

Министерство образования и науки
Российской Федерации

НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал
Северо-Кавказского федерального
университета

ISSN 2308–4758



Выпуск № 3, 2017 г.

Выходит 4 раза в год

	«Наука. Инновации. Технологии» Научный журнал Северо-Кавказского федерального университета
Учредитель	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет»
Главный редактор	д-р геогр. наук, профессор В. С. Белозеров
Редакционный совет	А. А. Левитская, председатель, ректор СКФУ, канд. филол. наук, доцент; А.А. Лиховид, заместитель председателя, проректор по научной работе и стратегическому развитию СКФУ, д-р геогр. наук, профессор; В. С. Белозеров, главный редактор, д-р геогр. наук, профессор; М.Ч. Залиханов, д-р геогр. наук, профессор, академик РАН (Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик); А.Г. Храмцов, д-р техн. наук, профессор, академик РАН; Ю. Ю. Балега, д-р физ.-мат. наук, академик РАН (САО РАН, п. Нижний Архыз); С.В. Рязанцев, д-р экон. наук, член-корр. РАН (ИСПИ РАН, г. Москва); В.С. Тикунов, д-р геогр. наук, профессор (МГУ им. Ломоносова, г. Москва); С. Пестрак, профессор (Институт Жана Лямура университета Лотарингии, г. Нанси, Франция)
Редакционная коллегия	М.Т. Абшаев, д-р физ.-мат. наук, профессор (Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик); А.А. Лиховид, д-р геогр. наук, профессор; В.С. Белозеров, д-р геогр. наук, профессор (главный редактор); Т.П. Бондарь, д-р мед. наук, профессор; В.Б. Бородулин, д-р мед. наук, профессор (Саратовский ГМУ Росздрава, г. Саратов); О.А. Бутова, д-р мед. наук, профессор; Т.И. Герасименко, д-р геогр. наук, профессор (Оренбургский гос. университет, г. Оренбург); В. А. Гридин, д-р геол.-минерал. наук, профессор; Л.И. Губарева, д-р биол. наук, профессор; Т.И. Джандарова, д-р биол. наук, доцент; Ю.И. Диканский, д-р физ.-мат. наук, профессор; Л.А. Диневич, д-р физ.-мат. наук, профессор (Тель-Авивский университет, г. Тель-Авив); К.В. Ерин, д-р физ.-мат. наук, профессор; А.И. Жакин, д-р физ.-мат. наук, профессор (Юго-Западный гос. университет, г. Курск); А.Р. Закинян, канд. физ.-мат. наук, доцент; А.О. Иванов, д-р физ.-мат. наук, профессор (Уральский федеральный университет им. Б. Ельцина); А.А. Коляда, д-р физ.-мат. наук, доцент (Белорусский гос. университет, г. Минск); С.А. Куникин канд. физ.-мат. наук, доцент; А.Д. Лодыгин, д-р техн. наук, доцент; А.В. Лысенко, д-р геогр. наук, доцент; И.Н. Молодикова, канд. геогр. наук (Центрально-Европейский университет, г. Будапешт); В.И. Наац, д-р физ.-мат. наук, профессор; Т.Г. Нефедова, д-р геогр. наук, вед. науч. сотрудник РАН (ИГ РАН, г. Москва); П.М. Полян, д-р геогр. наук, вед. науч. сотрудник РАН (ИГ РАН, г. Москва); В.В. Разумов, д-р геогр. наук, профессор; Л.Д. Тимченко, д-р ветеринар. наук, профессор; Л. Д. Цатурян, д-р мед. наук, профессор (Ставропольский гос. мед. университет, г. Ставрополь); Н.И. Червяков, д-р техн. наук, профессор; В. А. Шальнев, д-р геогр. наук, профессор; Н.А. Щитова, д-р геогр. наук, профессор; А.С. Молахосеини, канд. наук, доцент (Исламский университет Азад, Керман, Иран); Х.А.А. Кдаис, канд. техн. наук, профессор (Иорданский университет науки и технологии, Амман)
Свидетельство о регистрации	ПИ № ФС77–52723 от 8.02.2013
Подписной индекс	Объединенный каталог. ПРЕССА РОССИИ. Газеты и журналы: 94011
Журнал включен	в БД «Российский индекс научного цитирования». Журнал «Вестник Ставропольского государственного университета» перерегистрирован в журнал «Наука. Инновации. Технологии» в связи с переименованием учредителя.
Журнал	в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, с 1 декабря 2015 г.
Адрес Телефон Сайт E-mail	355009, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1 (8652) 33-07–32 www.ncfu.ru nit_ncfu@mail.ru
ISSN	2308–4758
©	ФГАОУ ВПО «Северо-Кавказский федеральный университет», 2017

	«Science. Innovations. Technologies» North Caucasus Federal University
Founder	Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «North Caucasus Federal University»
Editor in chief	V. S. Belozеров, Doctor of Geographical Sciences, professor
Editorial Council	A.A. Levitskaya, chairman, Rector SKFU, PhD. Philology Sciences, Associate Professor; A.A. Likhovid, Vice Chairman, Doctor of Geographical Sciences, Professor; V.S. Belozеров, Chief Editor, Doctor of Geographical Sciences, professor; M.Ch. Zalikhonov, Dr. of Geographical Sciences, professor, academician of the Russian Academy of Sciences (Mountain Geophysical Institute, Nalchik); A.G. Hramtsov, Dr. Technical Sciences, Professor, academician of the Russian Academy of Sciences; Y.Y. Balega, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, academician of the Russian Academy of Sciences (SAO RAS, p. Lower Arhiz); S.V. Ryazantsev, Dr. of Economic Sciences, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (ISPR RAS, Moscow); V.S. Tikunov, Doctor of Geographical Sciences, professor (Lomonosov Moscow State University, Moscow); S. Pestrak, Professor (Institute Jean Lamour, Measurement and electronic architectures group, Nancy, France)
Editorial Board	M.T. Abshaev, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, professor (Mountain Geophysical Institute, Nalchik); A.A. Likhovid, Dr. of Geographical Sciences, professor; V.S. Belozеров, Dr. of Geographical Sciences, professor, editor in chief; T.P. Bondar', MD, professor; V.B. Borodulin, MD, Professor (Saratov State Medical University, Saratov); O.A. Butova, MD, professor; Gerasimenko T.I., Dr. of Geographical Sciences, Professor (Orenburg State University, Orenburg); Gridin V.A., Dr. of geological-mineralogical Sciences, Professor; L.I. Gubareva, Sc.D., Professor; T.I. Dzhandarova, Sc. D., Associate Professor; Y.I. Dikanskiy, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, professor; L.A. Dinevich, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, Professor (Tel-Aviv University, Tel-Aviv); K.V. Erin, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, professor; A.I. Zhakin, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, Professor (Southwest State University, Kursk); A.R. Zakinyan, candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate professor; A.O. Ivanov, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, Professor (Yeltsin's Ural Federal University); A.A. Kolyada, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor (Belarusian State University, Minsk); S.A. Kunikin, Ph.D., Associate Professor; A.D. Lodygin, Dr. of Technical Sciences, associate professor; A.V. Lysenko, Dr. of Geographical Science, associate professor; I.N. Molodikova, Ph.D. (Central European University, Budapest); V.I. Naats, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, Professor; T.G. Nefedova, Dr. of Geographical Sciences, Leading Researcher, Russian Academy of Sciences (IG RAS, Moscow); P.M. Polyan, Dr. of Geographical Sciences, Leading Researcher, Russian Academy of Sciences (IG RAS, Moscow); V.V. Razumov, Dr. of Geographical Sciences, Professor; L.D. Timchenko, Dr. of Veterinary Sciences, Professor; Tsaturyan L.D., MD, Professor (Stavropol State Med. University, Stavropol); N.I. Chervyakov, Dr. of Technical Sciences, professor; V.A. Shalnev, Dr. of Geographical Sciences, Professor; N.A. Shitova, Dr. of Geographical Sciences, Professor; A.S. Molahosseini, assistant professor, PH.D (Islamic Azad University, Kerman); H. Qdais, Ph.D in environmental engineering, professor (Jordan University of science and technology, Amman)
Certificate	ПИ № ФС77–52723 dated February 8th 2013.
The Index	The Journal is included in the DB «Russian index of the scientist quoting».
The journal	«Bulletin of the Stavropol state University» renamed in the journal «Science. Innovations. Technologies» due to renaming of the founder.
The journal	is recommended by the State Commission for Academic Degrees and Titles for publishing the dissertation research results
Adress	355009, Stavropol, Pushkin street, 1
Phone	8 (8652) 33-07–32
Site	www.ncfu.ru
E-mail	nit_ncfu@mail.ru
ISSN	2308–4758

СОДЕРЖАНИЕ

«Наука. Инновации. Технологии», № 3, 2017

ФИЗИКО–МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

**Авдеев А.В., Жданова Н.В.,
Дерябин М. И., Пигулев Р.В.**

Особенности накопления молекул в триплетном состоянии при возбуждении органических соединений импульсами прямоугольной формы 7

**Гришанина О.А.,
Симоновский А.Я.,**

Яновский А.А. Гидродинамика и теплообмен в процессах охлаждения намагничивающейся пластины в магнитной жидкости в магнитном поле 15

Коновалов Д.А. Моделирование теплогидравлических характеристик микроканальных теплообменных элементов на основе матрицы монокристаллов кремния 29

**Корнеев П.К., Журавлева И.А.,
Непретимова Е.В.,
Гладков А.В.,**

Лягин А.М. Предфракталы как источник новых дробно-рациональных приближений функций, имеющих фрактальное представление. 41

**Наац И.Э., Наац В.И.,
Рыскаленко Р.А.,**

Ярцева Е.П. Операторы потенциального типа в задачах прикладного анализа 51

Туровский Я.А., Борзунов С.В., Алексеев А.В., Болдырев С.В. Моделирование дополни- тельного канала обратной связи в оку- лографических и нейро-компьютерных ин- терфейсах.	69
--	----

Червяков Н.И., Ляхов П.А., Калита Д.И., Васькина А.В. Численная реализация метода фильтрации изображений с вычислениями в системе остаточных классов	81
---	----

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Бадов А.Д. Особенности географии преступности на Северном Кавказе в современный период.	95
---	----

Белозеров В.С., Черкасов А.А. Региональные особенности формирования этнической структуры населения России	105
--	-----

Гасумов Р.А., Костюков С.В., Овчаров С.Н., Мочалов В.П., Фёдорова Н.Г., Нифантов В.И. Жидкости глушения для газовых и газокон- денсатных скважин с повышенными плас- товыми температурами	117
---	-----

Гасумов Р.Р., Осадчая И.Л., Копченков В.Г., Бекетов С.Б. Наполнители растительного происхождения к блокирующим составам для глушения скважин	127
---	-----

Дудаев С.А., Керимов А-Г.Г., Гридин В.А., Галай Б.Ф. Оптимизация комплекса геофизических исследований скважин в аргиллитоподоб- ных палеогеновых отложениях на приме- ре нефтяных месторождений Восточного Предкавказья	141
---	-----

Корнева Л.И.	Особенности территориальной структуры инвестиционных проектов в Ставропольском крае	149
Котти Б.К., Заикина И.Н., Жильцова М.В.	Распространение иксодового клеща <i>Hyalomma marginatum</i> Koch (Acari: Ixodidae) в Ставропольском крае	161
Машков В.А., Верисокин А.Е., Димитриади Ю.К., Лукьянов В.Т., Гераськин В.Г.	Анализ применяемых конструкций якорящих узлов и различных уплотнителей пакеров, используемых при проведении гидро-разрыва пласта	175
Шальнев В.А., Ляшенко Е.А., Мельничук В.В., Токарев А.А.	Геохимический подход в изучении пространственных связей и трансформации ландшафтов (на примере Западного Кавказа)	189
ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ		201
ABOUT THE AUTHORS		207

ФИЗИКО–МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

«Наука. Инновации. Технологии», №3, 2017

УДК 575.373

Авдеев А. В. [Avdeev A.V.],
Жданова Н. В. [Zhdanova N. V.],
Дерябин М. И. [Deryabin M.I.],
Пигулев Р. В. [Pigulev R.V.]

ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ МОЛЕКУЛ В ТРИПЛЕТНОМ СОСТОЯНИИ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ ИМПУЛЬСАМИ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ

**Features of molecules accumulation in the triplet
state at excitation of the organic compounds
by rectangular pulses**

Проведено теоретическое исследование временной зависимости концентрации молекул в триплетном состоянии при возбуждении органических соединений световыми импульсами большой интенсивности с учетом обеднения основного состояния. С использованием полученных аналитических выражений выполнено компьютерное моделирование зависимости заселенности триплетного уровня молекул от времени в течение импульса возбуждения и после его прекращения. Показано, что при определенном соотношении между константами скоростей внутримолекулярных переходов и длительностью импульса возбуждения заселенность триплетного уровня может увеличиваться в несколько раз после прекращения импульса. Это происходит в результате перехода в триплетное состояние молекул, которые к концу импульса возбуждения находились в возбужденном синглетном состоянии. Отмечается, что данный эффект необходимо учитывать при исследовании динамики фотофизических процессов и фотохимических реакций, происходящих с участием триплетных состояний органических молекул при их инициировании короткими световыми импульсами большой интенсивности.

The theoretical research of the time dependence of molecules concentration in triplet state under excitation organic compounds by light pulses with high intensity taking into account depletion of ground state have been carried out. The computer simulation of the dependence of the triplet level population of molecules on time during the excitation pulse and after its ending have been realized using obtained analytic expressions. It is shown that for certain relation between the rate constants of intramolecular transitions and the excitation pulse duration, the triplet level population can increase several times after excitation ending. It is due to the transition of molecules which were in the excited singlet state at the end of the excitation pulse to the triplet state. Note that this effect must be considered in the study of dynamic of photophysical processes and photochemical reactions taking place with the participation of triplet states of organic molecules when they are excited by short light pulses of high intensity.

Ключевые слова: триплетное состояние, синглетное состояние, органические соединения, импульсное возбуждение.

Key words: triplet state, singlet state, organic compounds, pulsed excitation.

Введение

Межмолекулярный перенос энергии электронного возбуждения, происходящий посредством диполь-дипольных и обменных взаимодействий, изучался многими исследователями. Удовлетворительную квантово-механическую теорию резонансного переноса энергии при диполь-дипольных

взаимодействиях впервые разработал Ферстер [1]. Декстер [2] расширил теорию Ферстера на случай мультипольных и обменных взаимодействий. Инокути и Хирояма [3] вывели формулу для функции затухания люминесценции донора при обменном переносе энергии и предложили процедуру определения таких параметров как Боровский радиус молекулы L и критическое расстояние переноса энергии R_0 . Однако даже для наиболее изученных пар, указанные параметры, определенные с использованием предложенной ими процедуры [3–6], заметно отличаются. В работе [7] было введено понятие минимального сближения донора и акцептора в указанную методику. Но и эта модернизированная методика не позволяет удовлетворительно описать экспериментальные кривые затухания флуоресценции донора на всех ее стадиях. Во многих случаях наибольшее расхождение между теоретическими кривыми и экспериментальными данными проявляется на начальной стадии затухания [7]. В исследованиях затухания флуоресценции на начальной стадии обычно донор возбуждают световым импульсом лазеров длительностью порядка 10 нс и мощностью 10 кВт и выше [7, 8]. При такой мощности импульса существенный вклад в концентрацию триплетных состояний после прекращения возбуждения может вносить переход части молекул из возбужденного синглетного состояния в триплетное. Этот процесс не учитывается при использовании лазеров в качестве источников импульсного возбуждения в указанных выше работах. В связи с этим возникает необходимость исследования особенностей заселения возбужденных синглетного и триплетного состояний при импульсном фотовозбуждении органических соединений. В [9] рассмотрено изменение во времени концентрации молекул в триплетном состоянии при возбуждении органических соединений импульсами различной формы. Однако полученные авторами этой работы результаты справедливы при малой мощности светового импульса, так как при выводе формул не учитывается обеднение основного уровня вследствие перехода части молекул в возбужденное состояние. В настоящей работе приведены аналитические выражения, описывающие временную зависимость концентрации молекул в триплетном состоянии при возбуждении органических соединений импульсами прямоугольной формы, учитывающие обеднение основного состояния, и выполнено компьютерное моделирование данного процесса для трех соединений, что позволило установить его особенности.

Модель

Рассмотрение временной зависимости концентрации молекул в триплетном состоянии при возбуждении одиночными импульсами прямоугольной формы основано на работах [10, 11], в которых получены формулы для кинетики заселения синглетного и триплетного уровней при непрерывном возбуждении. Как и в [10, 11] рассматривается трехуровневая система энергетических уровней молекулы, так как высокоэнергетические состояния не играют значительной роли в заселении триплетного уровня. Для концент-

рации молекул в основном n_0 , возбужденном синглетном n_S и триплетном n_T состояниях имеем систему уравнений баланса для трехуровневой системы:

$$\frac{dn_0}{dt} = -k_0 n_0 + k_S n_S + k_T n_T, \quad (1)$$

$$\frac{dn_S}{dt} = k_0 n_0 - k_S n_S - k_{ST} n_S, \quad (2)$$

$$\frac{dn_T}{dt} = k_{ST} n_S - k_T n_T, \quad (3)$$

$$N = n_0 + n_S + n_T. \quad (4)$$

Здесь k_0 , k_S , k_{ST} , и k_T – константы скоростей переходов из основного в возбужденное синглетное состояние, из возбужденного синглетного состояния в основное, из возбужденного синглетного состояния в триплетное и из триплетного состояния в основное соответственно.

N – общая концентрация молекул в растворе, которая сохраняется. Константа скорости k_0 прямо пропорциональна интенсивности возбуждающего света.

Решение (1) – (4) имеет вид:

$$n_T = \frac{D}{B(\alpha_1 - \alpha_2)} [\alpha_2 \exp(\alpha_1 t) - \alpha_1 \exp(\alpha_2 t) + (\alpha_1 - \alpha_2)], \quad (5)$$

$$n_S = \frac{D}{B(\alpha_1 - \alpha_2)k_{ST}} [k_T(\alpha_1 - \alpha_2) + (B + k_{ST}\alpha_1)\exp(\alpha_2 t) - (B + k_{ST}\alpha_2)\exp(\alpha_1 t)], \quad (6)$$

$$\text{где} \quad \alpha_{1,2} = \frac{-A}{2} \mp \left[\left(\frac{A}{2} \right)^2 - B \right]^{1/2}, \quad (7)$$

$$A = k_0 + k_S + k_{ST} + k_T, \quad B = k_T(k_0 + k_S + k_{ST}) + k_0 k_{ST}, \quad D = k_0 k_{ST} N.$$

При фотовозбуждении прямоугольным импульсом длительностью τ_0 значения концентраций возбужденных молекул в триплетном n_T^0 и возбужденном синглетном n_S^c состояниях к концу импульса будут определяться формулами (5) и (6) при замене t на τ_0 .

Концентрация молекул в триплетном состоянии после прекращения импульса возбуждения будет изменяться согласно выражению:

$$n_T(t) = n_T^0 \exp\left(-\frac{t - \tau_0}{\tau_T}\right) + n_T^S(t), \quad (8)$$

где $\tau_T = k_T^{-1}$ – время жизни молекул в триплетном состоянии. Первый член в (8) описывает дезактивацию возбужденных молекул, находившихся к концу импульса в триплетном состоянии, а

второй член n_T^S связан с переходом молекул из возбужденного синглетного состояния в триплетное после прекращения импульса возбуждения. Для n_T^S можно записать

$$\frac{dn_T^S}{dt} = k_{ST}n_S(t) - k_T n_T^S(t). \quad (9)$$

С учетом того, что распад n_S происходит согласно

$$n_S(t) = n_S^0 \exp\left(-\frac{t - \tau_0}{\tau_S}\right), \quad (10)$$

где $\tau_S = (k_S + k_{ST})^{-1}$, решение (9) имеет вид:

$$n_T^S(t) = \frac{k_{ST}}{k_S + k_{ST} - k_T} n_S^0 \left[\exp\left(-\frac{t - \tau_0}{\tau_T}\right) - \exp\left(-\frac{t - \tau_0}{\tau_S}\right) \right]. \quad (11)$$

После подстановки (11) в (8) получим следующее аналитическое выражение для изменения концентрации молекул в триплетном состоянии после прекращения импульса возбуждения:

$$n_T(t) = n_T^0 \exp\left(-\frac{t - \tau_0}{\tau_T}\right) + \frac{k_{ST}n_S^0}{k_S + k_{ST} - k_T} \left[\exp\left(-\frac{t - \tau_0}{\tau_T}\right) - \exp\left(-\frac{t - \tau_0}{\tau_S}\right) \right]. \quad (12)$$

Функция (12) имеет максимум при

$$t_m = \tau_0 + \frac{\tau_T \tau_S}{\tau_T - \tau_S} \ln \left\{ \frac{\tau_S}{\tau_T} \left[1 + \frac{(\tau_T - \tau_S)n_T^0}{k_{ST}\tau_T\tau_S n_S^0} \right] \right\} \quad (13)$$

Расчет

В настоящей работе мы ограничиваемся вычислительным экспериментом временной зависимости концентрации молекул в триплетном состоянии для трех соединений бензофенона, фенантрена и карбазола с различающимися параметрами: k_S , k_T , k_{ST} и τ_S при 77 К в твердых матрицах и которые часто используются в качестве доноров энергии [3–8]. Значения этих величин в твердых матрицах при 77 К приведены в таблице 1. Порядок величины k_0 для каждого соединения был оценен с использованием методики определения заселенности триплетного уровня при возбуждении периодически повторяющимися импульсами [12, 13] лазера ЛГИ-21, которая позволяет определить долю молекул перешедших в триплетное состояние за один импульс длительностью $\tau_0 = 10$ нс.

