*, вызов которой происходит при появлении игрового объекта. В теле данной функции записываются следующие строки:

```
up = MenuP.GetComponent<Animator>();
programs = All_programs.GetComponent<Animator> ();
```

В данных строках кода переменным типа *Animator* присваиваются значения по шаблону: *Игровой_Объект.Получить_Компонент<Animator>()*. То есть программно вызываются компоненты, присоединенные к игровым объектам, имеющим определенное имя, которое указывается в первой части шаблона. Система анимации Mecanim позволяет переходить из одного состояния в другое при изменении определенных параметров, создаваемых пользователем.

Для запуска интерфейса необходимо ввести пароль в виде определенного уникального движения, установленного пользователем. Для данного прототипа необходимо помахать рукой, тем самым активировав функцию *IsWave()*. При срабатывании функции приветственное окно скрывается, предоставляя возможность дальнейшей работы с системой:

```
if (gestureName == "Wave" || gestureListener.IsWave() || Input.GetKeyUp(KeyCode.Alpha6))
{
    hello.SetActive(false);
    t=true;
}
```

Дальнейшее взаимодействие с прототипом осуществляется в основном шестью жестами: взмахом руки влево, вправо, вверх, вниз и кликом. Эти жесты описаны в скрипте *KinectManager.cs* и для получения к ним доступа необходимо подключение дополнительных строк кода, служащих триггерами, по которым обработчик получает доступ к соответствующим функциям. Этим набором триггеров служит компонент активной камеры, носящий название *Gesture Listener (Script)*.

Скрипт *GestureListener.cs* является дочерним объектом класса *KinectGestures* и берет свои основные параметры из функции *GestureListenerInterface*. Наследование параметров становится возможным благодаря строке кода, которая является строкой объявления глобального класса *GestureListener*:

```
public class GestureListener : MonoBehaviour, KinectGestures.GestureListenerInterface
```

В данной строке кода параметр *MonoBehaviour* означает, что для работы класса необходим материнский объект. То есть описанный класс не может работать, не будучи привязанным к какому-либо объекту [7].

Тело класса описывает ряд функций, возвращающих значение булевого типа. Одна из таких функций – *IsSwipeLeft()*:

```
public bool IsSwipeLeft()
{
    if(swipeLeft)
    {
        Debug.Log(«Swipe Left!»);
        swipeLeft = false;
        return true;
    }
}
```

```

}
return false;
}

```

Данная функция глобального типа может возвращать значения либо «истина», либо «ложь». Для выбора одного из этих значений происходит проверка переменной *SwipeLeft* булевого типа. При значении *true* (истина) сперва передается сообщение «Swipe Left!» в консоль отладки. Затем переменной *SwipeLeft* присваивается значение *false* (ложь) и в итоге возвращается значение *true* (истина) для всей функции. Если при инициализации функции значение переменной *SwipeLeft* было равно *false* (ложь), то сразу присваивается значение *false* (ложь) для всей функции.

После описания функций обработки жестов необходим ряд функций для мониторинга информации, передаваемой устройством Kinect. И первой является функция *UserDetected*, которая инициализируется при появлении пользователя перед устройством. Работа данной функции заключается в создании списка движений специально для распознанного пользователя, который сохраняется в переменной *manager*, принадлежащей классу *KinectManager*. Дальнейшим действием является выбор необходимых жестов, подлежащих распознаванию устройством Kinect.

После завершения жеста инициализируется функция *GestureCompleted*, которая описывает действия, принимаемые обработчиком при распознавании одного из жестов, описанных в переменной *manager*. Если жест совпадает с одним из описанных, то соответствующей переменной булевого типа присваивается значение *true* (истина) и управление передается обработчику, описанным в начале класса.

Для прямого взаимодействия с основным скриптом, описывающим поведение программы при распознавании жестов, необходимо записывать информацию о срабатывании триггеров в специальную глобальную переменную, носящую название *GestureListener*. Присвоение данной переменной необходимого значения осуществляется с помощью пользовательского интерфейса программы Unity 5. Достаточно просто перенести мышью необходимый класс в соответствующий раздел окна *Inspector*.

После подключения всех необходимых классов стало возможным простое описание необходимых движений, заключающееся в вызове соответствующей функции обработчика класса *GestureListener.cs*, но ввиду того, что взаимодействие с интерактивным прототипом может осуществляться не только жестами, но и мышью (при отсутствии возможности подключения устройства Kinect), возникла необходимость создания отдельного класса, описывающего жесты, совершаемые с помощью мыши, которые соответствуют жестам, распознаваемым в классе *KinectManager* [8].

Класс *MouseSwipe.cs* состоит из двух блоков. Первый – описание переменных, необходимых для работы класса:

```

Vector2 firstPressPos;
Vector2 secondPressPos;
Vector2 currentSwipe;
private enum gestState{None, Up, Down, Left, Right, Click};
private int gestureId;

```

Все пять переменных – локальные, так как значения, записанные в них, необходимы только внутри класса.

Три из пяти переменных являются переменными типа *Vector 2*, который хранит в себе координаты по двум осям. В случае скрипта *MouseSwipe.cs* необходимыми являются переменные, содержащие в себе значение положения мыши при нажатии на левую кнопку мыши (*firstPressPos*), значение положения мыши при завершении жеста (*secondPressPos*) и нормализованный вектор (*currentSwipe*). Нормализованным вектором является проекция на оси X и Y, построенная между двумя точками прямой.

Нормализованный вектор вычисляется путем вычитания начальной позиции курсора мыши из конечной:

```
currentSwipe = new Vector2(secondPressPos.x-firstPressPos.x, secondPressPos.y - firstPressPos.y);
```

После нормализации вектора проверяется ряд условий, описывающих все возможные направления вектора, а именно: вверх, вниз, влево и вправо. При совпадении направления вектора с одним из условий функция возвращает значения типа *string* (строка), содержащее в себе название жеста. В ином случае возвращается значение *null* (нуль) [9].

Классы *KinectManager.cs*, *GestureListener.cs* и *MouseSwipe.cs* позволяют описать необходимые условия для взаимодействия с прототипом.

Обращение происходит в теле функции *Update()*, которая инициализирует каждый кадр при запуске приложения. Прописанное условие отслеживания взмаха правой руки для дальнейшего описания действий выглядит следующим образом:

```
if(gestureName == «Left» || gestureListener.IsSwipeLeft())  
{  
...  
}
```

Данные строки кода описывают условие: если жест мыши является жестом влево либо жест, распознанный устройством Kinect, является взмахом влево, – выполнять строки кода, заключенные в теле этого условия. Описание остальных трех жестов реализовано по тому же принципу.

Данные строки прописаны внутри тела условий, описывающих отслеживание жестов взмаха рукой влево, вправо, вверх, вниз, а также жесты удержания руки на месте (клик), направления кисти на себя, от себя и перемещения ладони в приветственном жесте.

Проверка параметров и дополнительная настройка отслеживания движений необходимы по причине того, что данный жест должен быть доступен для распознавания не на всех разделах интерфейса. Для его ограничения в данном случае достаточно перечислить сцены, в которых инициализация функции *isPush()* и *IsPull()* была бы ошибочной. В данном случае это параметры появления новых элементов системы – окна папки изображений.

Последним необходимым компонентом управления прототипом интерфейса является контроль над курсором мыши. Ввиду того, что пользователь будет находиться на расстоянии 2–3 метров от экрана, у него не будет возможности воспользоваться мышью или клавиатурой. Поэтому следует привязать курсор мыши к суставу правой или левой руки виртуального скелета.

Скрипт *KinectManager.cs* содержит условия, позволяющие управлять курсором мыши без создания дополнительных скриптов. Для активации режима контроля курсора необходимо изменить значение параметра активной камеры *ControlMouseCursor* в окне *Inspector*. Для отображения курсора на экране необходимо создать игровой объект, который также прикрепляется к соответствующему параметру в окне настроек скрипта *KinectManager.cs*.