Зависимости концентраций возбужденных молекул в триплетном и синглетном состояниях от времени в течение импульса ($0 \leq t \leq \tau_0$) строились с использованием выражений (5) и (6) соответственно, а после прекращения возбуждения с использованием (12) и (10). Величины n_T^0 и n_S^0 рассчитывались по формулам (5) и (6) с заменой t на τ_0 .

Таблица 1. ЗНАЧЕНИЯ ВЕЛИЧИН, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬ-
НОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ [14, 15]

величины	τ_S, c	τ_T, c	k_{ST}, c^{-1}	k_0, c^{-1}	k_S, c^{-1}
соединения					
бензофенон	$\sim 10^{-10}$	$4,7 \cdot 10^{-3}$	$\sim 10^{10}$	10^6	$< 10^7$
фенантрен	$5,2 \cdot 10^{-9}$	3,45	$1,54 \cdot 10^8$	10^7	$0,38 \cdot 10^8$
карбазол	$1,6 \cdot 10^{-9}$	7,6	$2,25 \cdot 10^7$	10^7	$6 \cdot 10^8$

Результаты и их обсуждение

Результаты вычислительного эксперимента временной зависимости концентрации возбужденных молекул в триплетном состоянии при возбуждении импульсами прямоугольной формы длительностью $\tau_0 = 10$ нс бензофенона, фенантена и карбазола в твердых матрицах при 77 К приведены на рис. 1–3. Время на оси абсцисс от 0 до τ_0 соответствует длительности импульса, а время $t > \tau_0$ соответствует начальной стадии после прекращения возбуждения. Как видно из рисунков, зависимости $n_S(t)$ и $n_T(t)$ для всех трех соединений заметно отличаются друг от друга, как в течение импульса возбуждения, так и после его прекращения.

У бензофенона (рис. 1) возбужденный синглетный уровень заселяется в течение импульса возбуждения намного меньше, чем триплетный. Для него к концу импульса $n_S^0 \ll n_T^0$ и подселением триплетного уровня в результате перехода части молекул n_S^0 после прекращения возбуждения можно пренебречь. Такой характер зависимости $n_T(t)$ обусловлен тем, что для бензофенона $k_{ST} \gg k_S$ и k_0 .

У фенантрена (рис. 2) синглетный уровень в течение импульса заселен в большей степени, чем триплетный. Однако скорость роста концентрации n_S замедляется со временем, тогда как для концентрации n_T она возрастает. К концу импульса концентрации n_S^0 и n_T^0 становятся приблизительно равными. После прекращения возбуждения часть молекул n_S^0 переходит в триплетное состояние, вследствие чего концентрация молекул n_T продолжает увеличиваться до $n_T^{\max} \approx 1,8 \cdot n_T^0$. Такое отличие зависимости $n_T(t)$ у фенантрена от кинетики $n_T(t)$ у бензофенона связано с тем, что у фенантрена k_{ST} незначительно превышает k_S и k_0 , а значения τ_S и τ_0 близки.

Значение k_{ST} у карбазола несколько меньше k_S , а величина τ_S близка к значению τ_0 . Заселенность синглетного уровня карбазола во время импульса превышает заселенность триплетного уровня в большее число раз, чем у фенантрена. К концу импульса n_S^0 в 7 раз больше n_T^0 (рис. 3). В результате этого, после прекращения импульса возбуждения, концентрация молекул карбазола в триплетном состоянии продолжает возрастать и увеличивается до $3,9 \cdot n_T^0$.

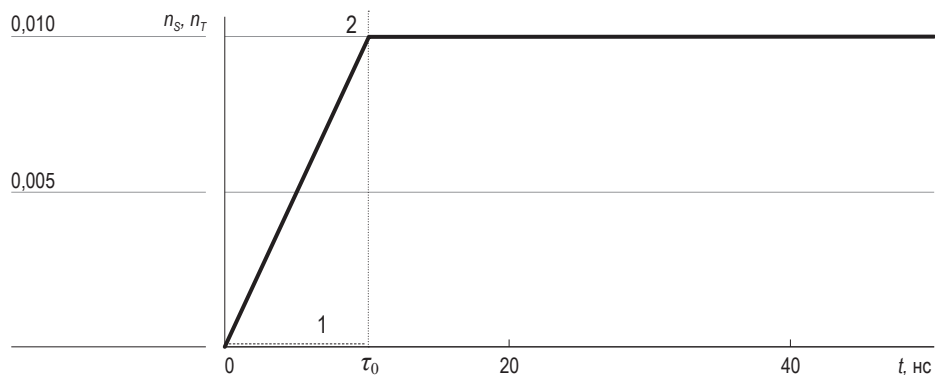


Рис. 1. Зависимость концентрации молекул в возбужденном состоянии от времени для бензофенона:
1 – синглетное; 2 – триплетное состояние.

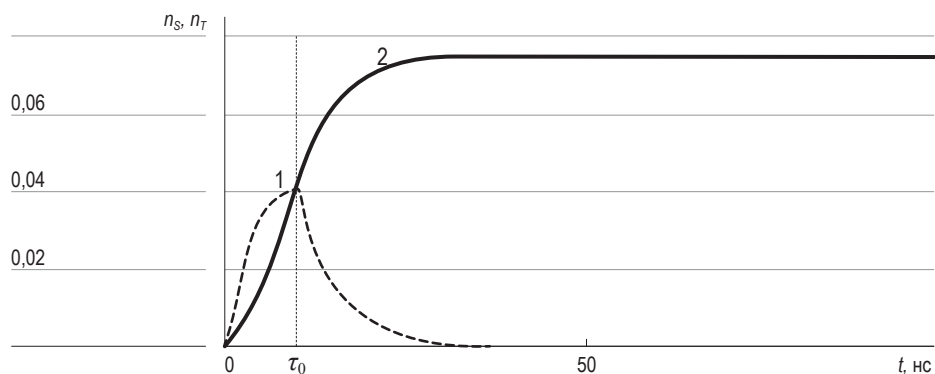


Рис. 2. Зависимость концентрации молекул в возбужденном состоянии от времени для фенантрена:
1 – синглетное; 2 – триплетное состояние.

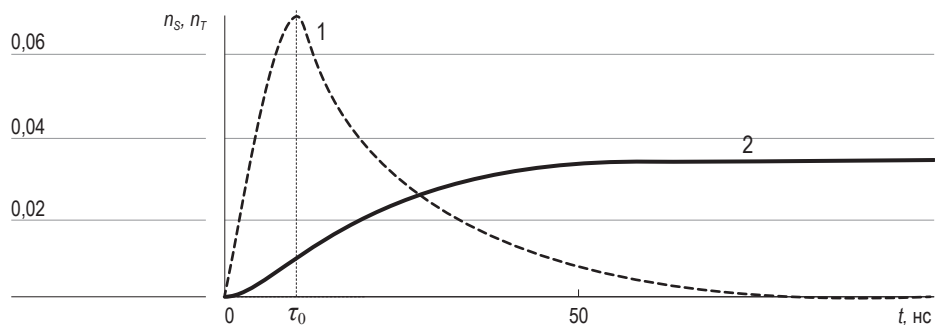


Рис. 3. Зависимость концентрации молекул в возбужденном состоянии от времени для карбазола:
1 – синглетное; 2 – триплетное состояние.

Выводы

Моделирование временной зависимости концентрации молекул в триплетном состоянии при возбуждении органических молекул импульсами прямоугольной формы в твердых матрицах при низких температурах с учетом обеднения основного состояния показало следующее. Концентрация молекул n_S^0 с $k_{ST} \gg k_S$ и $\tau_S < \tau_0$ намного меньше n_T^0 , поэтому они не

вносят заметного вклада в заселенность триплетного уровня после прекращения возбуждения. Для молекул, у которых k_{ST} соизмеримо с k_S , а τ_S соизмеримо с τ_0 концентрация молекул в триплетном состоянии может увеличиваться после прекращения возбуждения в несколько раз за счет перехода части молекул из возбужденного синглетного в триплетное состояние. Этот факт необходимо учитывать при использовании органических соединений с такими параметрами в качестве доноров энергии, когда возбуждение донора осуществляется мощными импульсами лазеров длительностью $\tau_0 \leq \tau_S$.

Библиографический список

1. Förster Th. Untersuchung des zwischenmolekularen Übergangs von Elektronenanregungsenergie // Naturforsch Z. 1949. № 50. P. 321–327.
2. Dexter D.L. Theory of sensitized luminescence in solids // J. Chem. Phys. 1953. № 5. P. 836 – 850.
3. Inokuti M. and Hirayama F. Influence of energy transfer by the exchange mechanism on donor luminescence // J. Chem. Phys. 1965. № 6. P. 1978–1989.
4. Hattori S., Kato Y. Donor Phosphorescence quenching in Sensitized Phosphorescence // J. Mol. Spectrosc. 1971. № 2. P. 432–440.
5. Kobashi H., Morita T., Mataga N. Influence of Triplet-Triplet Excitation Transfer on the Decay function // J. Chem. Phys. Lett. 1973. № 4. P. 376–378.
6. Грицан Н.П., Королев В.В., Хмелинский И.В., Сушков Д.П., Бажин Н.М. Тушение фосфоресценции органических соединений по обменному механизму в твердых средах // Известия АН СССР. Серия физическая. 1990. №3. С. 454–459.
7. Atsuko H., Y. Gondo. Energy-Donor Phosphorescence and Energy Transfer by Exchange interaction in rigid matrix // J. Chem. Phys. 1986. № 4. P. 1894–1897.
8. Kikuchi A., Nakabai Y., Oguchi-Fujiama N. Energy-donor phosphorescence quenching study of triplet-triplet energy transfer between UV absorbers // J. Luminescence. 2015. V.166. P. 203–208.
9. Коробов В.Е., Чибисов А.К. Концентрация молекул в триплетном состоянии при возбуждении органических соединений импульсами; прямоугольной формы // Теоретическая и экспериментальная химия. 1975. № 4. С. 515–520.
10. Свешников Б.Я. К теории тушения органических фосфоров // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1949. №10. С. 879–885.
11. Смирнов В.А., Алфимов М.А. Экспериментальное определение коэффициента характеризующего вероятность переход триплетных состояний органических молекул // Кинетика и катализ. 1966. № 4. С. 583–588.
12. Дерябин М.И., Гребенщиков Д.М. Определение концентрации органических молекул в триплетном состоянии при возбуждении периодически повторяющимися импульсами // Редакция журнала прикладной спектроскопии, Деп. в ВИНТИ. 1988. №7477 – В88 – 9 с.
13. Жданова Н.В., Авдеев А.В. Определение концентрации молекул акцептора в триплетном состоянии при возбуждении донорно-акцепторных пар периодически повторяющимися импульсами // Наука. Инновации. Технологии. 2016. № 2. С. 29–36.
14. Turro N. Molecular Photochemistry. New York, W.A. Benjamin, 1965. 286 p.
15. Беккер Г.О. Введение в фотохимию органических соединений. Л., 1976.

References

1. Förster Th. Untersuchung des zwischenmolekularen Übergangs von Elektronenanregungsenergie // *Naturforsch Z.* 1949. № 50. P. 321–327.
2. Dexter D.L. Theory of sensitized luminescence in solids // *J. Chem. Phys.* 1953. №5. P. 836–850.
3. Inokuti M. and Hirayama F. Influence of energy transfer by the exchange mechanism on donor luminescence // *J. Chem. Phys.* 1965. № 6. P. 1978–1989.
4. Hattori S., Kato Y. Donor Phosphorescence quenching in Sensitized Phosphorescence // *J. Mol. Spectrosc.* 1971. № 2. P. 432–440.
5. Kobashi H., Morita T., Mataga N. Influence of Triplet-Triplet Excitation Transfer on the Decay function // *J. Chem. Phys. Lett.* 1973. № 4. P. 376–378.
6. Gritsan N.P., Korolev V.V., Khmelinskii I.V., Sushkov D.P., Bazhin N.M. Tushenie fosforescencii organicheskikh soedinenij po obmennomu mekhanizmu v tverdyh sredah (Quenching of phosphorescence of organic compounds by exchange mechanism in solid matter) // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics* 1990. № 3. P. 454–459.
7. Atsuko H., Y. Gondo. Energy-Donor Phosphorescence and Energy Transfer by Exchange interaction in rigid matrix // *J. Chem. Phys.* 1986. № 4. P. 1894–1897.
8. Kikuchi A., Nakabai Y., Oguchi-Fujiama N. Energy-donor phosphorescence quenching study of triplet-triplet energy transfer between UV absorbers // *J. Luminescence.* 2015. V.166. P. 203–208.
9. Korobov V.E., Chibisov A.K. Koncentraciya molekul v tripletnom sostoyanii pri vzbuzhdenii organicheskikh soedinenij impulsami pryamougolnoj formy (The concentration of the molecules in the triplet state in the excitation of organic compounds by rectangular pulses) // *Theoretical and Experimental Chemistry.* 1975. № 4. P. 515–520.
10. Sveshnikov B.Ya. K teorii tusheniya organicheskikh fosforov (Toward a theory of quenching of organic phosphors) // *Journal of Experimental and Theoretical Physics.* 1949. № 10. P. 879–885.
11. Smirnov V.A., Alfimov M.A. Eksperimentalnoe opredelenie koefficienta harakterizuyushchego veroyatnost perekhod tripletnyh sostoyanij organicheskikh molekul (Experimental determination of the probability coefficient of a transition of the triplet states of organic molecules) // *Kinetics and Catalysis.* 1966. № 4. P.583 – 588.
12. Deryabin M.I., Grebenshchikov D.M. Opredelenie koncentracii organicheskikh molekul v tripletnom sostoyanii pri vzbuzhdenii periodicheskimi povtoryayushchimisya impulsami () // *Editorial of Journal of Applied Spectroscopy. Dep. v VINITI* 1988. № 7477 – B88 – 9 p.
13. Zhdanova N.V., Avdeev A.V. Opredelenie koncentracii molekul akceptora v tripletnom sostoyanii pri vzbuzhdenii donorno akceptornyh par periodicheskimi povtoryayushchimisya impulsami (Determination of the acceptor molecules concentration in the triplet state on excitation of donor-acceptor pairs by recurrent pulses) // *Science. Innovation. Technologies.* 2016. № 2. P. 29–36.
14. Turro N. *Molecular Photochemistry.* New York, W.A. Benjamin, 1965. 286 p.
15. Bekker G.O. *Vvedenie v fotohimiyu organicheskikh soedinenij (Introduction in organic compounds photochemistry).* Leningrad: Chemistry, 1976.

УДК 536.242

**Гришанина О.А. [Grishanina O.A.],
Симоновский А.Я. [Simonovskii A.Ya.],
Яновский А.А. [Yanovskii A.A.]****ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН
В ПРОЦЕССАХ ОХЛАЖДЕНИЯ
НАМАГНИЧИВАЮЩЕЙСЯ ПЛАСТИНЫ
В МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ
В МАГНИТНОМ ПОЛЕ*****Hydrodynamics and heat exchange in processes
of cooling of a magnetic plate in a magnetic liquid
in the magnetic field**

В работе экспериментально изучено влияние магнитного поля на процессы теплообмена намагничивающейся стальной пластины, охлаждаемой в магнитной жидкости. Термопары были установлены в шести точках на поверхности пластины вдоль ее длины. Получены графики зависимости температуры от времени в отсутствие магнитного поля и в магнитных полях различной напряженности. Обнаружено, что интенсивность теплообмена зависит в значительной степени от величины магнитного поля и от расположения областей поверхности пластины. В магнитном поле охлаждение центральной части пластины происходит с такой же интенсивностью, что и в отсутствие магнитного поля и с меньшей интенсивностью в сравнении с другими точками поверхности пластины. Вблизи концов пластины скорость охлаждения поверхности намного больше в магнитном поле, чем при его отсутствии. С ростом напряженности магнитного поля скорость охлаждения в центральной части пластины уменьшается и оказывается меньше, чем в отсутствие магнитного поля. Зависимость теплообмена от величины магнитного поля объяснена распределением магнитных сил, действующих на жидкость окружающую пластину и характер образующихся паровоздушных полостей вблизи ее поверхности. Описаны эксперименты по моделированию образования и форму паровоздушных полостей в жидкости, окружающих намагничивающуюся пластину.

The effect of the magnetic field on heat transfer processes of a magnetized steel plate cooled in a magnetic fluid is experimentally studied. Thermocouples were installed at six points on the surface of the plate along its length. The plots of temperature versus time are obtained in the absence of a magnetic field and in magnetic fields of different intensity. It is found that the intensity of heat exchange depends to a large extent on the magnitude of the magnetic field and on the location of points on the surface of the plate. In a magnetic field, cooling of the central part of the plate occurs with the same intensity as in the absence of a magnetic field and with a lower intensity in comparison with other points on the surface of the plate. Near the plate ends, the cooling rate of the surface is much greater in the magnetic field than in the absence of it. With increasing magnetic field strength, the cooling rate of points in the central part of the plate decreases and is less than in the absence of a magnetic field. The dependence of heat transfer on the magnitude of the magnetic field is explained by the distribution of the magnetic forces acting on the liquid surrounding the plate and the nature of the vapor-air cavities formed near its surface. Experiments on simulation of formation and the shape of vapor-air cavities in a liquid surrounding a magnetizing plate are described.

Ключевые слова: магнитная жидкость, теплообмен, гидродинамика, стальная пластина, магнитное поле.

Key words: magnetic fluid, heat transfer, hydrodynamics, steel plate, magnetic field.

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 17-01-00037).

Введение

Магнитные жидкости представляют собой устойчивую коллоидную систему. Дисперсионной средой в магнитных жидкостях, как правило, является керосин, кремнийорганические масла или вода. В качестве дисперсной фазы используются частицы железа, кобальта или магнетита, благодаря чему магнитные жидкости обладают способностью сильно намагничиваться в магнитных полях, сохраняя при этом текучесть. Исследование теплообмена при кипении магнитных жидкостей представляют интерес как с чисто научной точки зрения, так и в связи с возможным техническим и технологическим использованием процесса кипения жидкой намагничивающейся среды [1–10]. Так, предлагалось использовать магнитные жидкости в теплообменных аппаратах и устройствах, управляемых магнитным полем [8–9], а также в качестве закалочной среды при охлаждении намагничивающихся тел [1–3, 11–13]. Было показано [1, 2, 11], что использование магнитных полей с заданным пространственным распределением и изменяющихся со временем по заданным законам позволяет управлять процессами закалки. При этом оказывается возможным проведение неоднородного охлаждения и получение локально неоднородной структуры и различной твердости на разных участках поверхности закаливаемых изделий. В связи с этим представляет интерес исследования процессов тепломассопереноса при охлаждении нагретых намагничивающихся тел в магнитных жидкостях при наличии магнитного поля.

Целью настоящего исследования является изучение влияния магнитных полей на интенсивность процессов теплообмена намагничивающейся пластины, погруженной в магнитную жидкость, а также форму паровоздушных полостей образующихся при ее охлаждении.

Материалы и методы

Определение параметров теплопереноса проводилось на экспериментальной установке, схема которой приведена на рисунке 1. Пластина 1, выполненная из ферромагнитной стали, прикреплялась к немагнитному цилиндрическому штоку 2. Шток мог свободно перемещаться вертикально по направляющим 3. Нагрев пластины осуществлялся в трубчатой электропечи 4. Охлаждение проводилось быстрым погружением образца в объем магнитной жидкости, заполнявшей немагнитный цилиндрический контейнер 5, расположенный между полюсами электромагнита 6. При диаметре полюсных наконечников электромагнита 100 мм и расстоянии между полюсами 107 мм неоднородность поля в зазоре электромагнита не превышала 7%. Ошибка измерения напряженности магнитного поля не превышала 2%. Направление магнитного поля во всех экспериментах совпадало с плоскостью пластины. Длина пластины $L = 45$ мм, высота $h = 50$ мм, толщина $b = 5$ мм. В шести точках на поверхности пластины в средней ее части по высоте устанавливались термопары. Точка 1 расположена в центре пластины, точка 6 на торце пласт-

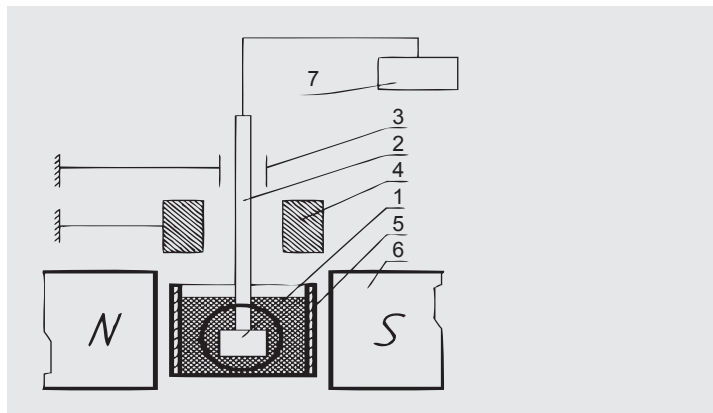


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

тины. Размеры пластины и места точек установки термодпар указаны на рис. 2. Электроды термодпар для изоляции разводились по каналам керамической соломки и укладывались вдоль поверхности направляющего штока. Показания термодпар фиксировались платой аналого-цифрового преобразователя 7. В экспериментах использовалась магнитная жидкость на водной основе с параметрами: абсолютная магнитная проницаемость $\mu = (2,5 \pm 0,4) \cdot 10^{-6}$ Гн/м; плотность $\rho = 1,21 \cdot 10^3$ кг/м³, кинематическая вязкость $\nu = 3,99 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Охлаждаемая пластина была выполнена из стали 40X. Выбор материала образца объясняется широким распространением данной марки стали и известной зависимостью ее теплофизических свойств от температуры. Выбор отношения размеров образца L к толщине b , $L/b \sim 10$, обусловлен следующим. Эксперименты по нахождению формы свободной поверхности магнитной жидкости, окружающей холодную намагничивающуюся пластину, показали, что при $L/b \sim 10$ в зависимости от величины приложенного внешнего магнитного поля вблизи поверхности пластины могут образовываться как две, так и четыре конусообразные воздушные полости в объеме окружающей пластину магнитной жидкости. Размеры полостей немонотонно зависят от величины магнитного поля. Таким влиянием поля на форму свободной поверхности магнитной жидкости можно анализировать зависимость толщины паровой пленки магнитной жидкости, окружающей охлаждаемую в ней намагничивающуюся пластину, от величины поля. Тем самым возможно моделирование влияния поля на теплообмен пластины с магнитной жидкостью, интенсивность которого зависит от толщины паровой пленки.

Термодпары устанавливались в шести точках поверхности пластины (рис. 2). В ходе экспериментов образец нагревали до температуры 625 °С. Таким образом, температура нагрева образца во всех измерениях была меньше

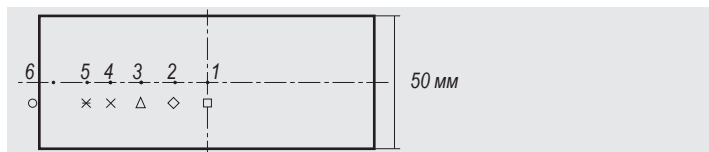


Рис. 2. Схема расположения термопар на поверхности пластины в средней ее части по высоте, вид сверху.

температуры Кюри, равной для стали 768°C . В результате остаточная намагниченность охлаждаемой пластины в магнитном поле могла изменяться от измерения к измерению. Для обеспечения постоянства начального магнитного состояния образец перед каждой сменой режима прикладываемого магнитного поля помещался в переменное магнитное поле для размагничивания.

Было установлено, что при охлаждении пластины от 625°C до комнатной температуры можно наблюдать все режимы кипения магнитной жидкости – пленочный, переходный, пузырьковый, а также конвективное охлаждение. В частности, было установлено, что при охлаждении пластины, в интервале температур $700\text{--}400^{\circ}\text{C}$ реализуется пленочный режим кипения. Следует отметить, что при температурах нагрева выше 625°C наблюдается существенное ускорение обезуглероживания и расслаивания поверхности охлаждаемого образца, т.е. образование окарины. Так как спаи термопар приваривались к поверхности пластины точечной сваркой медным электродом, то снижение температуры нагрева ниже традиционно применяемых в технологических процессах закалки стали ($850\text{--}900^{\circ}\text{C}$) при проведении теплофизических измерений позволило увеличить количество охлаждений без повреждения мест соединений спаев термопар с поверхностью охлаждаемого образца. Для выравнивания температуры по сечению образца перед очередным изменением поля реализовалась трехминутная выдержка.

Чтобы оценить систематическую погрешность измерений, связанную с различием инерционных свойств датчиков температуры, было проведено охлаждение пластины в воздухе. Измерения показали, что при охлаждении пластины в воздухе изменение температуры со временем в различных точках поверхности пластины происходит одинаково. Это обусловлено тем, что охлаждение в воздухе происходит за счет конвективного отвода тепла. Фазовые переходы в этом случае не происходят. Одинаковый ход кривых охлаждения различных точек поверхности пластины в воздухе свидетельствует о том, что инерционность термопар существенно не различается (нет запаздывания в ходе какой-либо кривой по сравнению с остальными) при небольшой интенсивности охлаждения.

При охлаждении в жидкости фазовые переходы вызывают существенные температурные флуктуации на теплоотдающей поверхности, а интенсив-

ность охлаждения больше, чем при охлаждении в воздухе. При более высокой интенсивности охлаждения может появляться запаздывание в ходе кривых охлаждения из-за различия в инерционных свойствах термопар.

Для определения значения этого различия проводилось охлаждение пластины в воде. Измерения показали, что ход кривых охлаждения в различных точках поверхности пластины практически одинаков. Имеющиеся различия в ходе кривых охлаждения связаны с естественными флуктуациями, обусловленными процессами кипения охлаждающей среды в ходе тепломассопереноса. При повторных экспериментах ход кривых изменялся произвольным образом. Измерения показали, что инерционность используемых в эксперименте термопар существенно не различается. Таким образом, различие в ходе кривых, связанное с инерционностью термопар, меньше различия в ходе кривых, обусловленного температурными флуктуациями теплоотдающей поверхности. В отсутствие магнитного поля предполагалось, что скорость охлаждения во всех точках поверхности пластины одинакова.

Данные измерений усреднялись по шести измерениям через каждые 25 °С. Это означает, что в каждой точке проводилось по шесть измерений. В результате получалось шесть незначительно отличающихся друг от друга зависимостей температуры от времени. На каждой кривой заданному значению температуры соответствовало шесть различных значений времени τ . Эти времена суммировались и сумма делилась на шесть. Полученное значение и считалось характерным временем, соответствующим выбранному значению температуры. Такая процедура производилась во всем диапазоне температуры охлаждения с интервалом 25 °С. Ошибка в определении температуры не превышала ± 5 °С. Относительная погрешность определения временных интервалов не превышала 20%.

Результаты и их обсуждение

На рисунке 3а приведена усредненная кривая зависимости температуры T от времени τ , полученная при охлаждении пластины в магнитной жидкости без магнитного поля. Из графика видно, что охлаждение происходит наиболее интенсивно в начальный период (примерно до 465 °С). Затем интенсивность охлаждения снижается. При температурах примерно 400 °С наблюдается излом на кривой. Появление точки излома связано с разрушением паровой пленки, окружающей пластину в процессе пленочного режима кипения охлаждающей среды, что соответствует началу переходного режима кипения. Наблюдения за состоянием поверхности охлаждаемой пластины, проведенные ранее, показали, что при температуре пластины выше 400 °С происходит пленочный режим кипения охлаждаемой среды. Ниже 400 °С (кривая рис. 3а) охлаждение первоначально интенсифицируется, затем при $T \sim 300$ °С вновь ослабевает.

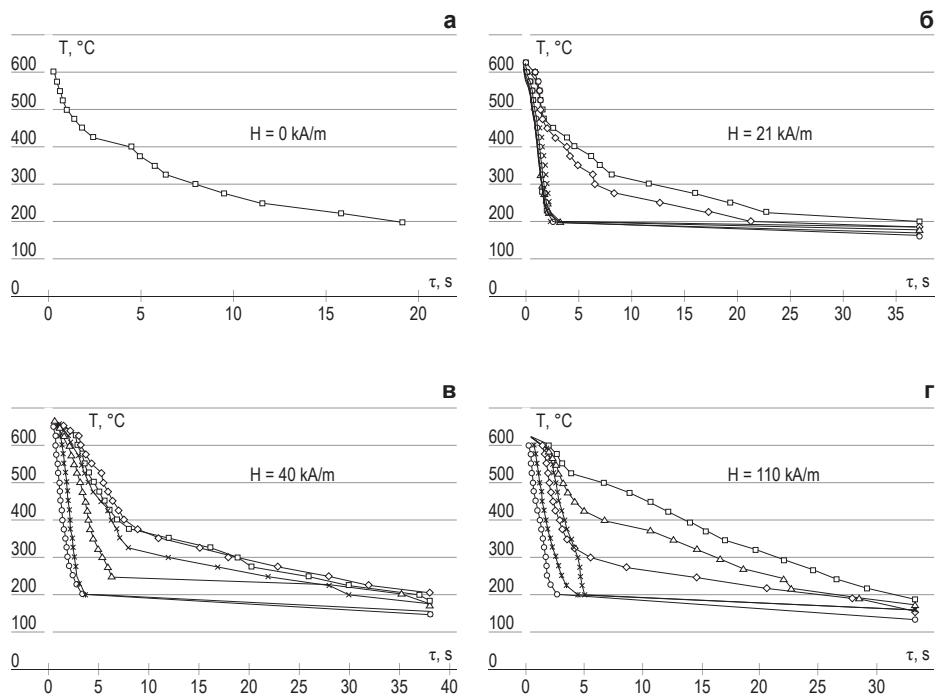


Рис. 3. Зависимость температуры T , °C, от времени τ , с, при охлаждении пластины в отсутствии магнитного поля (а) и в магнитных полях 21, 40, 110 кА/м (б, в, г).

На рис. 3б-г приведены линии скорости охлаждения точек на поверхности пластины, полученные в экспериментах по охлаждению в магнитной жидкости в приложенных магнитных полях напряженностью 21, 40 и 110 кА/м, соответственно. Из рис. 3б видно, что в магнитном поле напряженностью 21 кА/м в начальный период охлаждения в интервале температур 625–475 °C, интенсивность охлаждения всех точек поверхности пластины в пределах погрешности эксперимента одинакова. В точках 1 и 2, прилежащих к центральной части пластины, охлаждение при температурах ниже 475 °C происходит существенно менее интенсивно, чем в остальных точках поверхности. В этих точках интенсивность охлаждения не изменилась по сравнению с охлаждением без поля. Охлаждение точек 3–6 при температурах от 600 до 200 °C происходит значительно интенсивнее, чем без поля.

Увеличение скорости теплообмена в магнитном поле напряженностью 21 кА/м по сравнению с теплообменом без магнитного поля в точках пластины 3–6, расположенных ближе к ее торцам, при температурах поверхности от 625 до 200 °C можно объяснить следующим. Намагничивающаяся пластина искажает приложенное однородное магнитное поле. В результате на магнитную жидкость действуют силы, вызванные искажением магнитного

поля и пропорциональные градиенту поля. Можно показать [9], что эти силы прижимают жидкость к поверхности пластины в окрестности ее торцов. При пленочном и переходном режимах кипения магнитной жидкости в результате действия этих сил толщина паровой прослойки уменьшается. Теплообмен пластины с нагретым паром существенно ниже, чем с жидкостью. Следовательно, уменьшение толщины слоя пара приводит к увеличению теплопереноса в окрестности точек вблизи концов пластины. Кроме того, может возникать неустойчивость границы раздела магнитная жидкость-пар. В результате магнитная жидкость может соприкасаться с поверхностью пластины. Все это может приводить к интенсификации теплообмена.

Вблизи точек 1 и 2, в центральной части пластины, магнитные силы, вызванные искажением магнитного поля намагничивающейся пластиной, отталкивают жидкость от поверхности пластины [9]. В магнитном поле напряженностью 21 кА/м отталкивающие силы невелики и не приводят к существенному утолщению паровой пленки, а возможно, и к развитию неустойчивости границы раздела фаз. В результате этого не происходит заметного изменения интенсивности теплообмена в окрестности точек 1 и 2 по сравнению с охлаждением без магнитного поля.

На рис. 3в приведены кривые охлаждения различных точек поверхности пластины, полученные в результате охлаждения пластины в магнитной жидкости в магнитном поле напряженностью 40 кА/м. Из рисунка видно, что различие в ходе кривых охлаждения заметно уже и в высокотемпературной области охлаждения. При этом существенного изменения скорости теплообмена в точке 6 на торце пластины и прилегающей к торцу точке 5 по сравнению с охлаждением в магнитном поле 21 кА/м не происходит. В то же время в точках 1–4 поверхности пластины наблюдается существенное снижение скорости охлаждения по сравнению с охлаждением в магнитной жидкости в поле 21 кА/м (рис. 3б).

По-видимому, в точках 5 и 6 интенсивность теплообмена по сравнению с полем 21 кА/м не увеличилась, поскольку магнитные силы, прижимающие жидкость к полюсам пластины в окрестности этих точек, изменились незначительно. В точках 1–4 величина магнитных сил, отталкивающих магнитную жидкость от поверхности пластины, существенно возросла. Произошло увеличение толщины парового слоя, отделяющего пластину от жидкости. Уменьшился и теплоотвод от указанных точек поверхности пластины. По той же причине в точках 1, 2, 4 на поверхности пластины существенно снижается скорость охлаждения и по сравнению со скоростью охлаждения без поля. Однако, в точке 3 такое снижение скорости охлаждения наблюдается только в диапазоне температур от 625 до 450 °С. При более низких температурах охлаждение в точке 3 в поле 40 кА/м происходит все-таки более интенсивно, чем без поля.

Следует отметить, что точка 4 находится ближе к торцу пластины, чем точка 3, и силы, прижимающие жидкость к пластине в точке 4, больше, чем в

точке 3. Казалось бы паровая прослойка в точке 4 должна быть тоньше, чем в точке 3. Тем не менее, теплообмен в точке 4 происходит менее интенсивно, чем в точке 3. Возможное объяснение увеличения скорости охлаждения в точке 3 по сравнению с точкой 4 в магнитном поле 40 кА/м будет дано ниже. Дальнейшее увеличение магнитного поля приводит к новым интересным эффектам по распределению интенсивности охлаждения вдоль длины охлаждаемой пластины.

На рисунке 3г приведены кривые охлаждения различных точек поверхности пластины, полученные при охлаждении пластины в магнитной жидкости в магнитном поле 110 кА/м. Из графика видно, что в высокотемпературной области охлаждения 625–550 °С происходит существенное уменьшение интенсивности охлаждения в точках поверхности пластины 1–5. Уменьшается интенсивность охлаждения и в точке 6 на торце пластины по сравнению с интенсивностью охлаждения в магнитном поле 40 кА/м. Интенсивность охлаждения в центральной точке 1 несколько увеличивается по сравнению с интенсивностью охлаждения этой точки в магнитном поле 40 кА/м и с интенсивностью охлаждения в точке 2. По-видимому, граница раздела магнитная жидкость-пар в окрестности точек 1, 2 становится неустойчивой. Происходит подтекание магнитной жидкости к пластине в центре пластины в окрестности точки 1. В результате толщина паровой прослойки в этой области уменьшается, а теплообмен увеличивается. Кроме того, заметно, что интенсивность охлаждения в точке 3 поверхности пластины становится больше, чем интенсивность охлаждения в точке 5. По-видимому, в результате неустойчивости границы раздела магнитная жидкость-пар жидкость подтекает к пластине также и в окрестности точки 3. В результате интенсивность теплообмена в точке 3 возрастает. По этой же причине происходит и увеличение скорости теплообмена в точке 3 по сравнению с точкой 4 в магнитном поле 40 кА/м. Охлаждение значительно замедляется в точке 3 поверхности пластины, но одновременно интенсифицируется в точках 4–6 в окрестности торца пластины.

Анализ зависимости изменения скорости охлаждения от величины магнитного поля позволяет сделать вывод об определяющем влиянии величины поля на гидродинамику образования паровых полостей на различных участках поверхности охлаждаемой намагничивающейся пластины и форму полостей и, как следствие, на интенсивность теплообмена пластины с магнитной жидкостью.

Влияние магнитного поля на форму свободной поверхности магнитной жидкости, окружающей намагничивающуюся пластину

Для выяснения влияния магнитного поля на образование и форму паровой полости, окружающей намагничивающуюся пластину, проводили следующие эксперименты. Холодную пластину устанавливали в не-

магнитной цилиндрической кювете, помещенной между полюсами электромагнита. Кювету заполняли магнитной жидкостью. Отношение объема магнитной жидкости V_{mf} к объему пластины $V_{mf}/V_{pl}=51$. Направление магнитного поля параллельно плоскости пластины. Схема эксперимента аналогична представленной на рисунке 1.

На рисунке 4а показана фотография пластины без магнитной жидкости (вид сверху). При наличии магнитной жидкости и приложенного внешнего магнитного поля $H = 76$ кА/м в объеме магнитной жидкости в окрестности центральной части пластины образуются две воздушные полости, по одной на каждой стороне пластины. Из эксперимента видно, что образовавшиеся воздушные полости имеют форму конусообразных воронок, сужающихся в направлении силы тяжести от верхней свободной поверхности магнитной жидкости до дна кюветы.

Два светлых пятна в центре пластины на фотографии б (рис. 4, вид сверху) – следы конусообразных воздушных полостей-воронок на дне кюветы в приложенном магнитном поле 76 кА/м. При дальнейшем увеличении суммарного объема магнитной жидкости при постоянных размерах пластины

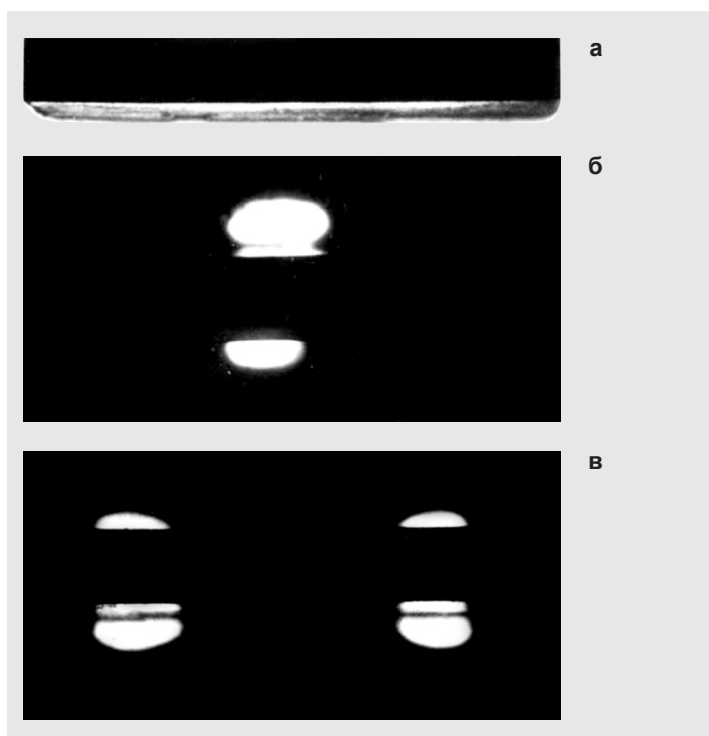


Рис. 4.

Фотографии пластины без магнитной жидкости (а) и следов на дне пластины конусообразных воздушных полостей-воронок, появляющихся в объеме магнитной жидкости, в магнитных полях напряженностью 76 кА/м (б), 190 кА/м (в).

объем воздушных полостей вблизи центральной части пластины уменьшается. Уменьшается и просвет полостей на дне кюветы – сужается часть поверхности пластины, свободная от магнитной жидкости. Отметим, что при магнитных полях, меньших 76 кА/м для данного отношения V_{mf}/V_{pl} и фиксированных размерах пластины воздушные полости не образуются. Жидкость всюду соприкасается с пластиной. Вблизи концов пластины высота столба жидкости, сравнимая с высотой пластины, наблюдается на удалении от пластины практически до границ кюветы.

Как было ясно из предыдущего, образование воздушных полостей можно объяснить действием магнитных сил на магнитную жидкость, окружающую намагничивающуюся пластину. Эти силы возникают в результате искажения приложенного однородного магнитного поля намагничивающейся пластиной. Можно показать [9], что вблизи концов пластины магнитные силы прижимают жидкость к пластине. В центре пластины магнитные силы отталкивают магнитную жидкость от пластины. В результате в центральной части пластины образуются воздушные полости. Аналогичные широкие паровые полости могут образовываться вблизи центральной части горячей пластины, охлаждаемой в магнитной жидкости. В результате теплообмен между пластиной и жидкостью в этих областях пластины уменьшается.

При увеличении напряженности магнитного поля до 138 кА/м жидкость касается центральной части пластины и вместо двух конусообразных полостей в центре пластины в объеме магнитной жидкости образуются четыре конусообразных полости-воронки по две с каждой стороны пластины. Полости смещаются из центральной части пластины к ее торцам. При дальнейшем увеличении магнитного поля до 165 кА/м размеры полостей уменьшаются, уменьшаются и следы полостей на дне кюветы. Полости смещаются в направлении торцов пластины. В магнитном поле 190 кА/м полости вновь увеличиваются в объеме, фотография их следов на дне кюветы приведена на рисунке 4в.