После активации всех необходимых параметров в прототипе интерфейса появляется возможность управления курсором без использования компьютерной мыши.

Активация четырех жестов и возможность контроля курсора в скрипте *GestureListener.cs* позволили создать все необходимые условия для полноценного контроля над интерфейсом. Этот факт позволяет утверждать, что бесконтактный интерфейс настолько адаптивен, что может использоваться в качестве основного ПО как людьми с ОВЗ, так и пользователями без ограничений моторики.

Работоспособность проекта можно проверить в ходе разработки в самом игровом движке Unity3D, так как он полностью интегрирован в среду разработки. Для этого можно использовать кнопки *Run* и *Pause*, что позволяет, во-первых, увидеть критические ошибки, которые не допускают запуск проекта, а во-вторых, проверить распределение производи-

тельности через встроенный Profiler (профайлер). Кроме всего прочего, профайлер позволяет измерять время, затраченное на выполнение того или иного процесса, отдельных процедур, функций, модулей и т. д. (рис. 3) [10].

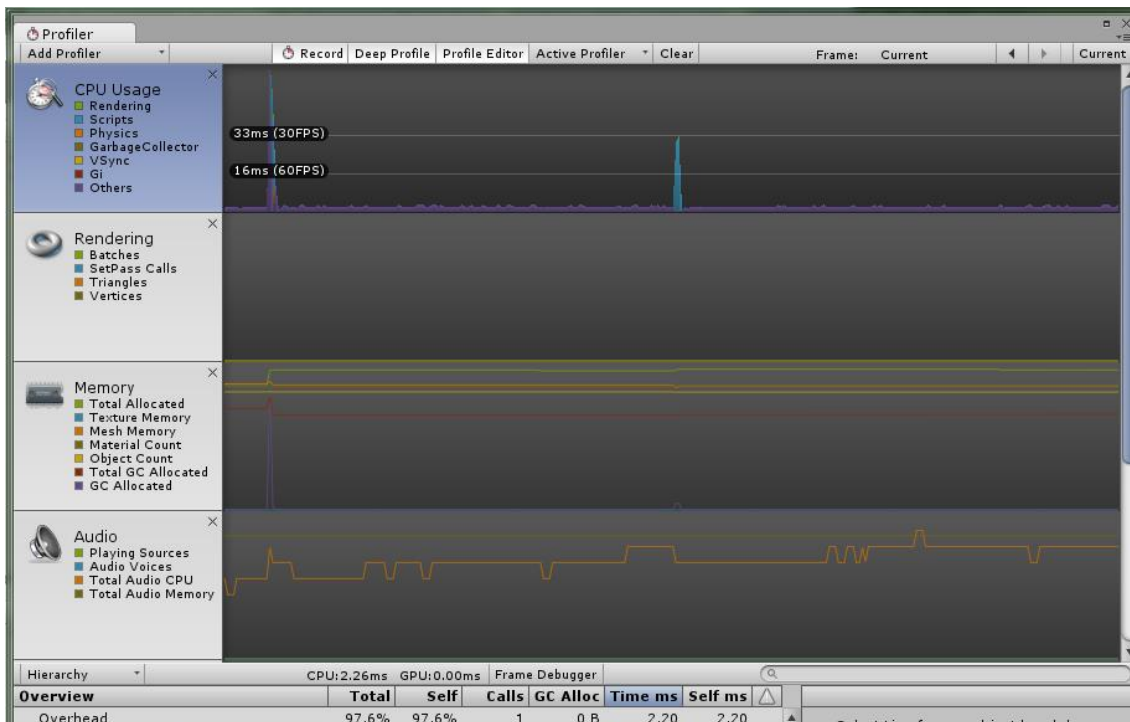


Рис. 3. Окно Profiler

Прототип бесконтактного интерфейса является полноценным приложением и, благодаря реализованному управлению с использованием мыши наравне с устройством Kinect, может быть установлен и запущен как пользователями без ограничений здоровья, так и людьми с ОВЗ.

Разработанный продукт пригоден для эксплуатации как электронный ресурс-приложение с расширением .exe, который может использоваться как людьми с ОВЗ, так и пользователями без ограничений моторики. Он может быть запущен в одной из трех операционных систем: Windows, MacOS или Linux. Таким образом, прототип интерфейса с бесконтактным взаимодействием является кроссплатформенным.

Литература

1. Зенг В. А. Формирование базового словаря жестов для естественного компьютерного бесконтактного интерфейса // Вестн. НГУ. Сер. Информ. технологии. 2018. Т. 16, № 3. С. 105–112.
2. Horton W. K. The icon book: visual symbols for computer systems and documentation. New York: J. Wiley, 2016. 417 p.
3. Кораблев Д. А. Выбор и обоснование показателя эффективности элементов экранных интерфейсов систем электронного документооборота // Сб. тезисов VII конф. молодых ученых. Вып. № 1. Информ. технологии. СПб. : СПб ГУ ИТМО, 2014. С. 112–119.
4. Zhang Z. Microsoft Kinect Sensor and its Effect // IEEE Computer Society. 2012. Vol. 19, No. 2. P. 4–12.
5. Smisek J., Jancosek M., Pajdla T. 3D with Kinect // Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), 2011 IEEE International Conference on, 2011. P. 1154–1160.

6. El-laithy R., Jidong H., Yeh M. Study on the use of Microsoft Kinect for Robotics Applications // Position Location and Navigation Symposium (PLANS), 2017 IEEE/ION, 2017. P. 1280–1288.
7. Hodges S., Freeman D., Hilliges O., Molyneaux D., Newcombe R., Shotton J. KinectFusion: Real-time 3D Reconstruction and Interaction Using a Moving Depth Camera // UIST'16 Proceedings of the 29th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, 2016. P. 559–568.
8. Xia L., Chen C., Agarwal J. Human Detection Using Depth Information by Kinect // Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), 2015 IEEE Computer Society Conference on, 2015. P. 15–22.
9. Варфел. Т. З. Прототипирование. М. : Манн, Иванов и Фербер, 2013. 240 с.
10. Быковский В. П. Моделирование прототипа интерфейса // Модели систем распределения информации и их анализ. М., 2012. С. 101–112.

УДК 615/47:616.61-008.64

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И АНАЛИЗА ДАННЫХ ПРИ ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ ФИСТУЛЫ

А. А. Турлай, П. В. Заикин, Н. Б. Назина
Сургутский государственный университет,
TurlayAA@mail.ru, zaikinpv@gmail.com, nnb60@mail.ru

В статье авторы рассматривают возможности применения методов машинного обучения и анализа данных при оценке состояния фистулы пациента, находящегося на гемодиализе. Рассмотрены подходы к получению первичных исходных данных в лабораторных условиях, методы и средства их обработки. Показаны методы классификации для подобного рода данных. Предложены варианты реализации носимых персональных устройств.

Ключевые слова: машинное обучение, нейронные сети, классификация, анализ звукового ряда.

APPLICATION OF MACHINE LEARNING METHODS AND DATA ANALYSIS FOR EVALUATING THE STATE OF FISTULA

A. A. Turlay, P. V. Zaikin, N. B. Nazina
Surgut State University,
TurlayAA@mail.ru, zaikinpv@gmail.com, nnb60@mail.ru

The article discusses the usage of machine learning methods for evaluating the state of fistula for patients on hemodialysis. The approach to gathering source data in laboratory conditions and methods of data processing are considered. Methods of classification are presented. Portable personal devices for patients are proposed.

Keywords: machine learning, neural networks, classification, sound sequence analysis.

Введение. Согласно отчету о распространенности почечных заболеваний один из десяти человек в мире имеет заболевание почек. При острой и хронической почечной недостаточности больным назначается гемодиализ.

На 2019 год более 2,8 млн пациентов во всем мире регулярно проходят процедуру диализа. В России заместительную почечную терапию получают около 60 тысяч человек.

Для очищения крови гемодиализом необходим так называемый «сосудистый доступ». Артериовенозная фистула считается на данный момент самым надежным видом сосудистого доступа. Для этого хирургическим путем создается артериовенозный шунт (прямое соединение артерии с веной).