Образование воздушных полостей в центре пластины, их форма, размеры и переход от двух полостей к четырем зависят при прочих равных условиях (размеры пластины, тип магнитной жидкости и т.д.) не только от величины магнитного поля, но и от отношения объема магнитной жидкости в кювете V_{mf} к полному объему пластины V_{pl} , погруженной в жидкость. Это утверждение справедливо и в том случае, когда высота пластины превышает высоту кюветы с магнитной жидкостью. Возможно, это связано с тем, что вблизи торцов пластины в приложенном магнитном поле магнитная жидкость поднимается под действием магнитных сил по всей высоте торцов до верхней грани пластины, независимо от ее высоты. Так, при отношении $V_{mf}/V_{pl} = 32$ во всем диапазоне магнитного поля от 110 до 190 кА/м наблюдаются две воздушные полости с устойчивой границей раздела магнитная жидкость-воздух. Подтекания жидкости к пластине и перехода от двух к четырем воздушным

полостям-воронкам не происходит. Аксонометрический рисунок свободной поверхности магнитной жидкости в этом случае соответствует приведенному на рисунке 5а. Однако объем полостей с ростом поля увеличивается. Увеличиваются и следы воздушных полостей-воронок на дне пластины при $V_{mf}/V_{pl}=32$. Границы раздела магнитная жидкость-воздух устойчива при всех значениях поля. При значениях поля меньших 110 кА/м воздушные полости отсутствуют – жидкость всюду соприкасается с пластиной.

Таким образом, с ростом отношения V_{mf}/V_{pl} , неустойчивость границы раздела магнитная жидкость-воздух, образование двух воздушных полостей в объеме жидкости в области центральной части пластины и переход от двух к четырем воздушным полостям в окрестности торцов пластины возникают при меньших величинах магнитного поля.

Можно выявить аналогию между формой свободной поверхности магнитной жидкости, окружающей холодную намагничивающуюся пластину, и формой паровой полости в объеме магнитной жидкости, окружающей нагретую пластину. Так, в магнитном поле 21 кА/м в центральной части охлаждаемой пластины с каждой ее стороны в объеме магнитной жидкости могут образовываться утолщения паровой пленки. С увеличением магнитного поля утолщения паровой пленки могут захватывать соседние с центральной частью области пластины, простираясь к ее торцам. Затем возникают четыре утолщения паровой пленки вблизи торцов пластины по два с каждой ее стороны. С дальнейшим увеличением поля каждое из четырех утолщений вначале уменьшается, а затем увеличивается в размере, мигрируя вдоль длины пластины.

Такое изменение формы паровой полости соответствует образованию вначале двух воздушных полостей-воронок в центральной части холодной пластины, окруженной магнитной жидкостью, при некотором значении магнитного поля. С увеличением поля размер воздушных полостей-воронок увеличивается, простираясь вдоль длины пластины. При дальнейшем увеличении поля возникают четыре воздушных полости в окрестности торцов пластины, толщина и размер которых изменяются с ростом поля, захватывая то одни, то другие области поверхности пластины.

Увеличение либо уменьшение толщины паровой пленки приводит, соответственно, к уменьшению, либо увеличению интенсивности теплообмена между магнитной жидкостью и пластиной.

В экспериментах по охлаждению пластины объем магнитной жидкости в кювете большой, отношение $V_{mf}/V_{pl} - 160$, так что пластина полностью погружена в жидкость. Можно предположить, что переход от двух к четырем утолщениям паровой полости происходит при меньших значениях поля по сравнению с переходом от двух к четырем воздушным полостям, возникающим в экспериментах при исследовании форм свободной поверхности жидкости, окружающей холодную пластину.

Выводы

В результате проведенных исследований получены графики зависимости температуры различных точек на поверхности намагничиваемой пластины от времени в магнитных полях различной напряженности. Показано, что интенсивность теплообмена между пластиной и жидкостью существенно зависит от величины приложенного магнитного поля и расположения на пластине элементов ее поверхности. Обнаружено, что в магнитном поле напряженностью 21 кА/м, на торцах пластины интенсивность теплообмена намного больше в магнитном поле, чем без поля. С увеличением приложенного магнитного поля интенсивность теплообмена в центральной части пластины снижается по сравнению с таким же охлаждением в отсутствие поля.

Анализ описанных экспериментов позволяет сделать вывод об определяющем влиянии величины магнитного поля на гидродинамику образования паровых полостей вблизи различных участков поверхности охлаждаемой пластины.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 17-01-00037).

Библиографический список

1. Гогосов В. В., Симоновский А. Я. О локально-неоднородном охлаждении при закалке в магнитной жидкости // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1989. № 2. С. 3.
2. Gogosov V. V., Simonovskii A. Ya., Smolkin R. D. Quenching and separation in magnetic fluids // JMMM. 1990. V. 85. №. 1–3. P. 227.
3. Mirkin L.I., Shesterikov S.A., Simonovski A.Y. Equipment and method for quenching steels in a magnetic liquid // 1993. V.U.Z. Mashinostr. V.6 P. 1.
4. Bashtovoi V.G., G. Challant, Volkova O.Yu. Boiling Heat Transfer in Magnetic Fluids// Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 1993. V. 122. P. 305.
5. Junhong L., Jianming G., Zhiwei L. Experiments and mechanism analysis of pool boiling heat transfer enhancement with water-based magnetic fluid // Int J Heat Mass Transf. 2004. V. 41. P. 170.
6. Кобозев М.А., Симоновский А.Я. Метод измерения, экспериментальная установка и результаты измерения частоты образования пузырьков пара при кипении магнитной жидкости на одиночном центре парообразования // ЖТФ. 2007. Т. 77 №11. С. 31.
7. Симоновский А.Я., Яновский А.А. Влияние однородного магнитного поля на теплообмен при кипении магнитной жидкости на неограниченной поверхности // Вестник Ставропольского государственного университета. 2011.

8. Syam S.L.; Singh M.K., Sousa A. Investigation of thermal conductivity and viscosity of Fe_3O_4 nanofluid for heat transfer applications // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2013. V. 44 P. 7–14.
9. Yanovskii A.A., Simonovskii A.Ya., Klimenko E.M. On the Influence of the Magnetic Field upon Hydrogasdynamic Processes in a Boiling Magnetic Fluid // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2014. V. 50. № 3. P. 260.
10. Yanovskiy A.A., Simonovsky A.Ya., Kholopov V.L., Chuenkova I.Yu. Heat Transfer in Boiling Magnetic Fluid in a Magnetic Field // *Solid State Phenomena*. 2015. № 233–234. P. 339.
11. Khoshmehr H.H., Saboonchi A., Shafii M.B., Jahani N. The study of magnetic field implementation on cylinder quenched in boiling ferro-fluid // *Applied Thermal Engineering*. 2014. V. 64. № 1–2. P. 331.
12. Zupan J., Renjo M.M. Thermal and rheological properties of water-based ferrofluids and their applicability as quenching media // *20th International Conference on Magnetism. Conf. Proc. ICM 2015*. V. 75. P. 1458.
13. Abdollahi A. Salimpour M.R., Etesami N. Experimental analysis of magnetic field effect on the pool boiling heat transfer of a ferro-fluid // *Applied Thermal Engineering*. 2017. V.111. P.1101.

References

1. Gogosov V.V., Simonovskij A.Ya. O lokalno-neodnorodnom oxlazhdenii pri zakalke v magnitnoj zhidkosti (On locally inhomogeneous cooling during quenching in a magnetic fluid) // *Izv. an sssr. mexanika zhidkosti i gaza*. 1989. № 2. P. 3.
2. Gogosov V.V., Simonovskii A.Ya., Smolkin R.D. Quenching and separation in magnetic fluids // *JMMM*. 1990. V. 85. №. 1–3. P. 227.
3. Mirkin L.I., Shesterikov S.A., Simonovski A.Y. Equipment and method for quenching steels in a magnetic liquid // 1993. V.U.Z. Mashinost. V.6 P. 1.
4. Bashtovoi V.G., G. Challant, Volkova O.Yu. Boiling Heat Transfer in Magnetic Fluids// *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1993. V. 122. P.305.
5. Junhong L., Jianming G., Zhiwei L. Experiments and mechanism analysis of pool boiling heat transfer enhancement with water-based magnetic fluid // *Int J Heat Mass Transf.* 2004. V. 41. P. 170.
6. Kobozev M.A., Simonovskij A.Ya. Metod izmereniya, eksperimentalnaya ustanovka i rezultaty izmereniya chastoty obrazovaniya puzyrkov para pri kipenii magnitnoj zhidkosti na odinochnom centre paroobrazovaniya (The method of measurement, the experimental setup and the results of measuring the frequency of the formation of bubbles of vapor upon boiling of a magnetic fluid at a single vaporization center) // *ZHTF*. 2007. V. 77. № 11. p. 31.
7. Simonovskij A.Ya., Yanovskij A.A. Vliyanie odnorodnogo magnitnogo polya na teploobmen pri kipenii magnitnoj zhidkosti na neogranichennoj poverxnosti (Influence of a homogeneous magnetic

field on heat transfer upon boiling of a magnetic fluid on an unbounded surface) // Vestnik Stavropol'skogo gosudarstvennogo universiteta. 2011.

8. Syam S. L.; Singh M. K., Sousa A. Investigation of thermal conductivity and viscosity of Fe_3O_4 nanofluid for heat transfer applications // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2013. V. 44 P. 7–14.
9. Yanovskii A.A., Simonovskii A.Ya., Klimenko E.M. On the Influence of the Magnetic Field upon Hydrogasdynamic Processes in a Boiling Magnetic Fluid // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2014. V. 50. № 3. P. 260.
10. Yanovskiy A. A., Simonovsky A. Ya., Kholopov V. L., Chuenkova I. Yu. Heat Transfer in Boiling Magnetic Fluid in a Magnetic Field // Solid State Phenomena. 2015. № 233–234. P. 339.
11. Khoshmehr H.H., Saboonchi A., Shafii M.B., Jahani N. The study of magnetic field implementation on cylinder quenched in boiling ferro-fluid // Applied Thermal Engineering. 2014. V. 64. № 1–2. P. 331.
12. Zupan J., Renjo M.M. Thermal and rheological properties of water-based ferrofluids and their applicability as quenching media // 20th International Conference on Magnetism. Conf. Proc. ICM 2015. V. 75. P. 1458.
13. Abdollahi A. Salimpour M.R., Etesami N. Experimental analysis of magnetic field effect on the pool boiling heat transfer of a ferro-fluid // Applied Thermal Engineering. 2017. V. 111. P. 1101.

УДК 621.1.016.4

Коновалов Д.А. [Konovalov D.A.]

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОКАНАЛЬНЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ МАТРИЦЫ МОНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ

**Modeling of heat-hydraulic characteristics
of microchannel heat transfer elements based
on the matrix of silicon monocrystals**

Предложена конструкция теплообменного элемента на основе матрицы нитевидных кристаллов кремния для систем термостабилизации миниатюрных источников тепловыделения с удельной мощностью до 100 Вт/см^2 , работающих в широком диапазоне температур окружающей среды. На основе разработанной математической модели конвективного переноса теплоты в микроканальном компактном теплообменнике с развитой поверхностью теплообмена проведено численное моделирование процессов гидродинамики и теплообмена для различных конфигураций микроканальных вставок. Получены поля давлений, скоростей течения, температур охладителя и матрицы из монокристаллов кремния в широком диапазоне расходов охладителя, определены критериальные зависимости для числа Нуссельта, а также потерь давления различных геометрических конфигураций теплообменников. Исследованы критические режимы работы, предложены направления оптимизации. По разработанной технологии изготовлены опытные образцы для проведения испытаний.

The construction of a heat exchange element based on a matrix of silicon whiskers for thermal stabilization systems of miniature heat sources with specific power up to 100 W / cm^2 operating over a wide range of ambient temperatures is proposed. Based on the developed mathematical model of convective heat transfer in a microchannel compact heat exchanger with a developed heat exchange surface, numerical simulation of the hydrodynamics and heat transfer processes for various configurations of microchannel insertions was carried out. Fields of pressures, flow velocities, coolant temperatures and matrix from silicon single crystals have been obtained in a wide range of coolant flow rates, criteria dependencies for the Nusselt number and pressure losses of various geometric configurations of heat exchangers have been determined. Critical operation modes are investigated, optimization directions are proposed. According to the developed technology, prototypes for testing have been manufactured.

Ключевые слова: монокристалл кремния, конвективный теплообмен, критериальная зависимость, интенсификация теплообмена, критические режимы работы.

Key words: monocrystalline silicon, convective heat transfer, the criteria dependence, intensification of heat exchange, critical modes of operation.

Введение

Активное развитие таких отраслей как энергетика, электроника ведет к росту энергонапряженности отдельных элементов энергетического и электронного оборудования и росту тепловыделения на фоне повышенных требований к компактности и миниатюризации систем теп-

ловой защиты [1–3]. Для обеспечения устойчивой работы указанного оборудования необходимо поддержание рабочих тепловых режимов, что ведет к необходимости создания систем термостабилизации, работающих в условиях как высоких, так и низких температур окружающей среды. Так, например, для наземных систем управления спутниковыми комплексами требуется поддержание высокой тепловой стабильности ($\pm 0,1^\circ\text{C}$), что может потребовать применения различного рода высокоэффективных теплообменных элементов. Миниатюризация устройств и повышение нагрузок требует интенсификации теплообмена. Большое распространение получили различного рода пористые и микроканальные рекуперативные теплообменники. Широкий диапазон структурных, теплофизических, гидравлических, химических, оптических и других свойств пористых и микроканальных материалов, простота изготовления из них элементов конструкций, высокая интенсивность теплообмена – все это дает возможность использовать указанные теплообменные элементы в условиях действия высоких тепловых нагрузок и температур, там, где другие виды охлаждения конструкций оказываются малоэффективными. Так, например, в системах тепловой защиты жидкостных ракетных двигателей, сверхзвуковых огнеструйных резаков, плазмотронов, а также блоков питания, микросхем, современных процессоров, станций базовой, спутниковой и космической связи были разработаны и успешно апробированы пористые теплообменники с межканальной транспирацией охладителя.

Одним из перспективных способов подвода/отвода тепла с энергонапряженной поверхности является применение микроканальных теплообменников на основе матрицы нитевидных кристаллов кремния. Это позволяет существенно увеличить коэффициент теплоотдачи от тепловыделяющей поверхности к теплоносителю, а удельный теплосъем может составлять до 100 Вт/см^2 . Следует отметить, что на процесс теплопереноса оказывает непосредственное влияние не только конвективная составляющая, но и теплофизические свойства самого теплоотводящего элемента, а также термическое сопротивление между «горячей» поверхностью и охладителем. Так, при величине коэффициента внутрипорового теплообмена равным $h_v = 10^9 \dots 10^{11} \text{ Вт/(м}^3 \cdot \text{K)}$, эффективный коэффициент теплопроводности медной матрицы составит $160 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$, а удельное термическое сопротивление между нагретой поверхностью и теплообменником составляет порядка от 10^{-3} до $10^{-2} \text{ (м} \cdot \text{K)/Вт}$, что в целом сводит на «нет» эффективность пористого охлаждения.

В свою очередь, технология получения монокристаллов кремния позволяет в некоторых случаях выращивать теплообменный элемент с регулярной структурой на тепловыделяющей поверхности, что исключает термическое сопротивление в месте контакта. Следовательно, поддержание заданной рабочей температуры энергонапряженных устройств, точное прогнозирование режимов их работы является актуальной задачей.

Материалы и методы исследований

На основе технологии [4], был разработан и создан макет базового варианта теплоотводящего элемента из нитевидных монокристаллов кремния, выращенных на кремниевой подложке (рис. 1а). Нитевидные кристаллы кремния выращиваются на кремниевых монокристаллических подложках в печи с горизонтальным расположением трубчатого кварцевого реактора в открытой хлоридно-водородной среде. После разращивания кристаллов, подача тетрахлорида кремния в реакционную зону прекращается, а реактор с выращенными образцами нитевидных кристаллов охлаждается до комнатной температуры. Морфологические исследования выполняются методами сканирующей зондовой микроскопии. Предложенная технология позволяет выращивать нитевидные кристаллы кремния с различной конфигурацией их расположения (сплошной ряд, змейка и пр.)

Теплообменник состоит из медного основания, в котором располагается теплообменный элемент из матрицы монокристаллов кремния и верхней крышки со штуцерами подвода и отвода охладителя. Основание и крышка стягиваются винтами. Для предотвращения утечки охладителя предусмотрена резиновая прокладка. Охладитель подается в теплообменник (рис. 1б) через штуцер подвода охладителя, проходит через область матрицы нитевидных монокристаллов кремния, нагревается от них, охлаждая теплонапряженный элемент, на котором установлен теплообменник, и отводится через штуцер отвода охладителя.

Кремниевая подложка имеет размеры 20×20 мм (рис. 2а), толщина подложки на которой выращены шипы 0,2 мм, высота шипов 1 мм, диаметр шипов 0,1 мм. Теплоотводящие элементы (шипы) расположены в шахматном

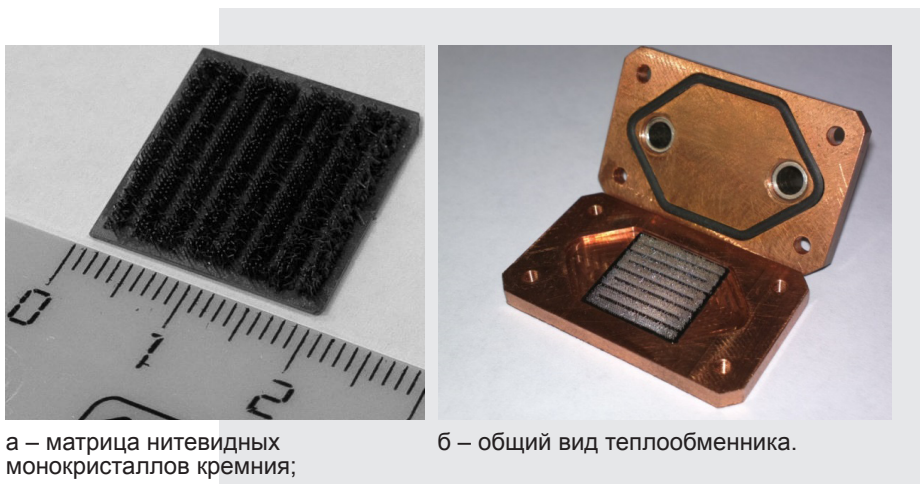
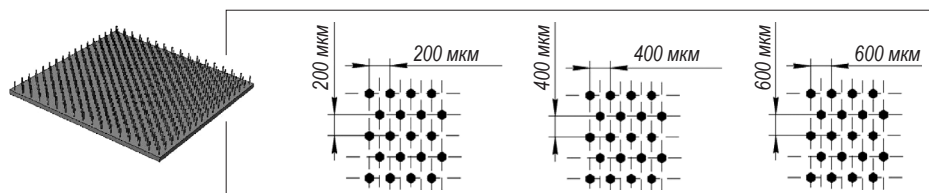


Рис. 1.

Теплообменник с матрицей из нитевидных монокристаллов кремния.



а – 3D модель;

б – схема расположения шипов на подложке.

Рис. 2. Кремниевая подложка.

порядке, расстояние между их центрами по оси x и y равно 200, 400, 600 мкм соответственно (рис. 2б). В таком варианте теплоотводящие элементы образуют монолитную конструкцию вместе с подложкой, что исключает термическое сопротивление.

В настоящее время практически отсутствуют результаты математического и численного моделирования процессов тепломассопереноса в микроканальных структурах подобного рода. Применение математических моделей и классических критериальных уравнений тепломассопереноса для макромоделей в том числе обтекание пучков труб в теплообменниках для оценки процессов в микромасштабах дает неудовлетворительные результаты. Использование модели идеальной пористой среды для прогнозирования работы микроканальных элементов также является несовершенной, что заключается в серьезном расхождении результатов численного и экспериментального моделирования.

Это связано с тем, что необходимо исследование особенностей процессов гидродинамики и теплообмена в микроканалах, когда следует учитывать пристеночные течения вблизи стенок и шипов, а также развитые течения в свободном пространстве. Существенный градиент температур между шипом и охладителем также вносит свои коррективы в точность моделирования процессов гидродинамики, в том числе и на нестационарных режимах работы. Некорректность существующих моделей ведет к потере точности в оценке процессов тепломассопереноса в разрабатываемых элементах тепловой защиты, что может привести к ее разрушению при критических режимах работы.

Моделирование конвективного теплообмена в подобного рода средах основывается на феноменологических уравнениях Дарси-Бринкмана-Форчгеймера [5–6]. Для получения аналитического решения выделяется элементарный объем для одиночного шипа, производится объемное осреднение, а затем совместно применяется одностороннее интегральное преобразование Лапласа и конечное интегральное преобразование Фурье. Для подтверждения корректности и адекватности предложенной математической модели, уточнения гидродинамической обстановки было проведено численное моделирование в среде ANSYS.

Важным этапом при построении математической модели для исследования характеристик течения охладителя является выбор системы уравнений для расчета. От этого зависит качество и точность полученных результатов. В ANSYS Fluent эти системы уравнений представлены в моделях турбулентности.