Поскольку фистула играет ключевую роль в успешном проведении диализной терапии, очень важно поддерживать ее хорошее состояние. Одним из способов проверить, достаточен ли кровоток через фистулу, является прослушивание так называемого «шума».

Фистула имеет свойство со временем самопроизвольно закрываться, происходит так называемый тромбоз фистулы. Для своевременного получения помощи при возникновении угрозы «закрытия» фистулы необходимо производить постоянный контроль ее состояния.

На данный момент все методы контроля состояния фистулы требуют пребывания больного в стационаре. В настоящее время отсутствуют индивидуальные приборы для постоянного контроля состояния фистулы.

Невозможность контроля состояния фистулы беспокоит не только пациента, но и врача. В работах [1–3] изучаются вопросы, связанные с деградацией фистулы, и ставится проблема диагностики этих процессов.

При смешивании венозной и артериальной крови на стыке получается разность давления, вследствие чего появляется характерный звук – «шум» фистулы.

При получении травмы активируется процесс свертывания крови (коагуляция). С помощью специальных клеток – тромбоцитов – организм формирует естественный защитный слой, препятствующий потере крови. Этот процесс называется тромбообразованием (тромбозом) [1]. При этом сгустки крови образуются внутри кровеносных сосудов, где они препятствуют нормальному току крови. Процесс тромбообразования запускается так называемыми гемодинамическими механизмами: низкой скоростью кровотока, изменением температуры или колебаниями кровяного давления.

По ряду причин рука с фистулой особенно уязвима для этих явлений. После проведения многократных повторных пункций кожа над фистулой истончается. Кроме того, удаление воды из плазмы в ходе каждой процедуры диализа повышает концентрацию клеток в крови, т. е. кровь становится более густой. Иногда кровяное давление падает, что приводит к замедлению кровотока.

При закрытии фистулы требуется оперативное хирургическое вмешательство. Создание новой фистулы уже затруднительно и аппарат очистки крови подключается непосредственно к сердечной аорте пациента.

Улучшение методов контроля над состоянием фистулы пациента определяет качество и продолжительность жизни пациентов с утраченной функцией собственных почек.

Исходные данные. Для оценки состояния фистулы методом прослушивания перед исследователем встает задача получения исходных данных для анализа. В случае с пациентами гемодиализа для выбора адекватного метода лечения и снижения риска наиболее удобным способом является самостоятельный контроль пациентом состояния фистулы с инструментальной поддержкой. В связи с этими обстоятельствами было принято решение о разработке информационной системы оценки состояния фистулы пациента на основе анализа звукового сигнала, записанного программно-аппаратным комплексом «Ф1 Вита-контроль».

Предполагается, что в момент закрытия фистулы характер «шума» фистулы изменяется (предположительно затухает, становится тише).

При оперативном медикаментозном вмешательстве возможно предотвратить закрытие фистулы, тем самым сохранив её для дальнейшего использования при диализе.

Для контроля состояния фистулы разрабатывается информационная система оценки состояния фистулы пациента на основе анализа звукового сигнала, записанного программно-аппаратным комплексом (далее – ПАК) «Ф1 Вита-контроль».

ПАК представляет собой браслет-датчик с микрофоном, записывающим устройством, gsm-модулем, съемной батареей.

ПАК располагается в непосредственной близости к фистуле и записывает через определенные промежутки времени сигнал «шума» фистулы. Далее записанный сигнал по заданным критериям сравнивается с эталонным, при их расхождении врачу и пациенту направляются сигналы о необходимости консультаций. Также записанные сигналы при доступе к сети Интернет передаются на сервер информационной системы для дальнейшего анализа и накопления истории о состоянии фистулы пациента (рис. 1).

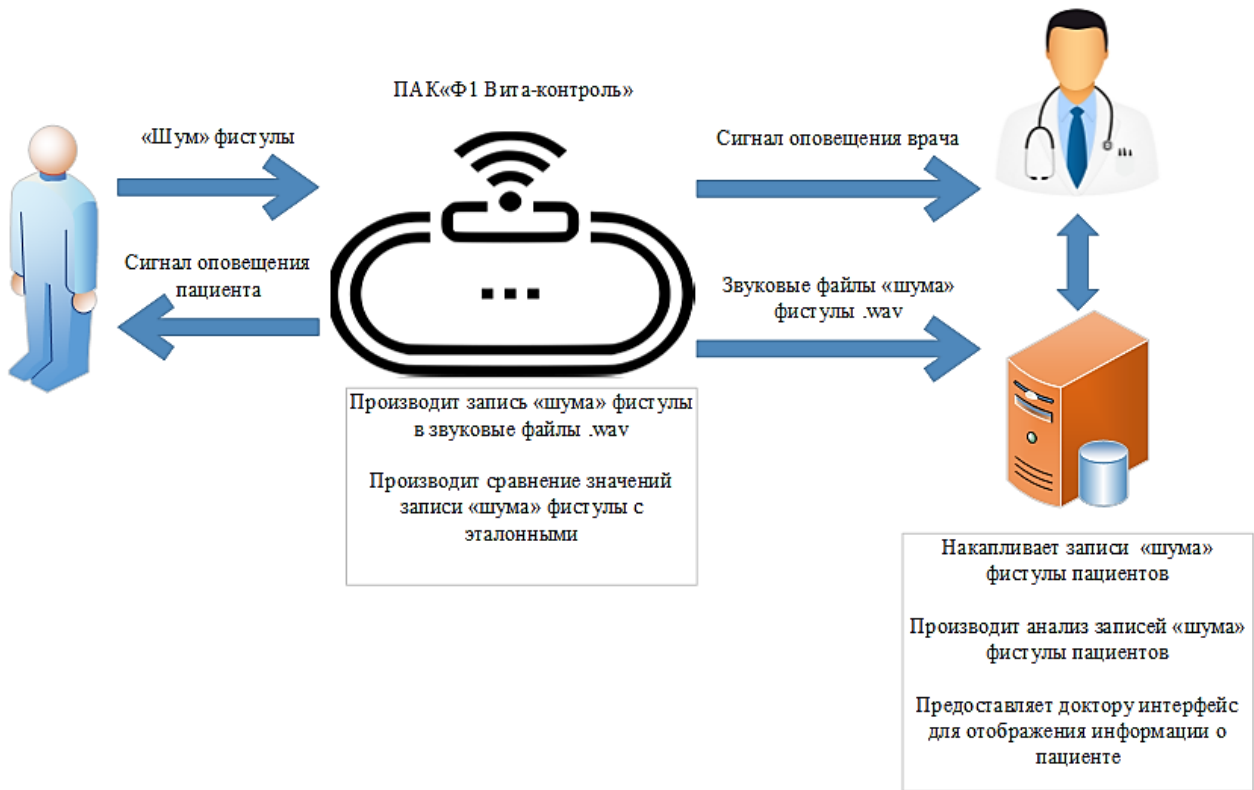
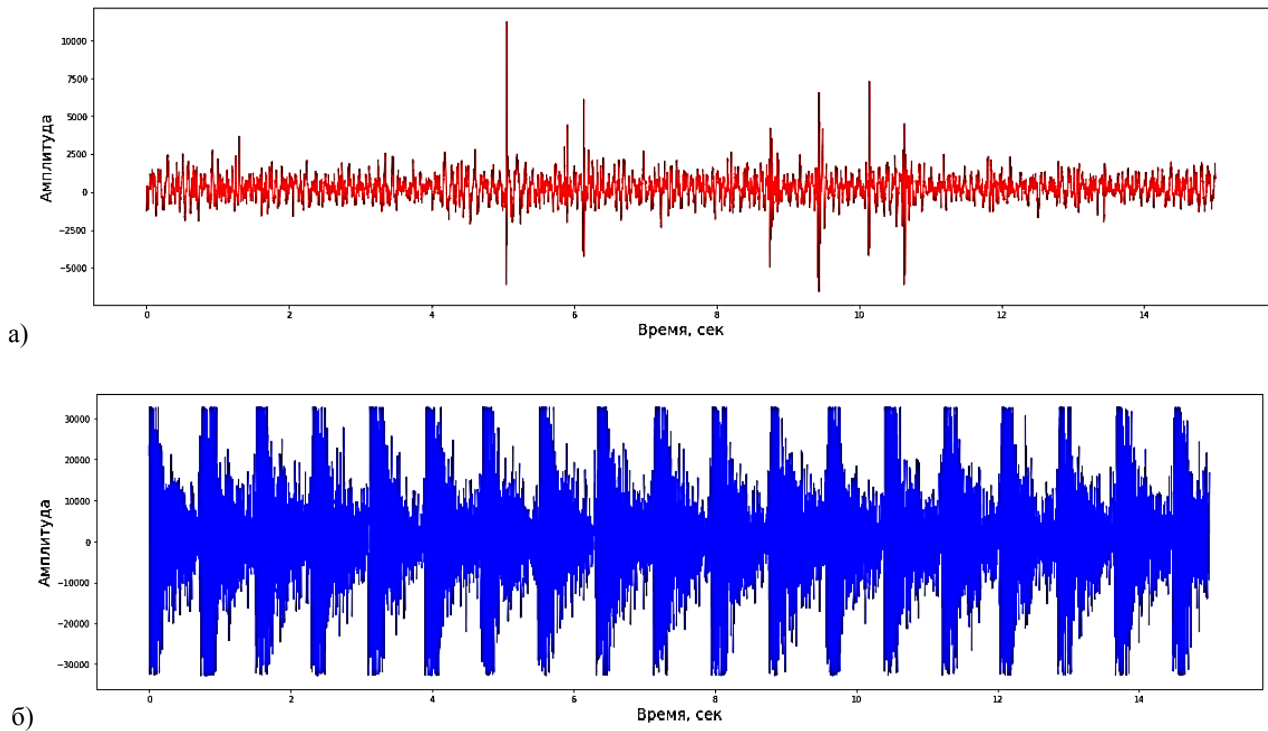
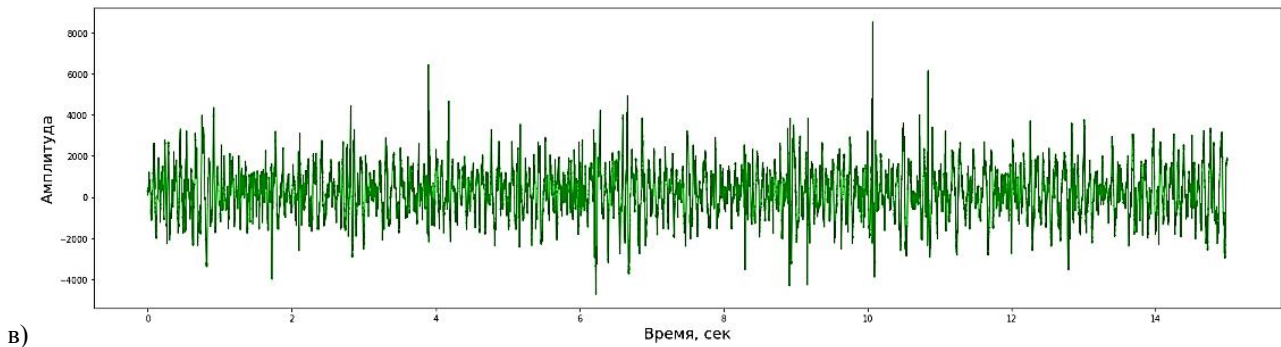


Рис. 1. Схема работы ПАК

Анализ. Собранная с помощью ПАК аудиоинформация была преобразована во временные ряды, примеры которых представлены на рисунках 2а, 2б, 2в.





в)

Рис. 2. Аудиоинформация, собранная с помощью ПАК:

- а – временной ряд сигнала, записанный на здоровой руке пациента;
 б – временной ряд сигнала фистулы, записанный в непосредственной близости с фистулой;
 в – временной ряд сигнала, записанный на руке здорового человека

Определены три класса сигналов: нормальное состояние фистулы (рис. 2б), полностью неработающая фистула (состояние здорового человека, т. к. фистула у него отсутствует), пограничные состояния.

Для целей снижения рисков, связанных с деградацией фистулы, необходимо определять именно этап перехода из нормального состояния в пограничное, чтобы увеличить время на принятие решения.

Временной ряд (запись 15 с) с частотой дискретизации 44 кГц содержит 660 000 значений амплитуды сигнала. Для анализа предложено уменьшить количество значений, необходимых для принятия решения о классификации.

Общую схему задачи классификации можно условно разделить на пять этапов:

1. Определение набора признаков.
2. Выделение признаков из аудиофайла.
3. Выбор алгоритма классификации.
4. Классификация обучающего набора, подбор параметров.
5. Переобучение модели на выявленных ошибках при классификации на обучающем наборе.

Определение набора признаков. Для классификации звуковых сигналов значимыми характеристиками являются средняя амплитуда и доминирующая частота. Гармоническим сигналам присуще большее количество признаков, но характер исследуемого сигнала ближе к шуму и не обладает гармоническими составляющими. Поэтому было принято решение остановиться на средней амплитуде и доминирующей частоте.

Выделение признаков из исходных данных. Подсчет средней амплитуды производится следующим методом:

$$A_{\text{сред}} = \frac{\sum x_i}{n}.$$

Доминирующую частоту можно получить, используя быстрое преобразование Фурье и поиск частоты с максимальной представленностью (рис. 3).

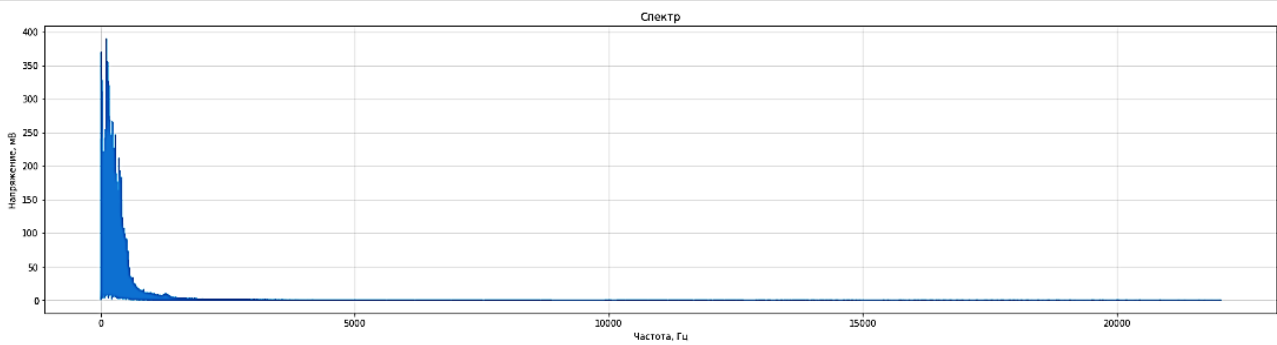


Рис. 3. Пример спектрограммы, полученной с помощью быстрого преобразования Фурье

Таким образом, обработав исходные файлы, мы получаем двумерный вектор, состоящий из двух значений средней амплитуды сигнала и доминирующей частоты.

Выбор алгоритма классификации. При небольшом наборе классов (в рассматриваемой задаче у нас их три) наиболее подходящим методом классификации видится логистическая регрессия. Такой подход довольно широко применяется при анализе звуковых сигналов различной этимологии [4–5].

Заключение. Построенная модель на основе алгоритмов логистической регрессии позволила на обучающей выборке, состоящей из 30 записей (10 записей пациентов, 20 записей здоровых людей), производить классификацию с ошибкой менее 5 %, корректировка обучающей выборки и перенастройка модели позволили снизить ошибку до 1 %.