Система уравнений для неизотермического (с теплообменом) течения несжимаемой жидкости в декартовых прямоугольных координатах будет состоять из уравнений неразрывности (1), движения (2) и энергии (3).

$$\nabla U = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + (U \cdot \nabla)U = J - \frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \Delta U, \quad (2)$$

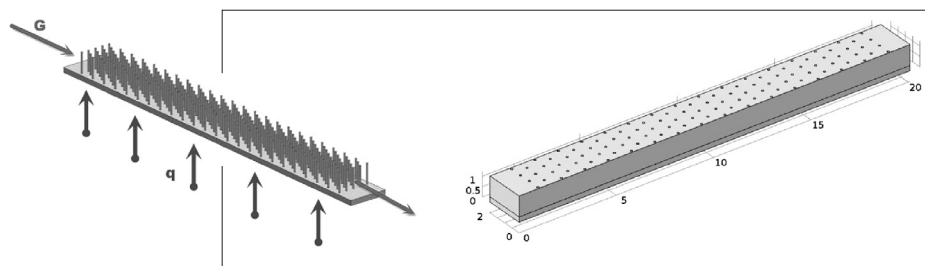
$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + (U \cdot \nabla)T = a \Delta T + \frac{q_v}{\rho c_p}, \quad (3)$$

где U – скорость течения охладителя;
 p – давление;
 τ – время;
 ρ – плотность жидкости;
 J – результирующий вектор массовых сил,
 μ – коэффициент динамической (молекулярной) вязкости;
 ν – кинематическая вязкость среды ($\nu = \mu / \rho$),
 a – коэффициент температуропроводности ($a = \lambda / \rho c_p$).

С целью ускорения вычислительного процесса был использован модельный элемент подложки нитевидных монокристаллов кремния, показанной на рисунке 3а. Геометрические размеры модели составили 2 × 20 мм. Остальные геометрические размеры и схема расположения шипов оставались неизменными. Расчетная область вместе со сгенерированным дискретным разбиением показана на рисунке 3б.

Выбор модели турбулентности при использовании пакета ANSYS следует учитывать, что модель должна быть протестирована для аналогичного класса задач, должна быть инвариантна к использованию геометрических и теплофизических параметров, характеризующих выбранный тип теплообменных элементов с регулярной матрицей и использовать имеющиеся в наличии экспериментальные данные по гидротермическим полям, а также отвечать критерию устойчивости и сходимости вычислительного процесса.

В качестве математической модели гидродинамики течения охладителя была выбрана двухслойная модель SST, которая обеспечивает хорошую сходимость с достаточной скоростью с учетом структуры турбулентного потока



а – участок подложки с шипами

б – 3D модель расчетной области

Рис. 3. Модельный элемент.

в ядре и пограничном слое вблизи поверхности шипов. Преимущество данной модели состоит в том, что данная модель учитывает одновременно вихреобразование (модель $k - \omega$) и интенсивность пульсаций (модель $k - \epsilon$). Такой выбор коррелируется с исследованиями модели SST, приведенными в работах [7–8].

При анализе представленного программного образа для пакета ANSYS были использованы следующие допущения:

- теплоноситель являлся ньютоновской несжимаемой жидкостью;
- течение теплоносителя носит стационарный и трехмерный характер;
- теплофизические свойства потока и матрицы нитевидных монокристаллов кремния рассчитывались при средней температуре процесса;
- начальный гидродинамический участок на входе теплообменного элемента отсутствовал;
- внутренние тепловыделения отсутствуют;
- тепловой поток подводится через нижнюю стенку, боковые и верхняя стенка теплоизолированы.

Для проведения математического моделирования использовался специализированный расчетный комплекс Ansys Fluent v. 17, предназначенный для численного решения уравнений движения жидкости и теплообмена в интересующей расчетной области, что позволило снизить трудоемкость и сократить длительность расчетов. Алгоритм использования Ansys Fluent для решения поставленной задачи заключается в следующем. На первом этапе осуществляется импорт построенной 3д-модели исследуемого объекта в решатель Fluent; на втором – декомпозиция расчетной области и построение сетки, оценивается ее качество; на третьем этапе необходимо определить граничные условия, выбрать параметры расчета, свойства материалов,

выбор дополнительных моделей для моделирования турбулентности; на четвертом производится решение поставленной задачи. Не учитывалось влияние подводящих и отводящих коллекторов.

Для проведения расчетов была сгенерирована объемная модель объекта, после чего декомпозировалась расчетная область в виде плоских треугольных элементов для подложки и в виде тетраэдров для области течения с использованием граничного разделения. Сгенерированная сетка для расчетных областей имела следующие параметры:

- для области с шагом расположения шипов 200×200 мкм:
тип сетки – тетрагональная; размеры ячеек:
 $\min 3,793176 \times 10^{-17}$ м, $\max 2,098848 \times 10^{-11}$ м;
количество ячеек – 17736744 шт.;
- для области с шагом расположения шипов 400×400 мкм:
тип сетки – тетрагональная; размеры ячеек:
 $\min 4,980473 \times 10^{-17}$ м, $\max 3,267845 \times 10^{-11}$ м;
количество ячеек – 16999847 шт.;
- для области с шагом расположения шипов 600×600 мкм:
тип сетки – тетрагональная; размеры ячеек:
 $\min 3,569304 \times 10^{-17}$ м, $\max 3,999074 \times 10^{-11}$ м;
количество ячеек – 16534874 шт.

В расчетах варьировались геометрические размеры матрицы, а именно межцентровое расстояние шипов 200×200 , 400×400 и 600×600 мкм. Диапазон расходов, температура на входе и подводимый тепловой поток были одинаковы для всех конструкций подложек.

Результаты исследований и их обсуждение

Для проведения вычислительного эксперимента были выбраны следующие исходные данные. В качестве теплоносителя была выбрана вода. Массовый расход охладителя изменялся в диапазоне от 0,0006 кг/с до 0,0100 кг/с. На поверхности нагрева задаются граничные условия второго рода, удельный тепловой поток с тепловыделяющей поверхности $q = 100$ Вт/см². Отсутствует тепловой поток через боковые и верхнюю стенки. Коэффициент теплопроводности кремния $\lambda_s = 130$ Вт/м·К; коэффициент теплопроводности воды $\lambda_f = 130$ Вт/м·К. На входе в теплообменник заданы граничные условия 1 рода, а температура охладителя составила 20 °С.

В качестве примера расчета на рисунках 4–5 представлена визуализация расчетов ANSYS для матрицы нитевидных кристаллов кремния с шагом 600×600 мкм.

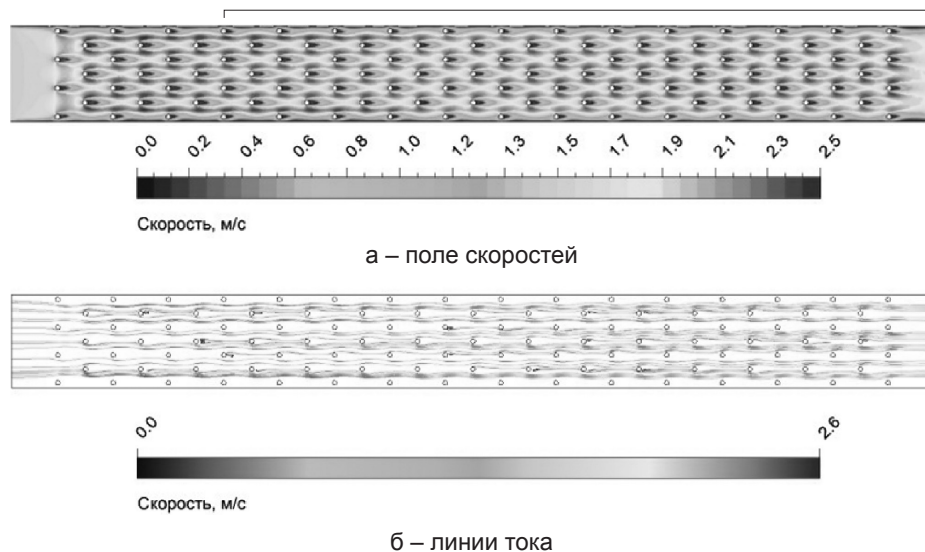


Рис. 4. Гидродинамическая картина течения для матрицы 600х600 мкм.

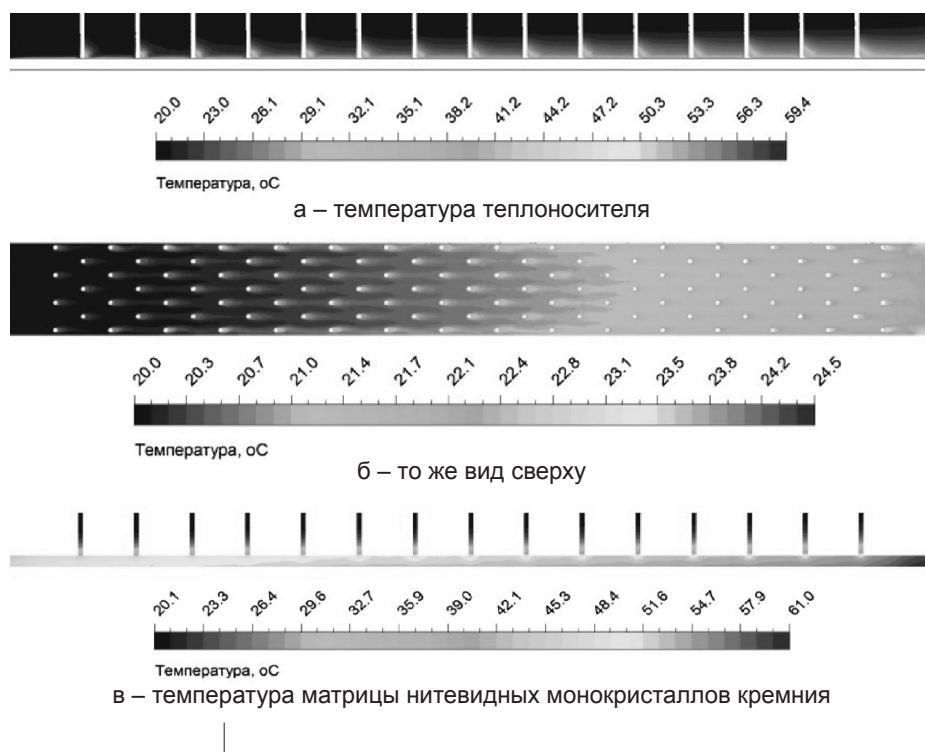


Рис. 5. Распределение температуры микроканальном элементе (600х600 мкм):

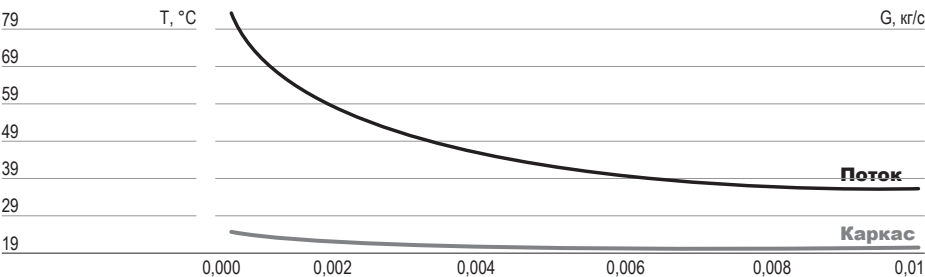


Рис. 6. Зависимость температуры потока и каркаса от расхода охладителя (600 × 600 мкм).

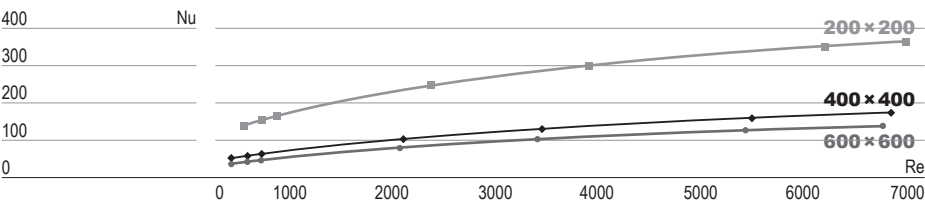


Рис. 7. Сравнительный график зависимости числа Nu от числа Re.

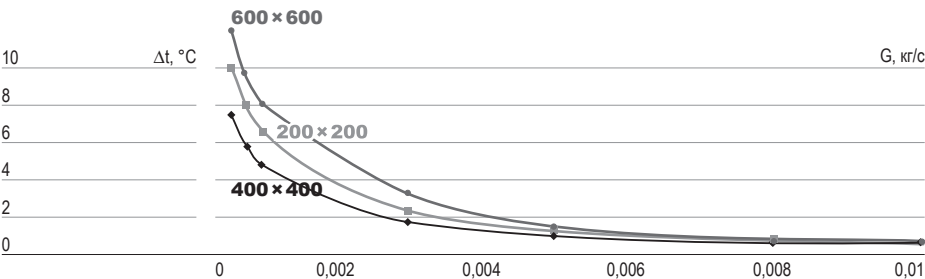


Рис. 8. Сравнительный график зависимости перепада температуры на входе и выходе из матрицы от расхода охладителя.

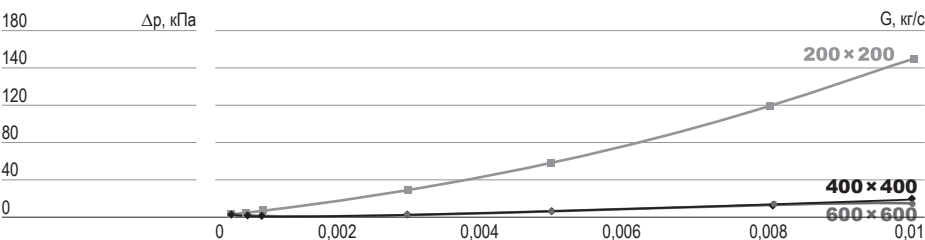


Рис. 9. Сравнительный график зависимости перепада давления от расхода охладителя.

На рисунке 6 приведены зависимости температур матрицы и охладителя в исследуемом диапазоне расходов.

На рисунках 7–9 представлены зависимости теплогидравлических характеристик в зависимости от расхода теплоносителя.

Обработка результатов вычислительных экспериментов представлена в классическом критериальном виде для чисел Нуссельта и потерь давления для примененного спектра структуры используемых матриц. Результаты обработки результатов для:

- подложки с межцентровым расстоянием шипов 200×200 мкм
 $Nu = 12,035 \cdot Re^{0,3876}$, $\Delta p = 154,295 \cdot G^{1,4888}$;
- подложки с межцентровым расстоянием шипов 400×400 мкм
 $Nu = 3,173 \cdot Re^{0,4515}$, $\Delta p = 24,841 \cdot G^{1,5422}$;
- подложки с межцентровым расстоянием шипов 600×600 мкм
 $Nu = 1,9698 \cdot Re^{0,4833}$, $\Delta p = 28,645 \cdot G^{1,6057}$.

где $Nu = \alpha_f d / \lambda_f$; $Re = \rho d v$;

α_f – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

d – характерный размер, м.

Анализа результатов вычислительного эксперимента показал, что течение теплоносителя симметричный характер относительно стенок и ядра потока. При расходах 0,0006–0,0030 кг/с течение теплоносителя носит ламинарный характер. Отсутствуют завихрения потока, как в целом, так и вблизи локальных элементов (шипов). При расходах теплоносителя свыше 0,0030 кг/с наблюдается ярко выраженный переходный режим течения от ламинарного к турбулентному с локальным возникновением отрывных течений за шипами, что свидетельствует о возникновении застойных зон, величина которых достигает расстояния между шипами только при высоких расходных характеристиках. Наблюдается существенное различие между температурой каркаса матрицы нитевидных монокристаллов кремния и температуры охладителя. Это свидетельствует о корректности применения двухтемпературного подхода при построении математической модели. Из полученных данных следует, что с увеличением расхода охладителя не наблюдается возрастания теплосъема, т.к. прогрев теплоносителя происходит только в нижней его части. Уменьшение шага шипов также не способствует увеличению эффективности охлаждения, и к тому же значительно увеличивает потери давления охладителя через матрицу нитевидных монокристаллов кремния.

Найдена рациональная высота шипа $\approx 0,6$ мм и межцентровое расстояние между шипами 600×600 мкм, которые позволяют максимально охлаждать подложку при незначительном увеличении потерь давления на прокачку теплоносителя. На начальном тепловом участке $X \approx 0,2l$ (l – длина теплообменника) высота шипа может быть снижена до величины от 0,2 до 0,3 мм, что положительно скажется на гидравлическом сопротивлении, без снижения

тепловых показателей. Разработанная математическая модель позволяет оценить локализацию по полю температур теплоносителя критическую изотерму и сделать вывод о возможном фазовом переходе с учетом получаемого на данной изотерме абсолютного давления.

Выводы

Вычислительный эксперимент на базе пакета ANSYS позволил уточнить локальную гидродинамическую структуру течения теплоносителя и показать, что влияние частоты шахматного расположения шипов в диапазонах $0,2 \times 0,2$; $0,4 \times 0,4$ и $0,6 \times 0,6$ мм не оказывает существенного влияния на перемешивание теплоносителя при его течении через теплообменный элемент. Подтверждено использование модели идеального вытеснения при описании теплообмена в теплообменном элементе с регулярной матрицей из нитевидных монокристаллов кремния. Результаты аналитического и численного решения показывают существенную разность температур между каркасом и охладителем, а также существенную нелинейность распределения температуры по высоте шипов. При моделировании микроканальных теплообменных элементов с матрицей нитевидных монокристаллов кремния необходимо учитывать данные факты для исключения локального перегрева. Результаты моделирования могут рассматриваться как основа для инженерной методики расчета и инструментарий для выбора конструктивных параметров проектируемых теплообменных систем и идентификации рациональных режимов их функционирования.

Библиографический список

1. Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах: монография / Б. В. Дзюбенко, Кузма-Кичта Ю. А., Леонтьев А. И. и др. // М.: ФГУП «ЦНИИАТОМИНФОРМ», 2008. 532 с.
2. Разработка и моделирование микроканальных систем охлаждения: монография / Д. А. Коновалов, Дроздов И. Г., Шматов Д.П. и др. // Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2013. 222 с.
3. Коновалов Д.А., Лазаренко И.Н., Дроздов И.Г., Шматов Д.П. Современные подходы к разработке и созданию элементов систем тепловой защиты радиоэлектронных компонентов. Вестник ВГТУ Т. 10. № 1. 2014. С. 97–104.
4. Небольсин В.А., Иевлева Е.В., Шмакова С.С. О взаимосвязи электронного строения и каталитических свойств металлов – катализаторов роста нитевидных кристаллов кремния // Вестник ВГТУ. 2012. Т. 8. № 7. С. 37–42.
5. Bear J, Bachmat Y. Introduction to modeling of transport phenomena in porous media. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1991 – 553 p.

6. Chen G.M., Tso C.P. A two-equation model for thermally developing forced convection in porous medium with viscous dissipation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2011. v. 54, №25–26. pp 5406–5414.
7. Белов И. А., Исаев С. А. Моделирование турбулентных течений: учеб. пособие Балтийский государственный технический университет «Военмех». Типография БГТУ. Санкт-Петербург, 2001. 106 с.
8. Гарбарук, А.В., Стрелец М.Х., Шур М.Л. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Поли-техн. ун-та, 2012. 88 с.

References

1. Dzyubenko B.V., Kuzma-Kichta Yu.A., Leont'ev A.I., Fedik I.I., Kholpanov L.P. Intensifikatsiya teplo- i massoobmena na makro-, mikro- i nanomasshtabakh. [Intensification of heat and mass transfer at the macro-, micro – and nanoscale]. Moscow, FGUP «TsNIIATOMINFORM», 2008. 532 p.
2. Kononov D.A., Drozdov I.G., Shmatov D.P., Dakhin S.V., Kozhukhov N.N. Razrabotka i modelirovanie mikrokanal'nykh sistem okhlazhdeniya [Development and modeling of microchannel cooling systems]. Voronezh, VSTU publ., 2013. 222 p.
3. Kononov D.A., Lazarenko I.N., Drozdov I.G., Shmatov D.P. Sovremennyye podkhody k razrabotke i sozdaniyu elementov sistem teplovoy zashchity radioelektronnykh komponentov [Modern approaches to the development and creation of elements of system of thermal protection of electronic components]. Voronezh, VSTU publ., 2014, vol. 10, no. 1, pp. 97–104. (In Russ).
4. Nebol'sin V.A., Ievleva E.V., Shmakova S.S. O vzaimosvyazi elektronogo stroeniya i kataliticheskikh svoystv metallov – katalizatorov rosta nitevidnykh kristallov kremniya [On the relationship of the electronic structure and catalytic properties of metal catalysts for the growth of silicon whiskers]. Voronezh, VSTU publ., 2012, vol. 8, no. 7.2, pp. 37–42. (In Russ).
5. Bear J., Bachmat Y. Introduction to Modeling of Transport Phenomena in Porous Media. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1991. 553 p.
6. Chen G.M., Tso C.P. A two-equation model for thermally developing forced convection in porous medium with viscous dissipation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011. vol. 54, no. 25–26, pp. 5406–5414.
7. Belov I.A., Isaev S.A. Modelirovanie turbulentnykh techeniy. [Modeling of turbulent flows] Sankt-Peterburg, BGTU pub., 2001. 106 p.
8. Garbaruk, A.V., Strelets M.Kh., Shur M.L. Modelirovanie turbulentnosti v raschetakh slozhnykh techeniy [Modeling turbulence in complex flows calculations: proc. manual]. Sankt-Peterburg. Politechnic pub. 2012. 88 p.