Авторами ведется работа по сбору исходных данных для более точной настройки модели и апробации метода. В дальнейшем планируется исследовать возможность использования микрофона смартфона для получения исходных данных, сравнить качество записи и разработать автономный носимый прибор для сбора и обработки информации о состоянии фистулы непосредственно у пациента.

Литература

1. Николаев Е. Н., Мазайшвили К. В., Лобанов Д. С., Демина А. В., Блохина А. В. Современное состояние проблемы тромбоза сосудистого доступа у больных на гемодиализе // Вестник СурГУ. Медицина. 2019. № 3. С. 8–14.
2. Максимов А. В., Фейсханов А. К., Макаримов Э. Ш., Закиржанов Н. Р., Фейсханова Л. И. Тенденции развития хирургии сосудистого доступа у пациентов, находящихся на программном гемодиализе // Практич. медицина. 2014. № 4–20 (80). С. 83–85.
3. Гурков А. С. Кровоток в сосудах предплечья и кисти у пациентов с артериовенозной фистулой для гемодиализа : автореф. дис. ... канд. мед. наук. СПб., 2014. 21 с.
4. Salamon J., Bello J. P. Deep Convolutional Neural Networks and Data Augmentation for Environmental Sound Classification // IEEE Signal Processing Letters. 2017. Vol. 24, No. 3. P. 279–283.
5. Piczak K. J. Environmental Sound Classification with Convolutional Neural Networks // 2015 IEEE 25th International Workshop on Machine Learning for Signal Processing (MLSP). IEEE, 2015. P. 1–6.

УДК 622.3:004

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ЦЕНТРА

М. М. Хасанов, Р. М. Галеев, А. М. Маргарит, Ф. В. Краснов
*Научно-технический центр ООО «Газпром нефть», г. Санкт-Петербург,
ntc_odo@gazpromneft-ntc.ru*

Цифровые платформы признаны успешным инструментом для создания прорывных стратегий как в цифровых, так и в нецифровых отраслях. Авторы данного исследования делятся результатами разработки цифровой платформы для научно-технического центра в нефтегазовой отрасли. В исследовании сделан анализ известных подходов к созданию цифровых платформ, определены особенности научно-технической деятельности, показано, как была учтена специфика нефтегазовой отрасли в цифровой платформе «ЭРА:ГРАД».

Ключевые слова: цифровая трансформация, цифровые платформы, архитектура программного обеспечения, процесс разработки программного обеспечения, экосистема инноваций.

DIGITAL PLATFORM BUILDUP PRINCIPLES FOR SCIENCE AND TECHNOLOGY CENTER

M. M. Khasanov, R. M. Galeev, A. M. Margarit, F. V. Krasnov
*Gazprom Neft's Science and Technology Center, Saint Petersburg,
ntc_odo@gazpromneft-ntc.ru*

Digital platforms are recognized as a successful tool for the development of breakthrough strategies in both digital and non-digital industries. The authors of this study share the results of a digital platform project implemented at a science and technology center of the petroleum industry. The study analyzes known approaches to the establishment of digital platforms, identifies specific features related to scientific and research activities in the petroleum industry and shows how these features have been taken into account in the ERA:GRAD digital platform.

Keywords: digital transformation, digital platforms, software architecture, software development process, innovation ecosystem.

Введение. Цифровые платформы являются для компаний не просто модой, а отражением глубинных изменений в экономике. Появляются новые гигантские компании, а построенные «на века» компании исчезают. Цифровые платформы создают сетевой эффект, что приводит к изменениям в основных бизнес-процессах. Происходит создание новых источников ценностей, а не перераспределение существующих.

Общеизвестны примеры цифровых платформ в Интернет-отраслях – это Яндекс, МТС, Билайн, и др. Каждый октябрь InterBrand выпускает свой список самых известных компаний. И здесь есть европейские (Ikea и BMW), американские (Coca-Cola и Apple) и азиатские (Honda и Toyota) бренды. Если мы разделим эти фирмы по признаку наличия платформы, то 13 из 30 крупнейших корпораций являются платформенными компаниями. Примером компании, которая обладала 49 %-й долей на рынке смартфонов в 2009 г. и потеряла ее (2 % в 2015 г.), проигнорировав создание платформы, стала Канадская компания Research In Motion (бренд BlackBerry). Также показательно сравнение развития Apple и Microsoft в 80-е и 90-е годы прошлого века. Рыночная стоимость Microsoft, которая в это время активно развивала экосистему, росла по экспоненте, в то же время Apple не создавала свою платформу и росла линейно (рис. 1).

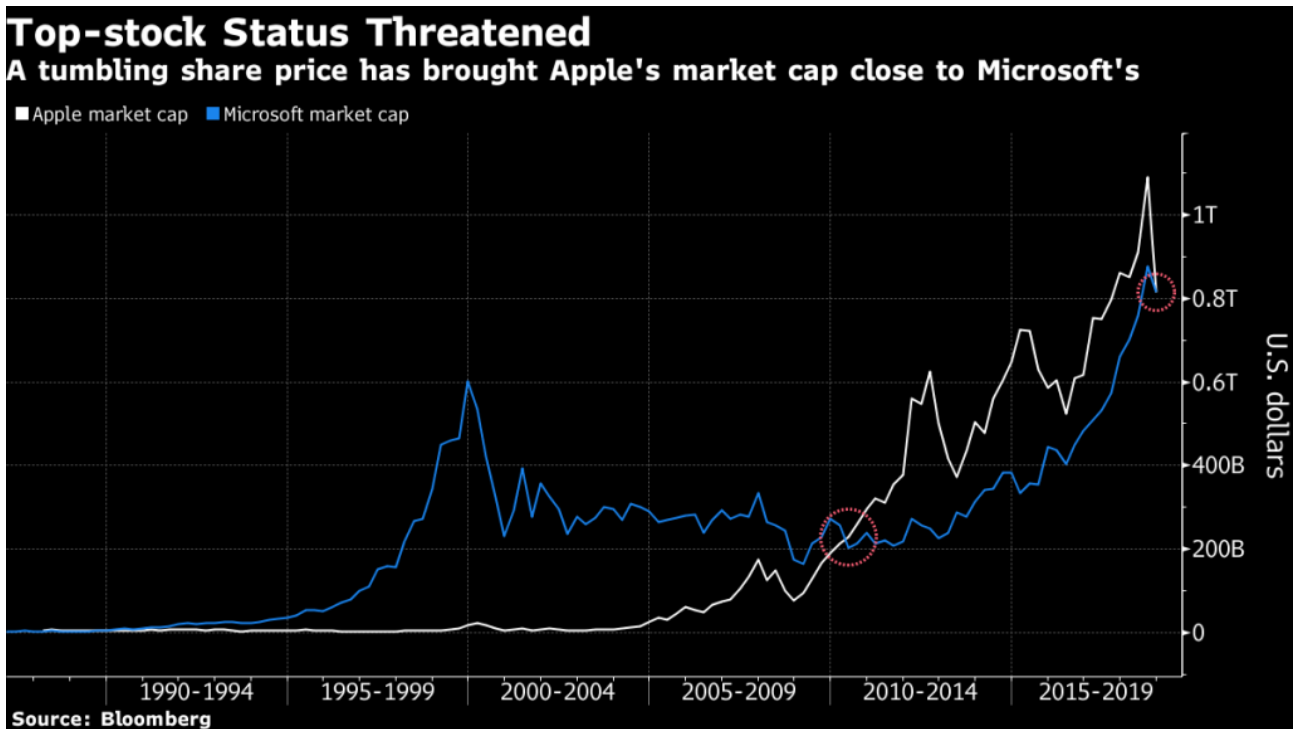


Рис. 1. Сравнение доли рынка Microsoft и Apple

Есть распространенное заблуждение, что цифровые платформы существуют только для высокотехнологичных фирм. Это не так. Например, General Electric (бытовая техника) уверенно движется в направлении платформ для интернета вещей и мониторинга удаленных устройств. Honda и BMW движутся в направлении цифровых платформ, Nike движется в направлении платформ, добавив датчики к обуви и мобильное приложение, чтобы вы могли сравнить себя с другими спортсменами. Daimler развивает экосистемы на своей Цифровой платформе, внедряя сервисы совместного использования поездок. Есть множество примеров цифровых платформ, создаваемых в сельском хозяйстве, энергетике и науке.