УДК 519.65

Корнеев П.К. [Korneev P.K.]
Журавлева И.А. [Juravleva I.A.]
Непретимова Е.В. [Nepretimova E.V.]
Гладков А.В. [Gladkov A.V.]
Лягин А.М. [Lyagin A.M.]

ПРЕДФРАКТАЛЫ КАК ИСТОЧНИК НОВЫХ ДРОБНО-РАЦИОНАЛЬНЫХ ПРИБЛИЖЕНИЙ ФУНКЦИЙ, ИМЕЮЩИХ ФРАКТАЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ

Prefractal as the source of new rational approximations of functions with a fractal representation.

Статья посвящена актуальной проблеме ускорения сходимости многочленных и дробно-рациональных приближений функций. В теории приближения функций часто используется идея уменьшения интервала изменения аргумента как метода ускорения сходимости степенных и дробно-рациональных приближений, аппроксимирующих данную функцию. В статье, используя эту идею, сначала для данной функции строится ветвящаяся цепная дробь, ветвями которой являются либо функциональные ряды, либо функциональные цепные дроби. В этом случае ветвящаяся цепная дробь, представляющая собой данную функцию, является фракталом и одновременно сжимает интервал изменения аргумента в 2^k ($k = 1, 2, \dots$) раз, где 2^k – число ветвей ветвящейся цепной дроби. То есть вычисление данной функции в точке x сводится к вычислениям в точке $x/2^k$, что естественно и влечет ускорение сходимости степенных и дробно-рациональных приближений. Для построения новых дробно-рациональных приближений ветвящаяся цепная дробь (фрактал) заменяется предфракталом – ветвящейся цепной дробью с конечным числом звеньев. Здесь каждое звено заменяется многочленом либо конечной цепной дробью. В результате можно получить сколь угодно много рациональных приближений.

The Article is devoted to the problem of accelerating the convergence of polynomial and rational approximations of functions. In the theory of approximation of functions often used the idea of reducing the interval change in the argument as a method to accelerate the convergence of exponential and rational approximations, approximating this function. In this article, using this idea, a first for this function builds a branching continued fraction, whose branches are either functional series, functional or chain fractions. In this case, the branching continued fraction representing this function is a fractal and at the same time compresses the range of variation of the argument in 2^k ($k = 1, 2, \dots$) time, where 2^k is the number of branches of the branched chain fraction. That is, the computation of this function at the point x is to compute $x/2^k$, which is natural and leads to acceleration of convergence of exponential and rational approximations. To build a new rational approximations of branching continued fraction (fractal) is replaced by prefractals – chain-branching fraction with a finite number of links. Here each link is replaced by the polynomial finite chain fraction. In the result, we can obtain arbitrarily many rational approximations.

Ключевые слова: аппроксимация, функциональные ряды, цепные дроби, фракталы, сходимость.

Key words: approximation, functional series, continued fractions, fractals, convergence.

Введение

В статьях [4, 5, 6] получены разложения тригонометрических, гиперболических и показательной функций в ветвящиеся цепные дроби с конечным и бесконечным числом ветвей. Показано так же, что ветвя-

щиеся цепные дроби с бесконечным числом ветвей являются фракталами, а соответственно ветвящиеся цепные дроби с конечным числом ветвей – предфракталы.

Источниками получения дробно-рациональных приближений функций одного переменного являются функциональные цепные дроби [1], таблица Паде [2], наилучшие дробно-рациональные приближения [3] и др. В статье [7], используя предфракталы фрактального представления функции $tg(x)$, построены новые дробно-рациональные приближения этой функции и приведены оценки остаточных членов.

Постановка задачи

Здесь получим новые дробно-рациональные приближения для функции $y = sh(x)$ на отрезке $[0; \pi/4]$ и оценки их остаточных членов, используя предфракталы фрактального представления функции.

Методология и методы исследования

Основными методами для вычисления функций на компьютере являются: степенные разложения, рациональные приближения, разложения в цепные дроби, итеративные процессы и другие.

1. В дальнейшем нам понадобятся следующие разложения функций [1, 3]:

$$th(x) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2^{2k}(2^{2k}-1)}{(2k)!} \cdot B_{2k} \cdot x^{2k-1}, |x| < \frac{\pi}{2}, \quad (1)$$

где B_{2k} – числа Бернулли;

$$th x = \frac{x}{1} + \frac{x^2}{3} + \frac{x^2}{5} + \dots + \frac{x^2}{2k+1} + \dots, |x| < \frac{\pi}{2}; \quad (2)$$

$$sh x = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{x^{2k+1}}{(2k+1)!}, |x| < \infty; \quad (3)$$

$$sh x = x + \frac{x^3}{3!} - \frac{3x^2}{10} + \frac{11x^2}{42} - \frac{25x^2}{66} + \dots \quad (4)$$

Ряду (3) соответствует последовательность частичных сумм (тейлоровских многочленов) и оценок норм их погрешностей:

$$P_1(x) = x,$$

$$\begin{aligned}
P_3(x) &= x + \frac{x^3}{3!}, & \|r_3\|_{C[0; \frac{\pi}{4}]} &< 2.53 \cdot 10^{-3}; \\
P_5(x) &= x + \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!}, & \|r_5\|_{C[0; \frac{\pi}{4}]} &< 3.69 \cdot 10^{-5}; \\
P_7(x) &= x + \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} + \frac{x^7}{7!}, & \|r_7\|_{C[0; \frac{\pi}{4}]} &< 3.16 \cdot 10^{-7}; \\
P_9(x) &= x + \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} + \frac{x^7}{7!} + \frac{x^9}{9!}, & \|r_9\|_{C[0; \frac{\pi}{4}]} &< 1.77 \cdot 10^{-9}
\end{aligned} \quad (5)$$

и так далее.

Цепной дроби (4) соответствует последовательность ее подходящих дробей и оценок норм их погрешностей:

$$\begin{aligned}
Q_1(x) &= \frac{x}{1}, \\
Q_2(x) &= \frac{x}{1} + \frac{x^3}{3!}, & \|r_2\|_{C[0; \frac{\pi}{4}]} &< 2.53 \cdot 10^{-3}; \\
Q_3(x) &= \frac{x}{1} + \frac{x^3}{3!} - \frac{3x^2}{10}, & \|r_3\|_{C[0; \frac{\pi}{4}]} &< 4.24 \cdot 10^{-5}; \\
Q_4(x) &= \frac{x}{1} + \frac{x^3}{3!} - \frac{3x^2}{10} + \frac{11x^2}{42}, & \|r_4\|_{C[0; \frac{\pi}{4}]} &< 2.31 \cdot 10^{-7}; \\
Q_5(x) &= \frac{x}{1} + \frac{x^3}{3!} - \frac{3x^2}{10} + \frac{11x^2}{42} - \frac{25x^2}{66}, & \|r_5\|_{C[0; \frac{\pi}{4}]} &< 1.75 \cdot 10^{-9}
\end{aligned} \quad (6)$$

и так далее.

2. Теперь для функции $y = sh(x)$ построим ее фрактальное представление.

Возьмем известное преобразование

$$sh(x) = \frac{2th \frac{x}{2}}{1 - th^2 \frac{x}{2}} \quad (th^2 x/2 \neq 1) \quad (7)$$

и представим его в виде:

$$sh(x) = \frac{-2}{th \frac{x}{2} - \frac{1}{th \frac{x}{2}}} \quad (8)$$

Если вместо функции $y = th^{x/2}$ подставить ее разложение в цепную дробь, то получим разложение функции $y = sh(x)$ в ветвящуюся цепную дробь с двумя ветвями:

$$sh(x) = \frac{-2}{\frac{z}{1 + \frac{z^2}{3 + \frac{z^2}{5 + \ddots}}}} - \frac{1}{\frac{z}{1 + \frac{z^2}{3 + \frac{z^2}{5 + \ddots}}}}, \quad (9)$$

где $z = \frac{x}{2}$.

Если для функции $y = th^{x/2}$ воспользоваться равенством

$$th^x = \frac{2}{th \frac{x}{2} + \frac{1}{th \frac{x}{2}}}, \quad (10)$$

то для функции $y = sh(x)$ получим следующее представление:

$$sh(x) = \frac{-2}{\frac{2}{th \frac{x}{4} + \frac{1}{th \frac{x}{4}}} - \frac{1}{\frac{2}{th \frac{x}{4} + \frac{1}{th \frac{x}{4}}}}}. \quad (11)$$

Если вместо функции $th^{x/4}$ в представлении (11) подставить ее разложение в цепную дробь (2), то получим разложение $sh(x)$ в ветвящуюся цепную дробь с четырьмя ветвями:

$$sh(x) = \frac{-2}{\frac{2}{1 + \frac{z}{3 + \frac{z^2}{5 + \ddots}}} + \frac{1}{1 + \frac{z}{3 + \frac{z^2}{5 + \ddots}}}} - \frac{1}{\frac{2}{1 + \frac{z}{3 + \frac{z^2}{5 + \ddots}}} + \frac{1}{1 + \frac{z}{3 + \frac{z^2}{5 + \ddots}}}}, \quad (12)$$

где $z = \frac{x}{4}$.

Если воспользоваться равенством (10), то для разложения (12) получим следующее представление:

$$sh(x) = \frac{-2}{\frac{2}{th \frac{x}{8} + \frac{1}{th \frac{x}{8}}} + \frac{1}{\frac{2}{th \frac{x}{8} + \frac{1}{th \frac{x}{8}}}}} - \frac{1}{\frac{2}{th \frac{x}{8} + \frac{1}{th \frac{x}{8}}} + \frac{1}{\frac{2}{th \frac{x}{8} + \frac{1}{th \frac{x}{8}}}}} \quad (13)$$

Если вместо функции $th \frac{x}{8}$ в представлении (13) подставить ее разложение в цепную дробь, то получим разложение $y = sh(x)$ в ветвящуюся цепную дробь с восемью ветвями:

$$sh(x) = \frac{-2}{R(z) - \frac{1}{R(z)}}, \quad (14)$$

где

$$R(z) = \frac{-2}{\frac{2}{1 + \frac{z}{3 + \frac{z^2}{5 + \ddots}}} + \frac{1}{1 + \frac{z}{3 + \frac{z^2}{5 + \ddots}}}} - \frac{1}{\frac{2}{1 + \frac{z}{3 + \frac{z^2}{5 + \ddots}}} + \frac{1}{1 + \frac{z}{3 + \frac{z^2}{5 + \ddots}}}} \quad (15)$$

$$z = \frac{x}{8}.$$

Процесс «размножения» ветвей представления (14) можно продолжить, в результате чего получим сколь угодно много разложений функции $y = sh(x)$ в ветвящиеся цепные дроби, в которых аргумент имеет вид $x/2^k$, а 2^k – число ветвей ($k = 1, 2, 3, \dots$).

Все эти разложения обладают свойством: каждое из них первоначальный отрезок изменения аргумента $[0, a]$ сжимает в 2^k ($k = 1, 2, \dots$) раз, то есть первоначальный отрезок изменения аргумента отображается на отрезок $[0, a/2^k]$.

Если положить $k = \infty$, то в разложении функции $y = sh(x)$ будем иметь 2^k ветвей, то есть получим множество ветвей мощности континуума; другими словами, получим целое «дерево» ветвей

$$sh(x) = \frac{-2}{R\left(th \frac{x}{2^k}\right) - \frac{1}{R\left(th \frac{x}{2^k}\right)}}, \quad (16)$$

где $R(th \frac{x}{2^k})$ – это в общем случае ветвящаяся цепная дробь с 2^{k-1} ветвями.

В этом дереве ветвей выделим базовую форму

$$\frac{-2}{R(z) - \frac{1}{R(z)}} \quad (17)$$

где $R(z)$ – такая же по форме конструкция как и (16), но каждый раз в процессе размножения ветвей с уменьшающимся в 2 раза значением аргумента, то есть

$$z = \frac{x}{2^k} \quad (k = 1, 2, \dots).$$

Базовая форма (17) повторяется бесконечно со всё уменьшающимся значением аргумента, то есть множество ветвей представления (16) является фракталом [8]. Тогда множество правых частей представлений (9), (12), (14) – предфракталы.

Предфрактал (9) применим для построения дробно-рациональных приближений функции $y = sh(x)$. Для этого предфрактал представим в виде:

$$sh(x) = \frac{-2}{T(z) - \frac{1}{T(z)}}, \quad z = \frac{x}{2},$$

где $T(z)$ – тейлоровский ряд (1) или цепная дробь (2).

Заменяя $T(z)$ тейлоровскими многочленами (частичными суммами ряда (1)), получим следующие дробно-рациональные приближения для функции $y = sh(x)$

$$sp_1(z) = \frac{2P_1(z)}{1 - P_1^2(z)};$$

$$sp_3(z) = \frac{2P_3(z)}{1 - P_3^2(z)}, \quad \|r_3\|_{C[0; \frac{\pi}{4}]} < 3.7 \cdot 10^{-3};$$

$$sp_5(z) = \frac{2P_5(z)}{1 - P_5^2(z)}, \quad \|r_5\|_{C[0; \frac{\pi}{4}]} < 2.3 \cdot 10^{-4};$$

$$sp_7(z) = \frac{2P_7(z)}{1 - P_7^2(z)}, \quad \|r_7\|_{C[0; \frac{\pi}{4}]} < 1.5 \cdot 10^{-5}$$

и так далее.

Заменяя теперь $T(z)$ подходящими дробями цепной дроби (2), получим следующие дробно-рациональные приближения для функции $y = sh(x)$:

$$sd_1(z) = \frac{2Q_1(z)}{1 - Q_1^2(z)}, \quad \|r_1\|_{C[0; \frac{\pi}{4}]} < 6 \cdot 10^{-2};$$

$$sd_2(z) = \frac{2Q_2(z)}{1 - Q_2^2(z)}, \quad \|r_2\|_{C[0; \frac{\pi}{4}]} < 5.7 \cdot 10^{-4};$$

$$sd_3(z) = \frac{2Q_3(z)}{1 - Q_3^2(z)}, \quad \|r_3\|_{C[0; \frac{\pi}{4}]} < 2.5 \cdot 10^{-6};$$

$$sd_4(z) = \frac{2Q_4(z)}{1 - Q_4^2(z)}, \quad \|r_4\|_{C[0; \frac{\pi}{4}]} < 6.1 \cdot 10^{-9};$$

$$sd_5(z) = \frac{2Q_5(z)}{1 - Q_5^2(z)}, \quad \|r_5\|_{C[0; \frac{\pi}{4}]} < 9.4 \cdot 10^{-12}$$

3. Возьмем теперь предфрактал (11) или (12) с четырьмя ветвями

$$sh(x) = \frac{2}{\frac{2}{T(z) + \frac{1}{T(z)}} - \frac{1}{\frac{2}{T(z) + \frac{1}{T(z)}}}}, \quad z = \frac{x^2}{4}$$

где $T(z)$ – тейлоровский ряд (1) или цепная дробь (2).

Заменяя $T(z)$ тейлоровскими многочленами (частичными суммами ряда (1)), получим следующие дробно-рациональные приближения для функции $y = sh(x)$:

$$shP_1(z) = \frac{4P_1(z) \cdot (1 + P_1^2(z))}{(1 - P_1^2(z))^2}, \quad \|r_1\|_{C[0; \frac{\pi}{4}]} < 1.3 \cdot 10^{-2};$$

$$shP_3(z) = \frac{4P_3(z) \cdot (1 + P_3^2(z))}{(1 - P_3^2(z))^2}, \quad \|r_3\|_{C[0; \frac{\pi}{4}]} < 2.2 \cdot 10^{-4};$$

$$shP_5(z) = \frac{4P_5(z) \cdot (1 + P_5^2(z))}{(1 - P_5^2(z))^2}, \quad \|r_5\|_{C[0; \frac{\pi}{4}]} < 3.3 \cdot 10^{-6}; \quad (18)$$

$$shP_7(z) = \frac{4P_7(z) \cdot (1 + P_7^2(z))}{(1 - P_7^2(z))^2}, \quad \|r_7\|_{C[0; \frac{\pi}{4}]} < 5.2 \cdot 10^{-8};$$

$$shP_9(z) = \frac{4P_9(z) \cdot (1 + P_9^2(z))}{(1 - P_9^2(z))^2}, \quad \|r_9\|_{C[0; \frac{\pi}{4}]} < 8.1 \cdot 10^{-10}$$

и так далее.

Заменяя теперь $T(z)$ подходящими дробями цепной дроби (2), получим следующие дробно-рациональные приближения для функции $y = sh(x)$:

$$\begin{aligned} shQ_1(z) &= \frac{4Q_1(z) \cdot (1 + Q_1^2(z))}{(1 - Q_1^2(z))^2}, \quad \|r_1\|_{C[0; \frac{\pi}{4}]} < 1.2 \cdot 10^{-2}; \\ shQ_2(z) &= \frac{4Q_2(z) \cdot (1 + Q_2^2(z))}{(1 - Q_2^2(z))^2}, \quad \|r_2\|_{C[0; \frac{\pi}{4}]} < 3.5 \cdot 10^{-5}; \\ shQ_3(z) &= \frac{4Q_3(z) \cdot (1 + Q_3^2(z))}{(1 - Q_3^2(z))^2}, \quad \|r_3\|_{C[0; \frac{\pi}{4}]} < 3.9 \cdot 10^{-8}; \\ shQ_4(z) &= \frac{4Q_4(z) \cdot (1 + Q_4^2(z))}{(1 - Q_4^2(z))^2}, \quad \|r_4\|_{C[0; \frac{\pi}{4}]} < 2.4 \cdot 10^{-11}; \\ shQ_5(z) &= \frac{4Q_5(z) \cdot (1 + Q_5^2(z))}{(1 - Q_5^2(z))^2}, \quad \|r_5\|_{C[0; \frac{\pi}{4}]} < 9.0 \cdot 10^{-15} \end{aligned} \quad (19)$$

и так далее.

Обсуждение результатов исследования

Проведенные вычислительные эксперименты показывают следующие результаты: в предфракталах ветви можно с успехом аппроксимировать как тейлоровскими многочленами, так и подходящими цепными дробями; анализ оценок норм остаточных членов приближений отдает предпочтение аппроксимации ветвей предфракталов функциональным цепным дробям (смотри (18), (19)).

Следует так же отметить, что с увеличением числа звеньев предфрактала качество аппроксимаций значительно улучшается.

Выводы

Процесс получения новых дробно-рациональных приближений для функции $y = sh(x)$ на отрезке $[0; \pi/4]$ можно продолжить как угодно далеко. При этом оценки норм остаточных членов приближений значительно уменьшаются, то есть качество аппроксимаций только улучшается.

Библиографический список

1. Хованский А.Н. Приложение цепных дробей и их обобщений к вопросам приближенного анализа. М.: ГИТТЛ, 1956. 204 с.
2. Джоунс В. Трон. Непрерывные дроби. Аналитическая теория и приложения / пер. с англ. М.: Мир, 1985. 414 с.
3. Люстерник Л.А., Червоненкис О.А., Янпольский А.Р. Математический анализ. Вычисление элементарных функций. СМБ. М.: Физматгиз, 1963. 248 с.
4. Корнеев П.К., Гончарова Е.Н., Журавлёва И.А., Непретимова Е.В. Ускорение сходимости степенных и дробно-рациональных разложений, аппроксимирующих тригонометрические и гиперболические функции // Вестник Ставропольского государственного университета. Вып. 63[4], 2009. С. 27-44.
5. Корнеев П.К., Журавлёва И.А., Непретимова Е.В. О разложении функции $\sin x$ в ветвящиеся цепные дроби // Вестник Ставропольского государственного университета. Выпуск 70[5], 2010. С. 11-15.
6. Корнеев П.К., Журавлёва И.А., Непретимова Е.В. Разложение функции $\exp(x)$ в ветвящиеся цепные дроби // Вестник Ставропольского государственного университета. 2011 г. №4. С. 14-20.
7. Корнеев П.К., Журавлева И.А., Кравцов А.М., Непретимова Е.В., Гладков А.В., Фрактальное представление тригонометрических и гиперболических функций как метод получения их новых дробно-рациональных приближений // Нейрокомпьютеры: разработка и применение. № 9, изд-во «Радиотехника». М.: 2014 г. С. 98–102.
8. Кроновер Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах // Основы теории. М.: Постмаркет, 2000. 352 с.

References

1. Hovanskij A.N. Prilozhenie cepnyh drobej i ih obobshhenij k voprosam priblizhennogo analiza (Annex of chain fractions and their generalizations to questions of the approximate analysis). M.: GITTL, 1956. 204 s.
2. Dzhouns V. Tron. Nepreryvnye drobi. Analiticheskaja teorija i prilozhenija (Continuous fractions. Analytical theory and applications.). Per. s angl. M.: Mir, 1985. 414 s.
3. Ljusternik L.A., Chervonenkis O.A., Janpol'sekij A.R. Matematicheskij analiz. Vychislenie jelementarnyh funkcij. SMB (Matematicheskij analysis. Calculation of elementary functions. SMB). M.: Fizmatgiz, 1963. 248 s.
4. Korneev P.K., Goncharova E.N., Zhuravljova I.A., Nepretimova E.V. Uskorenie shodimosti stepennyh i drobnoracional'nyh razlozhenij, approksimirujushhih trigonometricheskie i giperbolicheskie funkcii

(Acceleration of convergence of the sedate and fractional and rational decomposition approximating trigonometrical and hyperbolic functions) // Vestnik Stavropol'skogo gosudarstvennogo universiteta. Vypusk 63[4], 2009. S. 27–44.

5. Korneev P.K., Zhuravljova I.A., Nepretimova E.V.. O razlozhenii funktsii v vetvjashhiesja cepnye drobi (About decomposition of function in the branching chain fractions) // Vestnik Stavropol'skogo gosudarstvennogo universiteta. Vypusk 70[5], 2010. S.11–15.
6. Korneev P.K., Zhuravljova I.A., Nepretimova E.V.. Razlozhenie funktsii $\exp(x)$ v vetvjashhiesja cepnye drobi (Decomposition of the $\exp(x)$ function in the branching chain fractions. Messenger Stavropol state university) // Vestnik Stavropol'skogo gosudarstvennogo universiteta. 2011 g. №4. S. 14-20.
7. Korneev P.K., Zhuravleva I.A., Kravcov A.M., Nepretimova E.V., Gladkov A.V., Fraktal'noe predstavlenie trigonometricheskikh i giperbolicheskikh funktsij kak metod poluchenija ih novyh drobnoratsional'nyh priblizhenij (Fractal representation of trigonometrical and hyperbolic functions as method of receiving their new fractional and rational approximations) // Nejrokompijutery: razrabotka i primenenie, № 9, izd-vo «Radiotekhnika». M.: 2014 g. S. 98–102.
8. Kronover R.M. Fraktaly i haos v dinamicheskikh sistemah. Osnovy teorii (Fractals and chaos in dynamic systems. Theory bases). Moskva: Postmarket, 2000. 352 s.

УДК 517.972:519.633 **Наац И.Э. [Naats I.],**
Наац В.И. [Naats V.I.],
Рыскаленко Р.А. [Riskalenko R.A.],
Ярцева Е.П. [Yartseva E.P.]

ОПЕРАТОРЫ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТИПА В ЗАДАЧАХ ПРИКЛАДНОГО АНАЛИЗА

Operators of potential type in problems of applied analysis

Рассматриваются эмпирические функции, заданные приближенно, например, на основе некоторых измерений наблюдаемого процесса или явления, полученных в эксперименте. Подобные функции часто встречаются в задачах математической физики и соответствующих численных моделях, использующих эти данные. При этом актуальной является задача восстановления или конструирования исходной функции по приближенным данным, которая решается в рамках конструктивной теории функций и теории приближения функций. В работе реализуется подход, согласно которому исследуемые функции представляются так называемыми сингулярными интегралами. В ряде прикладных задач искомым функциям в качестве исходного предположения предписывается необходимость представления в виде интеграла Стильтьеса. Подобные ситуации могут иметь место в теории потенциалов и тех задачах теоретической физики, которые используют интегральные операторы потенциального типа. Подобный подход заметно расширяет содержательную сторону аппарата приближения функций, придавая ему большую эффективность и наглядность в тех задачах, когда приходится «конструировать» модель исследуемой функциональной зависимости по приближенным данным. При этом, те вычислительные схемы, которые связаны с практической реализацией излагаемого метода в приложениях, в ряде случаев могут быть заметно проще и эффективнее тех алгоритмов, которые требуются для реализации интегральных представлений функций на основе сингулярных интегралов. В настоящей работе исследуемая функция представляется в виде интеграла Римана-Стильтьеса, на основе этого представления формулируется соответствующая оптимизационная задача и определяется ее решение. Рассматриваются примеры интегралов представления исследуемой функции и соответствующие схемы вычислений. Исследуются свойства получаемых приближенных решений и их связь со свойствами исходных функций. Излагается техника обобщенного дифференцирования интегралов представления функций, рассматриваются вопросы регуляризации сходимости интегральных операторов обобщенного дифференцирования. Приводится пример конструирования интегралов Стильтьеса на основе заданного множества параметризованных функций, формулируются и доказываются две леммы, определяющих выбор параметров соответствующей вычислительной модели.

Discusses empirical functions that are specified approximately, for example, based on some measurements of the observed process or phenomenon, obtained in the experiment. Such functions are often encountered in problems of mathematical physics and related numerical models that use these data. In this case the current task is the restoration or construction of the original function by an approximate data, which is solved in the constructive theory of functions and theory of approximations of functions. The work implements the approach according to which the studied functions are the so-called singular integrals. In a number of application tasks desired functions as the assumptions it prescribes a representation in the form of a Stieltjes integral. A similar situation can take place in the theory of potentials and the theoretical physics problems that use integral operators of potential type. This approach significantly expands the content side of the apparatus of approximation of functions, giving it greater efficiency and clarity in those tasks when you have to "construct" a model study of the functional dependence on approximate data. In this case, the processing schemes that are associated with the practical implementation of the method set out in applications that in some cases can be much simpler and more efficient algorithms that are required for the implementation of integral representations of functions based on singular integrals. In the present work, the investigated function is in the form of

the integral, Riemann-Stieltjes, on this view, formulate the corresponding optimization problem and defines its solution. Consider examples of integrals of performance of the studied functions and the corresponding computational scheme. We investigate the properties of the resulting approximate solutions and their relationship to the properties of the original functions. Outlines a technique of the generalized differentiation of integrals representations of functions, the issues of regularization convergence of integral operators of generalized differentiation. An example of the construction of Stieltjes integrals based on a given set of parameterized functions are formulated and proved two lemmas that determine the choice of appropriate parameters in the computational model.

Ключевые слова: эмпирическая функция, теория приближения функций, интеграл Римана – Стильеса, задачи прикладного анализа, сингулярные интегралы, операторы обобщенного дифференцирования.

Key words: empirical function, theory of approximation of functions, the integral Riemann – Stieltjes, problems of applied analysis, singular integrals, operators of generalized differentiation.

Введение

Представленная работа продолжает исследования авторов по конструктивной теории функций применительно к задачам восстановления функций по приближенным данным на основе их представления интегралами [1, 2]. Используемый в названии работы термин «прикладной анализ» соответствует той интерпретации его содержательного смысла, которая ему дана в известной монографии К. Ланцоша «Практические методы прикладного анализа» [3]. Основными задачами названной выше теории являются:

- 1) формулировка задач восстановления функциональных зависимостей по соответствующим приближенным данным, включая и эмпирические наблюдения;
- 2) разработка методов конструирования надлежащих аналитических выражений на основе сингулярных интегральных операторов;
- 3) разработка численных методов и алгоритмов для решения прикладных задач теории приближения функций.

Перечисленные выше задачи в той или иной мере последовательно излагаются ниже в данной работе.

Материалы и методы исследований

Остановимся кратко на формулировке решаемой ниже задачи восстановления (конструирования) функции по приближенным данным. Допустим, что исследуется функциональная зависимость величины $Y = \{y : c \leq y \leq d\}$ от величины $X = \{x : a \leq x \leq d\}$ в предположении, что они действительно связаны функционально друг с другом. Последнее обстоятельство фиксируется символом « f » и означает существование функционального отношения « xfy », допускающим совместное изучение пары (X, Y) , где $Y = \{y : A_1 \leq y = f(x) <$

$< A_2\}$ и A_1, A_2 – некоторые постоянные. В пределах настоящей работы предполагается, что система (X, Y) представлена неким дискретным множеством значений $B(f) = \{(x_i, y_i)\}_{i=1}^N$. Удобно считать, что $(x_i, y_i) = (x(t_i), y(t_i))$, где $t_i \in [t_0, T]$, то есть $B(f)$ ассоциируется с неким временным процессом. Подобная ситуация имеет место, когда $B(f)$ состоит из данных натурального эксперимента или является результатом последовательных вычислений. Ясно, что значения x_i и y_i являются приближенными числами. Когда требуется особо подчеркнуть это обстоятельство, будем писать $\tilde{x}_i$ и $\tilde{y}_i$. Известно, что выполнение арифметических операций на множествах приближенных чисел требует определенной осторожности в силу возможной некорректности и неустойчивости операторов решающего алгоритма [4]. Приближенный характер элементов множества $B(f)$ позволяет говорить о неопределенности, вносимой ими в результаты расчетов в процессе восстановления функциональной зависимости f , и требует той или иной оценки достоверности последних. Наиболее простым способом оценить неопределенность в исходных данных и ее влияние на результаты интерпретации следует считать использование так называемых σ – приближений функций, которые ниже будем обозначать через f_σ . В ситуации, когда исследуемые функции $f(x)$ являются в свою очередь элементами нормированных функциональных пространств, ввести $f_\sigma(x)$ ($x \in \Omega_x$) можно, например, с помощью соотношения

$$\|f(x) - f_\sigma(x)\|_{L_2(\Omega_x)} \leq \sigma \|f_\sigma(x)\|_{L_2(\Omega_x)}, \quad (1)$$

где $\sigma > 0$ (достаточно малое число).

В условии (1) нормы $\|f(x)\|_{L_2(\Omega)}$ и $\|f_\sigma(x)\|_{L_2(\Omega)}$ считаются сравнимыми. Последнее означает, что существуют такие два близких числа C_1 и C_2 , что

$$C_1 \|f_\sigma\|_{L_2} < \|f\|_{L_2} < C_2 \|f_\sigma\|_{L_2}. \quad (2)$$

Напомним, что $f_\sigma(x)$ в пределах $\Omega_x = [a, b]$ считается известной (суммируемой) функцией при задании B_σ и, стало быть, $\|f_\sigma\|_{L_2(\Omega)}$ в принципе можно вычислить. Напомним, что восстановление функции $f(x)$ на Ω_x по ее σ – приближению $f_\sigma(x)$ в определенной степени может рассматриваться как задача теории приближения функций в рамках определенного аналитического аппарата. В частности, речь может идти о равномерном приближении функций степенными и тригонометрическими полиномами. Разумеется, что эти аппараты приближения в полной мере не исчерпывают того содержания, которое в принципе может ассоциироваться с понятием «восстановления» исследуемой функциональной зависимости, о чем подробнее речь пойдет ниже.

В пределах настоящей работы исходим из возможности представления исследуемой функции $f(x)$ в виде интеграла

$$\int_{\Omega_y} K(x, y)g(y)dy = f(x, g), \quad (3)$$

где $g \in G \subseteq C_\Sigma(\Omega)$ и $K(x, y)$ ядро интегрального оператора K ($(Kg)(x) = f(x, g)$).

В рамках этого предположения требуется решить оптимизационную задачу типа

$$\inf_{g \in G} \|f(x, g) - f(x)\|_{L_2(\Omega)} = \|f(x, g^*) - f(x)\|_{L_2(\Omega)} \leq \varepsilon \|f\|_{L_2(\Omega)}, \quad (4)$$

где $\varepsilon > 0$ и достаточно мало.

Решением оптимизационной задачи (4) является вспомогательная функция $g^*(y)$ из функционального класса G , и соответственно восстановление $f(x)$ на Ω_x осуществляется с помощью функции вида $(Kg^*)(x) = f^*(x)$. Критерием приемлемости подобного (аппроксимационного) подхода к определению $f(x)$ в форме интеграла (3) является соотношение

$$\frac{\|f^* - f\|_{L_2}}{\|f^*\|_{L_2}} < \varepsilon. \quad (5)$$

Вопросы выбора ядра $K(x, y)$ в интеграле представления (3), а также надлежащего функционального класса G , в пределах которого находится элемент, минимизирующий функционал $[f(x, g) - f(x)]$, должны увязываться с теми или иными особенностями решаемой прикладной задачи.

Результаты исследований и их обсуждение

Примеры интегралов представления исследуемой функции и соответствующие схемы вычислений

Будем рассматривать интеграл представления для исследуемой функции $f(x)$ в виде интеграла Римана – Стильтьеса вида

$$\int_{\Omega_y} T_\beta(x, y)dP(y) = f_\beta(x, P), \quad (6)$$

где ядром является функция

$$T_\beta(x, y) = \frac{1}{|x - y|^\beta}, \quad 0 < \beta < 1, \quad (7a)$$

либо

$$T_\mu(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{|x - y|} & \text{при } |x - y| \geq \mu > 0, \\ C\mu & \text{при } |x - y| < \mu. \end{cases} \quad (7b)$$

В выражении (6) $P(y)$ называется интегрирующей функцией. Ясно, что в данном примере речь идет о прикладных задачах теории потенциала и каких-либо обоснований практической значимости модели (6) (тоже $f_\mu(x, P)$) не требуется. Исходя из того, что $f(x)$ представлена своим σ – приближением, оптимизационная задача представляется в виде

$$\inf_{P \in \mathfrak{S}} \|f_\sigma(x) - f_\beta(x, P)\|_{L_2} = \|f_\sigma - f_\beta(P^*)\|_{L_2}. \quad (8)$$

Решение P^* можно считать приемлемым, если удовлетворяется условие

$$\frac{\|f_\sigma - f_\beta^*\|_{L_2}}{\|f_\sigma\|_{L_2}} \leq \sigma. \quad (9)$$

В рамках аппроксимационного подхода к задаче восстановления функции $f(x)$ по σ – приближению $f_\sigma(x)$ важным является следующее утверждение 1.

Утверждение 1. При выполнении (9) удовлетворяется условие

$$\frac{\|f - f_\beta^*\|_{L_2}}{\|f\|_{L_2}} \leq \sigma. \quad (10)$$

При доказательстве этого утверждения можно исходить из неравенства (1) и соотношения (2), в котором $C_1 = 1 - \sigma$ и $C_2 = 1 + \sigma$. Используются также аксиомы норм и метрик, индуцируемых последними. Вычислительные алгоритмы строятся с учетом того обстоятельства, что исходные данные о функции $f(x)$ представлены множеством $B_\sigma(N, f) = \{(x_i, f_{\sigma,i})\}_{i=1}^N$. Интеграл в (6), как известно, представляется с учетом данного обстоятельства интегральной суммой вида

$$S_m(x, P) = \sum_{l=1}^m T_\mu(x, \xi_l) \Delta_l P, \quad (11)$$

где $y_{l-1} \leq \xi_l \leq y_l$, $\Delta_l P = P(y_l) - P(y_{l-1})$ и $\{y_l\}_{l=0}^m$ – некое разбиение отрезка $\Omega = [a, b]$ ($m \leq M$). В этой ситуации, обозначая $\vec{f}_\sigma = \{f_{\sigma,k}\}_{k=1}^K$ и $\vec{S}_m(P) = \{S_m(x_k, P)\}_{k=1}^K$, ($K \leq N$), приходим к конечномерному варианту оптимизационной задачи для квадратичной формы $\rho(\vec{f}_\sigma, \vec{S}(P)) = \|\vec{f}_\sigma - \vec{S}(P)\|_{L_2^{(K)}}$ относительно вектора $\vec{P} \in \mathfrak{S}_m$ с компонентами $P(y_l)$ ($l = 1 \dots m$). Окончательным решением задачи восстановления $f(x)$ в рамках изложенного подхода является

непрерывная функция $S_m(x, P^*) = \sum_{l=1}^m T_\mu(x, \zeta_l) \Delta_l P^*$. Численные методы и алгоритмы решения подобных задач теории приближения функций на основе их представления интегралами Стильтьеса подробно изложены в работах автора [1, 2].

В соответствии с изложенной выше теорией восстановления функций по $B_N(f)$ определяющую роль играют линейные функционалы вида $f_\beta(x, P)$ (тоже $f_\mu(x, P)$) ассоциированными с интегралами Римана–Стильтьеса (6). Напомним, что при $\beta = 1$ и $\mu = 0$ последние становятся сингулярными (особая точка в нуле) и требуют использования способов регуляризации их сходимости. Условия $\beta \in (0, 1)$ и $\mu > 0$ вполне достаточны для построения устойчивых квадратурных процессов в приложениях. Функционалы $f_\beta(x, P)$ и $f_\mu(x, P)$ решают задачу построения приближения $f_\beta(x, P^*)$ и $f_\mu(x, P^*)$ для исследуемой функции $f(x)$ как непрерывной и ограниченной по переменной $x \in \Omega$. В этом смысле их можно считать аналитическими (расчетными) моделями $f(x)$.

Рассмотренный выше вариант интегралов представления далеко не единственный. В частности, в рамках теории интегрирования Стильтьеса может быть рассмотрен случай (3), а именно

$$f(x, g) = \int_{\Omega_y} T_\beta(x, y) g(y) d\varphi(y), \quad (12)$$

где $g \in G \subseteq C_\Sigma(\Omega_y)$ и интегрирующая функция $\varphi(y)$ считается заданной в пределах области интегрирования Ω_y . Элемент $g^*(y)$, минимизирующий уклонение $\rho(f_\sigma, f(g)) = \|f_\sigma - f(g)\|_{L_2}$ на G , определяется теми же численными методами, о которых говорилось выше. Можно лишь заметить, что теперь помимо методов оптимизации (неявный способ обращения интеграла представления (12)) можно использовать и методы обобщенной инверсии интегральных операторов [5].

Схема вычислений примерно выглядит следующим образом. Обозначим через T_φ оператор, соответствующий интегралу (12) ($T_\varphi: g \rightarrow f(g)$, $g \in G$). Тогда g^* должно удовлетворять интегральному уравнению первого рода вида $T_\varphi g \equiv f_\sigma$. Обобщенный (регуляризирующий) обратный оператор можно записать в явной форме, а именно

$$T_\alpha^{-1} = (T_\varphi^* T_\varphi + \alpha I)^{-1} T_\varphi^*, \quad (13)$$

где $\alpha(\sigma) > 0$ ($\alpha(\sigma) \rightarrow 0$ где $\sigma \rightarrow 0$) –

так называемый параметр регуляризации [6]. Эти построения приводят нас к аппроксимационному функционалу $f_\varphi(x, g^*)$. В дальнейшем в целях упрощения записи аналитических выражений будем писать $f^*(x)$ вместо $f(x, g^*, \varphi)$ и $f(x, \varphi^*)$. Ясно, что поскольку определение $f^*(x)$ методами обобщенной инверсии интегралов представления осуществляется на основе данных $f(N, f)$, то $f^*(x)$ в той или иной мере наследует свойства $f(x)$. Ко-

нечно, ответить на вопрос какие это свойства и в какой мере о них можно судить, весьма затруднительно. Это предмет конструктивной теории функций [7]. Ниже ограничимся лишь качественным анализом основных свойств $f^*(x)$ в рамках изложенного выше подхода и их возможной связи с аналитическими свойствами исследуемой функции $f(x)$.

Качественный анализ основных свойств $f^*(x)$ и их возможной связи с аналитическими свойствами исследуемой функции $f(x)$

В последующем анализе исходим прежде всего из того факта, что $f^*(x)$ и $f(x)$ достаточно (в пределах точности возможных вычислений во всяком случае) близки друг к другу. Последнее следует из соотношения

$$\frac{\|f - f^*\|}{\|f^*\|} < \varepsilon(\sigma), \quad (14)$$

где ε – достаточно малое число ($\varepsilon(\sigma) \rightarrow 0$ где $\sigma \rightarrow 0$, $N \rightarrow \infty$).

Если представляется возможным говорить о сходимости $\|f - f^*\| \rightarrow 0$, то это только в среднем на Ω_x и о поточечном сопоставлении $f^*(x)$ и $f(x)$ конечно, речи быть не может. Можно говорить лишь о таких свойствах этих функций, как характер непрерывности, значении полной вариации функций в пределах Ω_x , выпуклость и т.п.

Исследуем прежде всего свойство непрерывности $f(x, \varphi)$ по переменной $x \in \Omega_x$ исходя из представления

$$f(x, \varphi) = \int_{|x-y| \geq \mu} T(x, y) d\varphi(y), \quad (15)$$

где $x, y \in R_1 = (0, \infty)$.

В принципе, без ограничения общности, можно считать, что ядро $T(x, y) \equiv 0$ в области $|x - y| < \mu$, что обычно и допускается в теории операторов потенциального типа. Вместе с тем следует заметить, что при решении вычислительных задач и прежде всего в случае привлечения методов вычислительного эксперимента, предпочтительно исходить из параметризованной модели (более «мягкой» как принято говорить), а именно

$$f(x, \varphi) = \int_{\mu}^{x-\mu} \frac{d\varphi(y)}{x-y} + \int_{x+\mu}^{\infty} \frac{d\varphi(y)}{y-x} + \frac{1}{2\mu} \int_{x-\mu}^{x+\mu} d\varphi(y). \quad (16)$$

В этом представлении величина μ ($\mu > 0$) играет роль неопределенного параметра, конкретное значение которого выбирается надлежащим образом в прикладных задачах. Выбор подобных параметров следует отнести к методам качественного анализа, опирающегося в большей мере на вычислительный эксперимент.