Подход к цифровизации НТЦ. Качественный скачок в структуре и динамике развития производительных сил обеспечивается деятельностью отраслевых научно-технических центров (далее – НТЦ). Количество НТЦ в энергетической отрасли растет из года в год, а по мере исчерпания запасов легкодобываемой нефти роль научной составляющей в ее добыче возрастает. Поэтому эффективность деятельности НТЦ является ключевой характеристикой, нуждающейся в современных методиках развития, таких как платформенность.

Традиционно НТЦ создавались по лекалам российских научно-проектных институтов, которые оценивали запасы месторождений нефти и газа, ставили их на государственный баланс и формировали проектные документы на разработку месторождений. В задачи таких институтов также входила разработка и внедрение новых технологий и материалов, но часто проявлялась их главная уязвимость – обособленность от бизнеса.

Изначально после получения разрешительных документов в Центральной комиссии по разработке месторождений НТЦ отходил в сторону, и в дело вступали производственники. Современные НТЦ представляют собой научно-проектную структуру, которая полностью интегрирована в производство.

Основные сквозные бизнес-процессы НТЦ отображены на рис. 2.

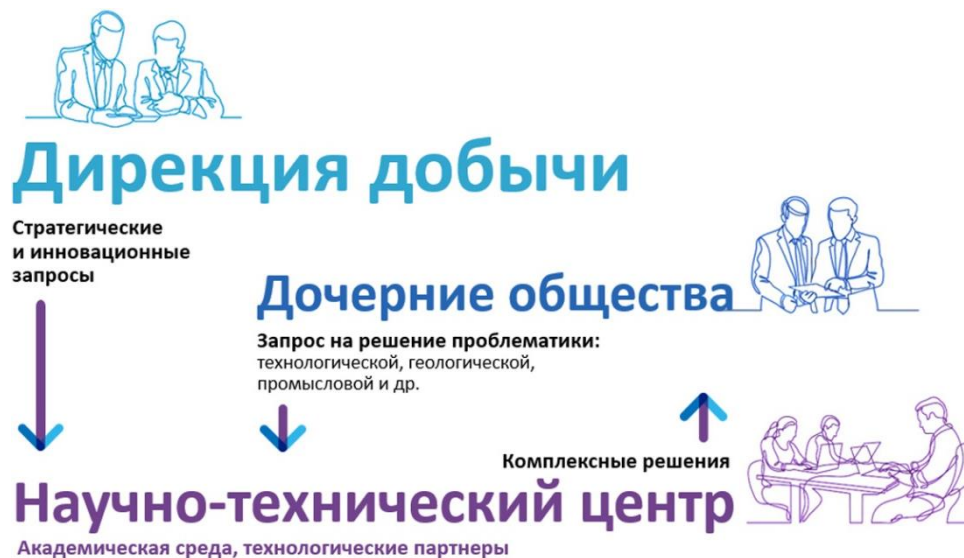


Рис. 2. Сквозные бизнес-процессы, связывающие НТЦ с Корпоративным Центром (КЦ) и Дочерними Обществами

Необходимо отметить, что рынок услуг НТЦ в РФ является высококонкурентным согласно исследованию компании Deloitte, поэтому от НТЦ требуется непрерывно повышать эффективность бизнес-процессов.

В книге [1] рассматривается создание в РФ рынка знаний, поэтому правомочно рассмотреть как частный случай рынок услуг НТЦ. Согласно экономической теории на этом рынке существуют две разные модели: «от спроса» и «от предложения». Поясним необходимость повышения эффективности бизнес-процессов НТЦ с использованием этих моделей. В случае варианта «от спроса», то есть при обращении к НТЦ для выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (далее – НИОКР), затраты НТЦ будут расти быстрее, а количество НИОКР, которые будет способен выполнить НТЦ, – уменьшаться. При работе «от предложения» стоимость НИОКР будет уменьшаться, а количество – увеличиваться. Оба варианта будут искать равновесный вариант и не возможны в абсолютной форме, а только в сочетании.

Цифровая платформа является одним из способов повышения эффективности бизнес-процессов [2], так как производит их глубинную трансформацию и позволяет найти новую точку равновесия на фазовой диаграмме «спрос-предложение».

Цифровая платформа «ЭРА:ГРАД». «Электронная разработка активов (ЭРА)» – это компонент цифровой трансформации «Газпром нефти» в сфере разведки и добычи, которая охватывает все основные направления деятельности: геологоразведку, геологию, обустройство месторождений, бурение, разработку, добычу. Ее реализация началась в 2012 году, а в 2014 году она была включена в Технологическую стратегию блока разведки и добычи «Газпром нефти» в качестве одного из ключевых направлений.

В основу платформенной философии «ЭРА:ГРАД» были положены три следующих принципа: «Автономность», «Магазин алгоритмов» и «Все – это таблица». Остановимся на них подробнее.

Автономность. Принцип автономности продиктован квази-статичным поведением источников данных во времени и поступательным характером работы с данными. В «ЭРА:ГРАД» задействовано более 30 различных источников данных, каждый из которых можно образно представлять в виде отдельной ИТ-системы со своими пользователями, регламентами и структурами данных. Подстраиваться под регламент обновления данных каждого источника даже для выполнения простого кросс-функционального расчета не представляется возможным, а в расчетах средней сложности бывают задействованы до 10 различных источников.

Для получения согласованной версии данных в «ЭРА:ГРАД» используется механизм локального кеширования в in-memoy базе данных. Следовательно агент (пользователь) платформы может работать со своей версией согласованных данных. Важно отметить, что некоторые данные имеют специальный режим доступа и не могут быть сохранены локально. Таким образом, в полученных при расчете результатах содержится метка кэша, на котором выполнены расчеты. Такой уровень прозрачности похож на один из элементов технологии BlockChain, когда в результате «защита» возможность проверить всю цепочку вычислений до источника [3].

Магазин алгоритмов. Вспоминая классический учебник тьюринговского лауреата Н. Вирта «Алгоритмы и структуры данных» [4], можно отметить, что алгоритмы живут своей отдельной жизнью от данных. Со времени написания этого учебника отношение к алгоритмам изменилось, наиболее точно оно выражено в теореме «no free lunch», доказанной Д. Волпертом в 1997 году [5]. Суть этой теоремы в сжатом и упрощенном виде состоит в том, что если вы не знаете ничего о данных, то не важно, какой алгоритм применять для их обработки. Подчеркнем еще раз, что точная математическая суть этой теоремы гораздо глубже, но для настоящего изложения достаточно упрощенного понимания. На рис. 3 изображена схема работы принципа «Магазин алгоритмов». Магазин в этой схеме представляет возможность выбора продукта на витрине, содержащей все доступные агенту (пользователю) алгоритмы. В доминирующей в настоящее время поведенческой модели общества потребления товаров и услуг такая образность является наиболее удобной и емкой. Аллюзия с магазинами приложений в популярных экосистемах (Apple Store, Google PlayMarket) также имеет смысл, подразумевая легкость применения приложений и возможность попробовать приложение на синтетических данных.

Приведем цитату визионера цифровизации Esko Kilpi: «Приложения сейчас выполняют то, что раньше делали менеджеры» («Apps can do now what managers used to do») [6], которая достаточно точно отражает то, как приложения изменяют ролевую модель бизнес-процессов.

На рис. 3 показана схема «Магазина алгоритмов», примененная в цифровой платформе «ЭРА:ГРАД».

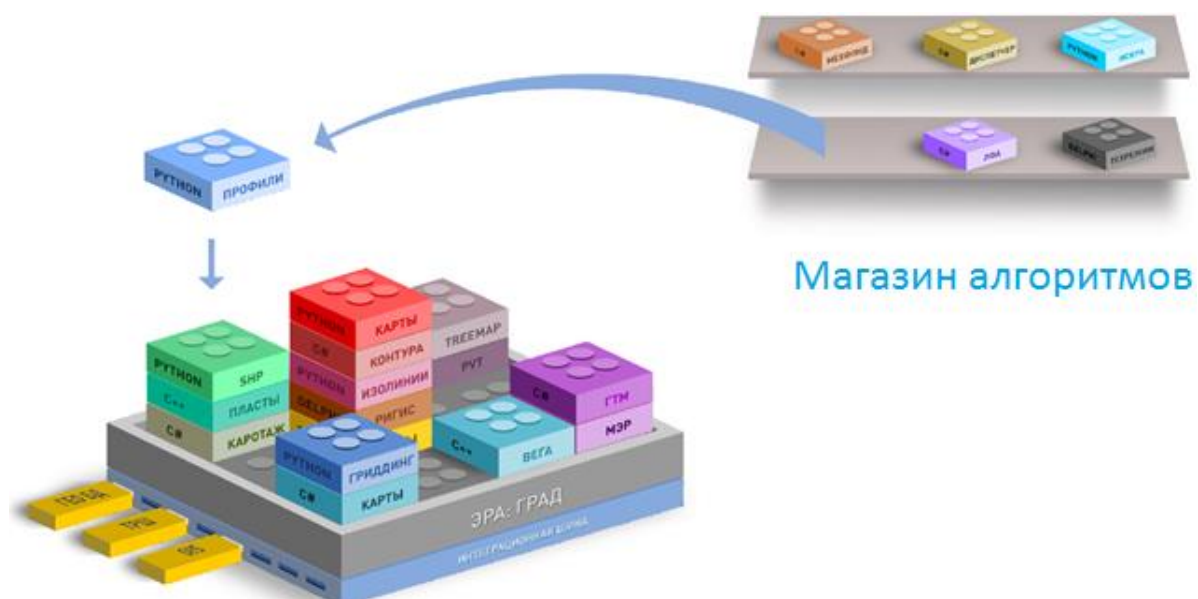


Рис. 3. Схема «Магазина приложений (алгоритмов)»

«Все – это таблица». Корни такого принципа тесно связаны с философией операционной системы Unix «Все – это файл», которая описывает одну из определяющих функций Unix

и его производных: широкий спектр ресурсов ввода/вывода, таких как документы, каталоги, жесткие диски, модемы, клавиатуры, принтеры и даже некоторые межпроцессные и сетевые коммуникации – это простые потоки байтов, представленные в пространстве имен файловой системы. В «ЭРА:ГРАД» лист MS Excel является началом и концом любого расчета, в процессе которого могут быть задействованы различные источники данных, информационные ресурсы и другие таблицы. Сравним этот принцип с распространенной среди Data Scientists оболочкой Python Notebooks. «ЭРА:ГРАД» также оперирует одной вычислительной ячейкой, которая может содержать код, комментарий и результат, но в отличие от Python Notebooks [7] выигрывает по доступности и позволяет строить более гибкие макеты.

Экосистема. Устойчивость работы цифровой платформы «ЭРА:ГРАД» обусловлена изложенными выше принципами. Агент (пользователь), проводящий расчеты на платформе «ЭРА:ГРАД», не зависит от пропускной способности каналов связи, производительности корпоративных информационных систем (источников) и технических регламентов обслуживания информационных систем. В расчетах используется гармонизированная версия данных и алгоритмов, которые будут отражены в результате. При таком построении неважно, кто работает в качестве агента: сотрудник в производственном процессе ДО, студент, выполняющий лабораторную работу, разработчик нового алгоритма или инфобот, занимающийся контролем качества данных.

Заложенные в «ЭРА:ГРАД» принципы позволили создать экосистему, называемую «Экосистема Научного Инжиниринга». Рассмотрим подробнее модель «Экосистемы Научного Инжиниринга», изображенную на рис. 4.



Рис. 4. Модель «Экосистемы Научного Инжиниринга»

Блок Научного Инжиниринга (далее – БНИ) НТЦ в этой схеме выступает в качестве центра компетенций по кросс-функциональным исследованиям и владельцем продукта «ЭРА:ГРАД». Основываясь на бизнес-процессах НТЦ (рис. 2), БНИ инициирует различные формы сотрудничества на платформе «ЭРА:ГРАД» с целью выполнения текущих НИР и создания заделов на будущее через обучение студентов, создание новых алгоритмов отраслевыми консорциумами и выполнение работ по государственным целевым программам и в рамках национальных проектов.

Дискуссия. Мы отдаем себе отчет в том, что изложенные выше принципы могут иметь право на существование только как плод проверки определенных гипотез в определенных условиях. Таковы требования научного метода. Поэтому далее будут сформулированы наши основные гипотезы.

Гипотеза о поступательном характере исследований. Под исследованием в утилитарном смысле будем понимать человеко-машинный процесс по преобразованию входных данных в выходные. Использование результатов («выходов») одного исследования как входных условий для другого представляется важным принципом для построения непрерывных процессов и уменьшения повторов одинаковых действий («каждый раз с нуля»).

Гипотеза об автоматизации рутинных интеллектуальных операций. Исследования состоят из рутинных и творческих (изобретательских) интеллектуальных операций. Важно понимать разницу и не пытаться автоматизировать с помощью ИТ-систем творческие операции, что может привести к выхолащиванию творческого подхода и отторжению цифровой платформы пользователями-исследователями. Наоборот, выявление и автоматизация рутинных интеллектуальных операций сделают цифровую платформу более привлекательной для исследователей, которые смогут полнее выразить свои интенции. Процесс выявления рутинных операций не может проводиться «сверху вниз», так как любой регламент, построенный на основании гипотез о производственных процессах, является лишь их упрощенной моделью, подменяющей задачи автоматизации рутинных операций на задачи декларации собственной уместности. Основой для автоматизации рутинных интеллектуальных операций является системное понимание операционной деятельности исследователей и создание лучших практик по использованию «ЭРА:ГРАД» в непосредственном диалоге с пользователями-исследователями.

Гипотеза о внедрении. ИТ-ландшафт НТЦ в нефтегазовой отрасли представляет симбиоз собственных разработок и коммерческих программных продуктов (Petrel, Eclipse, tNavigator, и т. п.). Создание отдельно стоящих (не взаимодействующих с другими программными продуктами) корпоративных приложений не может быть целью для цифровой платформы, так же как и приобретение коммерческих программных продуктов должно рассматриваться в контексте уже имеющихся собственных разработок и цифровой платформы.

Между коммерческими программными продуктами и собственными разработками в глазах пользователей-исследователей происходит конкурентная борьба. Нельзя не учитывать законы конкуренции (например, «Пять сил Портера») при планировании цифровой платформы [8].

Импортозамещение при внедрении следует понимать как двустороннее вытеснение дорогостоящих и малоиспользуемых опций, а также простейших операций из коммерческих продуктов в собственные разработки. Очевидные преимущества собственных разработок, состоящие в большей гибкости процесса, лучшей поддержке, прозрачности процессов расчетов, скорости и аутентичности, необходимо явно доказывать, а не только подразумевать при разворачивании.

Под количественной оценкой внедрения цифровой платформы следует понимать долю пользователей (целевой аудитории), использующих функции цифровой платформы в своих производственных процессах. Профиль разворачивания платформы цифровой платформы неоднороден: некоторые алгоритмы более востребованы, а некоторые менее.

Гипотеза многовариантности данных о предмете исследования. Многовариантность данных означает возможность одновременного существования различных версий одних и тех же данных. Под разными версиями данных будем понимать не только разную точность, разные масштабы и изменение данных о недрах во времени, но и то, что данные могут быть получены на основании различных методик разными людьми (в разных программных продуктах). Тем не менее данные должны быть сохранены и доступны для сравнения в течение длительного времени как принадлежность процесса, в результате которого они были получены. Цифровая платформа должна предоставлять возможность отслеживания полной истории от момента получения данных и их версии через применение алгоритмов и до конечного результата.

Гипотеза об онтологии. Несмотря на огромное количество алгоритмов, используемых в нефтегазовой отрасли, можно построить их онтологию. В такой онтологии будут присутствовать все характерные признаки для предметной области: таксономия терминов, их описания и правила вывода (рис. 5).

Геомоделирование на этапе разработки

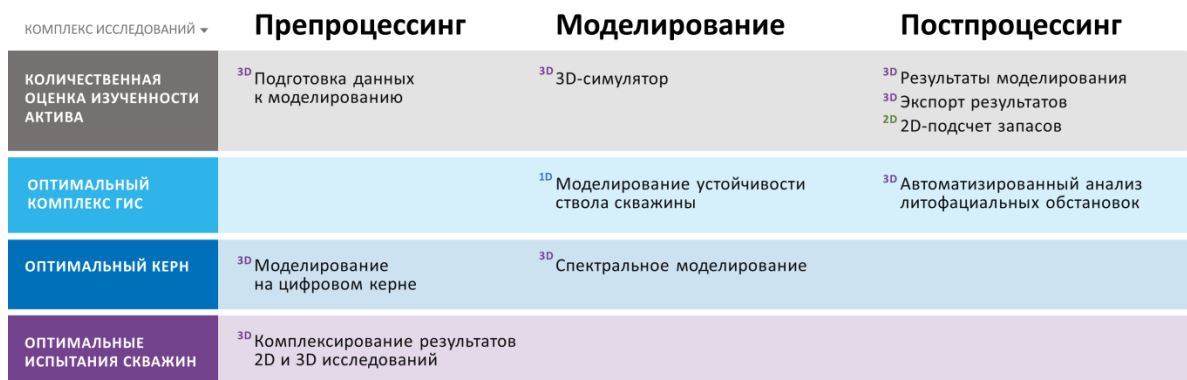


Рис. 2. Фрагмент онтологии алгоритмов разработки месторождений

В основе платформы «ЭРА:ГРАД» заложена онтология алгоритмов. Существует преемственность научного развития, любой новый алгоритм обязан найти свое место в существующей структуре и стать ее частью. Важно отметить, что речь идет именно об онтологии, а не иерархии информационных технологий, как, например, в исследовании [9].

Гипотеза о технологиях. Существует много различных технологий для разработки цифровых платформ. Наша гипотеза состоит в том, что в стратегической перспективе не так важен выбор какой-то одной технологии и «религиозное» почитание ее преимуществ и выискивание недостатков перед другими. Основой для этой гипотезы служат исторические примеры:

- крупнейшая цифровая платформа Facebook создана на PHP, хотя PHP используется в основном начинающими веб-программистами;
- в определенный момент времени компания Apple признала нецелесообразность собственных процессоров и операционной системы и перешла на процессоры Intel и сделала клон операционной системы FreeBSD;
- платформа Яндекс.Маркет изначально имела пользовательский (бекенд) интерфейс на MS Access.

И этот список можно продолжать. Наличие пользователей и их удовлетворенность гораздо важнее используемых разработчиками технологий разработки программного обеспечения.

Заключение. В настоящей работе рассмотрены принципы построения цифровой платформы для научно-технического центра в нефтегазовой отрасли. Авторы привели результаты практического применения рассмотренных принципов для создания цифровой платформы «ЭРА:ГРАД» для НТЦ «Газпром нефть».

Разработана процессная модель деятельности НТЦ верхнего уровня. Отметим, что возникающие в процессной модели положительные обратные связи нашли отражение в цифровой платформе «ЭРА:ГРАД», которая позволяет развивать экосистему и использовать ее сетевой эффект для перехода от модели экономики спроса на услуги НТЦ к модели экономики предложения услуг НТЦ. В корпоративном дискурсе это изменение соответствует переходу от запроса «Исследуйте возможности увеличения КИН с помощью технологии X» к предложению «Исследованы все возможные решения и наиболее оптимальным по NPV для месторождения X в перспективе до XXXX года является решение XX».

Описанные в статье принципы построения цифровой платформы для научно-технического центра обладают высокой степенью генерализации, так как не привязаны к одному проблемному домену (финансовый учет, геология, инжиниринг). Наоборот, цифровая платформа «ЭРА:ГРАД» является отражением того уровня синергии дисциплин, в котором нуждается научно-производственная организация в данный момент и в стратегической перспективе.

Важной особенностью также является низкий порог вхождения для агента в «ЭРА:ГРАД». Пользовательский интерфейс имитирует под привычную MS Excel страницу, но имеет

расширения для работы по методикам Machine Learning с помощью библиотек TensorFlow [10], Scikit-learn [11], Keras [12] и PyTorch [13], позволяет использовать программно-аппаратную архитектуру параллельных вычислений CUDA, которая существенно увеличивает вычислительную производительность при помощи графических процессоров. Программные агенты (инфоботы) используют API платформы ЭРА:ГРАД.

В заключение отметим, что контроль за методиками расчетов не менее важен, чем контроль за используемыми данными. Авторы неоднократно сталкивались в своей практике с «гениальными открытиями», основанием для которых послужило неграмотное использование алгоритмов и непонимание физических процессов, которые они моделируют. Возможности отследить смещенные экспертные оценки, ставшие результатом таких «открытий», через отпечаток (fingerprint) задействованного алгоритма на цифровой платформе «ЭРА:ГРАД» представляется уникальным рычагом методического контроля за научной честностью.

Литература

1. Велихов Е. П., Бетелин В. Б., Кушниренко А. Г. Промышленность, инновации, образование и наука в России. М. : Наука, 2009. 141 с.
2. Куприяновский В. П., Соколов И. А., Талашкин Г. Н., Дунаев О. Н., Зажигалкин А. В., Распопов В. В., Намиот Д. Е., Покусаев О. Н. Цифровая совместная экономика: технологии, платформы и библиотеки в промышленности, строительстве, транспорте и логистике // International Journal of Open Information Technologies. 2017. Т. 5, № 6. С. 65–75.
3. Chaum D. Security Without Identification: Transaction Systems to Make Big Brother Obsolete // Communications of the ACM. 1985. Vol. 28, No. 10. P. 1030–1044.
4. Никлаус В. Алгоритмы и структуры данных. Саратов : Профобразование, 2017. 274 с.
5. Wolpert D. H., Macready W. G. No Free Lunch Theorems for Optimization // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 1997. Vol. 1, No. 1. P. 67–82.
6. Flinn K. Leadership Development: A Complexity Approach. London : Routledge, 2018. 40 p.
7. Kluyver T., Ragan-Kelley B., Pérez F., Granger B. E., Bussonnier M., Frederic J., Ivanov P. Jupyter Notebooks – a Publishing Format for Reproducible Computational Workflows // Conference ELPUB. 2016. P. 87–90.
8. Портер М. Международная конкуренция: конкурентные преимущества стран. М. : Альпина Паблицер, 1993. 896 с.
9. Гимранов Р. Д. Стратификация информационных систем // Вестник кибернетики. 2016. № 1. С. 57–62.
10. Abadi M., Barham P., Chen J., Chen Z., Davis A., et al. TensorFlow: a System for Large-Scale Machine Learning // OSDI. 2016. Vol. 16. P. 265–283.
11. Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B. et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python // Journal of Machine Learning Research. 2011. Vol. 12. P. 2825–2830.
12. Gulli A., Pal S. Deep Learning with Keras. : Packt Publishing Ltd, 2017. 318 p.
13. Paszke A., Gross S., Chintala S., Chanan G., Yang E. et al. Automatic Differentiation in PyTorch // 31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017), Long Beach, CA, USA. 4 p.

Сетевое издание. Полные тексты статей размещаются на официальном сайте издания jc.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 опубликования 21.01.2020

Формат 60 × 84/8

Уч.-изд. л. 7,5

Цена свободная