Напомним, что непрерывность функционала $f(x, \varphi)$ по переменной x требует выполнения условия $|f(x_2, \varphi) - f(x_1, \varphi)| < \varepsilon$ всякий раз, когда $|x_2 - x_1| < \delta$. С учетом (15) это приводит к необходимости доказать неравенство

$$|f(x_2, \varphi) - f(x_1, \varphi)| \leq \int_{|x-y| \geq \mu} |T(x_2, y) - T(x_1, y)| d\varphi(y) < \varepsilon \quad (17)$$

при $|x_2 - x_1| < \delta$. При доказательстве (17) исходим из того, что интегрирующая функция $\varphi(y)$ удовлетворяет условию

$$0 < \varphi(y) \leq 1 \quad \forall y \in (0, \infty). \quad (18)$$

Методы построения подобных функций будут рассмотрены ниже. Пока лишь заметим, что φ – интегрируемость в теории интегрирования Стильеса прямо связана с φ – измеримостью функций, что и гарантируется на основе (18) как будет показано далее. Очевидно следующее равенство

$$|T(x_2, y) - T(x_1, y)| = \left| \frac{1}{x_2 - y} - \frac{1}{x_1 - y} \right| = \frac{|x_2 - x_1|}{|(x_1 - y)^2 + (x_2 - x_1)(x_1 - y)|}. \quad (19)$$

Учитывая наличие ограничения $|x - x| \geq \mu$, приходим к неравенству

$$|f(x_2, \varphi) - f(x_1, \varphi)| \leq \frac{|x_2 - x_1|}{2\mu^2}, \quad \mu > 0. \quad (20)$$

Ясно, что условие $|x_2 - x_1| \rightarrow 0$ имеет смысл лишь при учете процесса $\mu \rightarrow 0$. В противном случае говорить о непрерывности $f(x, \varphi)$ не представляется возможным. Нетрудно видеть, что отношение $|x_2 - x_1|/\mu^2$ останется ограниченным при $|x_2 - x_1| \rightarrow 0$ и $\mu \rightarrow 0$ только в том случае, если наложить ограничение $|x_2 - x_1| < \mu^2$ при $\mu \rightarrow 0$. Поскольку $\mu \ll 1$, то $\mu^3 < \mu^2$ и, следовательно, можно принять условие $|x_2 - x_1| < \mu^3$. Тогда $\mu = |x_2 - x_1|^{1/3}$ и указанное выше отношение примет значение

$$\frac{|x_2 - x_1|}{\mu^2} < \frac{|x_2 - x_1|}{|x_2 - x_1|^{1/3}} = |x_2 - x_1|^{2/3}. \quad (21)$$

Полученный результат можно сформулировать в виде следующего утверждения 2.

Утверждение 2. Функции $f(x, \varphi)$, определенные сингулярным интегралом (15), удовлетворяют условию Гёльдера с показателем γ , то есть

$$|f(x_2, \varphi) - f(x_1, \varphi)| \leq M |x_2 - x_1|^\gamma, \quad (22)$$

где $\gamma \in (0, 1/2)$ и $M = 1/2$. Подобные функции считаются непрерывными по Гёльдеру, если

$$|f| = \sup_{x, y \in E} \frac{|f(x) - f(y)|}{|x - y|^\gamma} < \infty. \quad (23)$$

Известно, что совокупность подобных функций с нормой (23) образует B – пространство, играющее важную роль в изучении некоторых сингулярных интегральных операторов, появляющихся, в частности, в теории дифференциальных уравнений [8]. Свойство функций $f(x, \varphi)$ быть «непрерывными» по Гёльдеру в принципе можно распространить и на $f(x)$ в силу их взаимной близости в соответствии с критерием (14) при $\varphi = \varphi^*$. Конечно, подобное допущение следует считать «мягким» (нечетким), оставляя выбор значения показателя γ в пределах $(0, 1/2)$ открытым.

Несколько подобных замечаний можно сделать и относительно свойств $f(x, g)$, представленной выше интегралом (12). Поскольку $T_\beta(|x - y|) \rightarrow 0$ при $|x - y| \rightarrow \infty$, то можно указать некую окрестность вблизи диагонали $y = x$ такую, что

$$\int_0^\infty T_\beta(x, y) g(y) d\varphi(y) \cong \int_{\delta_y(x, \varepsilon)} T_\beta(x, y) g(y) d\varphi(y) + O(\varepsilon), \quad (24)$$

где $\delta_y(x, \varepsilon) = \{y : |x - y|^{-\beta} > \varepsilon\}$ и $\varepsilon > 0$.

Нетрудно построить явное выражение для оценки размеров области интегрирования. Имеем

$$\delta_y(x, \varepsilon) = \left(x - \sqrt[\beta]{\varepsilon} \leq y \leq x + \sqrt[\beta]{\varepsilon} \right). \quad (25)$$

Подобные соотношения указывают на то важное обстоятельство, что усредняющий (сглаживающий) эффект интегрирования в левой части (24) на подынтегральное выражение по существу ограничивается малой окрестностью точки x на вещественной оси, в пределах которой ядро $T_\beta(x, y)$ принимает свои наибольшие значения. Последнее означает, что поведение $f_\beta(x, g)$ как функции точки x определяется поведением функции $g(y)$ в области $\delta_y(x, \varepsilon)$ (25).

В свою очередь $g(y) = (T_\alpha^{-1} f_\sigma)(y)$ в рамках изложенного выше подхода к аппроксимации на $B_\sigma(f, N)$. Зависимость $g^*(y)$ от σ – приближения $f_\sigma(x)$ с учетом эффекта локализации интегралов представления (24) предопределяет в конечном итоге функциональную связь аппроксимирующих функций (функционалов) $f(x, g)$ с исходными $f(x)$. Соответствующие числовые характеристики подобной взаимозависимости могут быть получены в вычислительных экспериментах при решении конкретных прикладных задач. Требуемое при этом программное обеспечение включает в себя квадратуры для вычисления сингулярных интегралов и методы обобщенной инверсии интегральных операторов (интегральных уравнений). Численные методы решения подобных задач описывались ранее авторами в работах [5, 9].

Заметим, что подобное программное обеспечение может быть использовано и при решении дифференциальных уравнений с приближенными данными. В этой ситуации считается, что исследуемая функция $f(x)$ представлена операторным уравнением $L_q f \approx S_\sigma$, где L_q – дифференциальный оператор с вектором коэффициентов q и приближенной правой частью S_σ . Если $f(x)$ искать в форме (12), то вспомогательная функция $g(y)$ будет определяться как решение интегрального уравнения вида $K_q g = S_\sigma$. Ясно, что, как и выше $g^*(y) = K_{q, \alpha}^{-1} S_\sigma$ и аппроксимационный функционал принимает вид $f(x, g^*) = f^*(x)$. Остается напомнить, что в этом подходе найденные решения $f^*(x)$ зависят от интегрирующей функции $\varphi(y)$, параметров модели (β, μ) и параметров (α, σ) , связанных с приближенным заданием исходных данных и в значительной степени определяющих устойчивость решающих алгоритмов. Вопросы, связанные с выбором указанных параметров излагались в работах автора [10].

Метод обобщенного дифференцирования интегралов представления функций, регуляризация сходимости интегральных операторов обобщенного дифференцирования

В связи с указанным выше возможным применением интегралов представления следует сделать несколько замечаний, касающихся техники их дифференцирования по переменной $x \in \Omega_x$. Речь идет о дифферен-

цировании функций вида $f(x, g, \varphi)$. Поскольку функции типа $f(x, g, \varphi)$ и $f(x, g)$ в пределах настоящего исследования являются непрерывными по Гёльдеру, то применение к ним методов обычного (поточечного) дифференцирования более, чем затруднительно. В этой ситуации требуется построение так называемых операторов обобщенного дифференцирования, реализуемых как некие интегральные операторы. Условно говоря, речь идет о технике дифференцирования на основе операций интегрирования. Численные методы и решающие алгоритмы применительно к задачам прикладного анализа изложены в работах авторов [1, 2, 5, 9]. Ясно, что если исследуемые функции представляются интегралами Стильтьеса, то есть в основу положено свойство их φ – интегрируемости, возможны определенные модификации в аппарате обобщенного дифференцирования, которые и описываются ниже. Изложение техники дифференцирования функций $f(x, g, \varphi)$ и $f(x, g)$ естественно начать с введения разностного оператора D_h , определяемого формулой

$$(D_h f)(x) = \frac{f(x+h) - f(x-h)}{2h}. \quad (26)$$

Вопрос существования предела $(D_h f)(x)$ при $h \rightarrow 0$ в каждой точке $x \in \Omega_x$ остается открытым для функций $f(x, g) = (T_\varphi g)(x)$ и $f(x, g) = (T\varphi)(x)$. Поскольку указанные функции ограничены в пределах Ω_x , то формально оператор D_h к ним применим при условии $h > 0$. В соответствии с тем, что говорилось выше о соотношении между параметрами h и μ в качестве определения «производных» для $f(x, g)$ можно полагать

$$(D_\mu f)(x) = \sup_{h \geq \mu} (D_h (T_\varphi g))(x). \quad (27)$$

Ясно, что в вычислительном отношении подобный подход весьма сложен и навряд ли может быть оправданным с практической точки зрения. Совсем другое дело, если бы оператор D_h мог быть внесен под знак интеграла и операция «дифференцирования» осуществлялась вычислением интеграла $((D_h T_\varphi)g)(x)$ с ядром $1/2h [T(x+h, y) - T(x-h, y)]$. Поскольку подобный интеграл будет расходящимся, необходимо решить вопрос о его регуляризации путем надлежащего выбора соотношений между параметрами h и μ , определяющих оператор D_h в (27). С этой целью рассмотрим интеграл

$$\int_{|x-y| \geq \mu} \frac{1}{2h} [T(x+h, y) - T(x-h, y)] d\varphi(y). \quad (28)$$

Поскольку

$$\frac{1}{2h} [T(x+h, y) - T(x-h, y)] = \frac{1}{(x-y+h)(x-y-h)},$$

то

$$\left| \int_{|x-y| \geq \mu} \frac{1}{2h} [T(x+h, y) - T(x-h, y)] d\varphi \right| \leq \frac{1}{|\mu^2 - h^2|} \int_{\Omega_y} d\varphi(y). \quad (29)$$

Ясно, что для регуляризации сходимости подобного сингулярного интеграла простого соотношения $h \geq \mu$, как это имело место выше в случае (19), уже недостаточно и необходимы более жесткие ограничения. Один из вариантов их построения может основываться на надлежащем выборе интегрирующих функций $\varphi(y)$, используемых в исходном интеграле представления. Если говорить более определенно, то предлагается ввести в рассмотрение специальные параметризованные подмножества функций $\{\varphi_\tau(y)\}$, где $0 < \tau \leq d$ с последующим «оптимальным» выбором значений параметра τ . Относительно того, что говорилось выше о регуляризации интеграла (29) подобная оптимальность может быть связана с его ограниченностью при малых h для всякой пары (x, τ) . Соответствующие приемы подобной регуляризации сходимости интегралов представления и их обобщенных обратных рассматривались подробно в работах авторов [2, 9], и касались в основном, интегралов Римана. Для интегралов Стильеса можно указать определенные особенности соответствующей регуляризации интегральных операторов обобщенного дифференцирования.

Остается заметить, что необходимость введения в математическую задачу параметризованных семейств функций (последовательностей) определяется, как правило, их некорректностью, ведущей к расходимости решающих алгоритмов. Вносимая при этом в задачу неопределенность разрешается далее в заключительных операторах алгоритмов за счет надлежащего доопределения условий задачи априорными допущениями и числовыми критериями.

При выборе $\{\varphi_\tau(y)\}$ исходим из того, что любая функция этой последовательности помимо зависимости от переменной y , должна быть счетно-аддитивной функцией элементарных интервалов $\Delta_l y = [y_{l-1}, y_l]$, связанных с измельчением $Y = \{y_l\}_{l=1}^m$ области интегрирования Ω_y в интегралах представления для $f(u)$. Последнее гарантирует корректное построение интегральных сумм вида (11) для интегралов Стильеса (12). В связи с последним сделаем некоторые предварительные замечания. Напомним, что всякий интеграл можно рассматривать как функционал от области интегрирования (тоже функцию множества) Ω . В связи с этим для интеграла Стильеса можно писать

$$\int_{\Omega} d\varphi(y) = I(\Omega, \varphi). \quad (30)$$

Если $\Omega = [a, b]$, то $I(\Omega, \varphi) = \varphi(b) - \varphi(a) = |[a, b]|_{\varphi}$, где через $|\Omega|_{\varphi}$ обозначена так называемая φ – мера области интегрирования Ω . При построении интегральных сумм типа (11) требуется знать расчетные значения φ – мер элементарных интегралов $\Delta_l (1, 2, \dots, m)$, покрывающих область интегрирования $\Omega_y = \bigcup_{l=1}^m \Delta_l$ для измельчения $Y = \{y_l\}_{l=1}^m$. Ясно, что

$$|\Delta_l|_\varphi = \llbracket y_{l-1}, y_l \rrbracket_\varphi = \varphi(y_l) - \varphi(y_{l-1}) = \Delta_l \varphi \quad (31)$$

В правой части символ $\Delta_l \varphi$ следует понимать как результат действия разностного оператора Δ в точке $y = y_l$ на функцию $\varphi(y)$.

Выводы

Пример конструирования интегралов Стильеса на основе параметризованных множеств функций

Для того чтобы последующее изложение методов конструирования интегралов Стильеса (12) на основе параметризованных множеств функций $\{\varphi_\tau(y)\}$ ($\tau > 0$) было более наглядным, в качестве примера рассмотрим функциональную последовательность вида

$$\varphi_n(x) = \frac{1}{\pi} \left[\arctg \left(n \frac{x-a}{d} \right) + \arctg \left(n \frac{b-x}{d} \right) \right], \quad (32)$$

где $l = 1, 2, \dots$ и $d > 0$ – некий числовой параметр.

Подобные последовательности возникают в приложениях сингулярных интегралов функций в прикладном анализе [3]. Свойства последовательности (32) могут быть охарактеризованы следующими предельными соотношениями.

Лемма 1. Для любого $x \in (a, b)$ $\varphi_n(x)$ удовлетворяет условиям

$$\begin{aligned} a) \lim_{n \rightarrow \infty} \varphi_n(x) &= 1, \\ б) \lim_{n \rightarrow \infty} \int_\Omega \varphi_n(x) dx &= |\Omega_x|, \\ в) \lim_{n \rightarrow \infty} |\varphi_n(x+h) - \varphi_n(x)| &= 0 \quad (h > 0). \end{aligned} \quad (33)$$

Доказательство. Докажем справедливость этих соотношений. Первое из них очевидно в силу того, что $\lim_{x \rightarrow \infty} \arctg(x) = \pi/2$.

Доказательство б) основывается на прямом вычислении интеграла при данном n . Имеем

$$\int_a^b \varphi_n(x) dx = \frac{2}{\pi} \left[(b-a) \cdot \arctg \left(n \cdot \frac{b-a}{d} \right) + \frac{d}{n} \ln \left(\frac{dn}{\sqrt{d^2 + n^2(b-a)^2}} \right) \right]. \quad (34)$$

Положим, что $d = |\Omega_x| = (b - a)$, поскольку d – произвольная константа в (32). Выражение (34) в этом случае упрощается и принимает вид

$$\int_a^b \varphi_n(x) dx = |\Omega_x| \cdot \frac{2}{\pi} \left[\arctg(n) + \frac{1}{2n} \ln \frac{n}{n^2 + 1} \right]. \quad (35)$$

Учитывая, что $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{n} \ln \frac{1}{n} \right) = 0$ и $\lim_{n \rightarrow \infty} \arctg(n) = \frac{\pi}{2}$ в пределе (33) дает требуемый результат.

К доказательству последнего предельного соотношения в (33) вернемся ниже, а пока рассмотрим некоторые свойства последовательности $\{\varphi_n(x)\}_{n=1}^{\infty}$, важные с точки зрения теории интегрирования по Стильтесу (φ – интегрируемость функций). Нетрудно видеть, что $\varphi_n(x)$ можно представить в виде суммы двух компонент $\varphi_{n,1}(x) = \pi^{-1} \arctg\left(n \frac{x-a}{d}\right)$ и $\varphi_{n,2}(x) = \pi^{-1} \arctg\left(n \frac{b-x}{d}\right)$, из которых первая не убывает в Ω_x при $x \rightarrow b$, а вторая нигде не возрастает. Подобные свойства составляющих $\varphi_{n,1}(x)$ и $\varphi_{n,2}(x)$ позволяют классифицировать $\varphi_n(x)$ как функцию ограниченной вариации в области своего определения Ω . То, что $\varphi_n(x) \in B \vee (\Omega)$ делает последовательность интегралов вида $\{ \int f(x) d\varphi_n \}_{n=1}^N$ сходящейся для всякой φ – суммируемой функции $f(x)$. Последнее следует из теории интегрирования Стильтеса. Последовательность $\{\varphi_n(x)\}_{n=1}^{\infty}$ нетрудно преобразовать в параметризованное семейство функций $\{\varphi_{\tau}(x)\}$ ($0 < \tau \leq d$) путем введения в (32) параметра $\tau = d/n$ (обратно $n = d/\tau$). В результате (32) преобразуется, принимая вид

$$\varphi_{\tau}(x) = \frac{1}{\pi} \left[\arctg\left(\frac{x-a}{\tau}\right) + \arctg\left(\frac{b-x}{\tau}\right) \right]. \quad (36)$$

Представление (36) удобно при использовании в задачах представления функций оптимизационных алгоритмов. В итоге этих построений интегральные суммы для моделей (6) и (12) примут вид

$$S_m(x, \bar{\xi}, Y) = \sum_{l=1}^m T(x, \xi_l) \Delta_l \varphi_{\tau}, \quad (37a)$$

$$S_m(x, \bar{\xi}, g, Y) = \sum_{l=1}^m T(x, \xi_l) g(\xi_l) \Delta_l \varphi_{\tau}, \quad (37b)$$

где Y – измельчение Ω_y системой узлов $\{y_l\}_{l=1}^m$ и $y_{l-1} \leq \xi_l \leq y_l$.
В этих выражениях с учетом (36)

$$\begin{aligned} \Delta_l \varphi_{\tau} &= \varphi_{\tau}(y_l) - \varphi_{\tau}(y_{l-1}) = \\ &= \frac{1}{\pi} \left[\arctg\left(\frac{y_l - a}{\tau}\right) + \arctg\left(\frac{b - y_l}{\tau}\right) - \arctg\left(\frac{y_{l-1} - a}{\tau}\right) - \arctg\left(\frac{b - y_{l-1}}{\tau}\right) \right] \end{aligned} \quad (38)$$

Если узлы y_l , $(l = 1, \dots, m)$ равноотстоящие, то есть $y_l - y_{l-1} = h$ для всех l , то можно использовать для расчета формулу

$$\Delta_h \varphi_\tau(y_l) = \frac{1}{\pi} \left[\left(\operatorname{arctg} \left(\frac{y_l - a}{\tau} \right) - \operatorname{arctg} \left(\frac{y_l - a - h}{\tau} \right) \right) + \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{b - y_l}{\tau} \right) - \operatorname{arctg} \left(\frac{b - y_l + h}{\tau} \right) \right) \right] \quad (39)$$

где $a < y_l < b$, $l = 2, \dots, (m - 1)$.

Теперь третье предельное соотношение в (33) можно рассматривать в виде

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} |\Delta_h \varphi_\tau(y_l)| = 0. \quad (40)$$

Для доказательства его справедливости преобразуем (39), используя известное тождество

$$\operatorname{arctg} x - \operatorname{arctg} y = \operatorname{arctg} \frac{x - y}{1 + xy} \text{ при } xy > -1.$$

Поскольку $y_l \in (a, b)$ для всех l , то указанное ограничение всегда выполнимо ($x > 0$ и $y > 0$). В итоге получаем формулу

$$\Delta_h \varphi_\tau(y_l) = \frac{1}{\pi} \left[\operatorname{arctg} \frac{h\tau}{\tau^2 + (y_l - a)(y_l - a - h)} - \operatorname{arctg} \frac{h\tau}{\tau^2 + (b - y_l)(b - y_l + h)} \right]. \quad (41)$$

Ясно, что для всех y_l , удовлетворяющих условиям $(y_l - a)(y_l - a - h) \neq 0$, $(b - y_l)(b - y_l + h) \neq 0$, $\lim_{\tau \rightarrow 0} |\Delta_h \varphi_\tau(y_l)| = 0$ для всех $h > 0$. Подобное ограничение вполне приемлемо, ибо в концевых точках разностный оператор Δ_h просто не определен.

В вычислительных задачах с использованием так называемых сеточных моделей (тоже измельчений Y) требуется вводить приемы, именуемые методами фиктивных точек [10]. То обстоятельство, что имеет место соотношение (40), можно рассматривать как способ «управления» процессом сходимости интегральных сумм (37) при $h \rightarrow 0$ ($m \rightarrow \infty$). Речь идет прежде всего о надлежащем выборе значений параметра τ (тоже интегрирующей функции $\varphi_\tau(y)$) при конструировании аппаратов представления исследуемых функций $f(x)$ в виде функционалов $((Td\varphi_\tau)g)(x)$. В практическом отношении речь может идти о построении прежде всего подходящей функциональной зависимости параметров h и τ (тоже функции $h(\tau)$ такой, что $h(\tau) \rightarrow 0$ при $\tau \rightarrow 0$). Последнее особенно важно в тех приложениях, когда требуется не только восстанавливать исследуемые функции, но и оценивать их обобщенные производные. В частности, оператор D_h в выражении $D_h((Td\varphi_\tau)g)(x)$ может быть заменен на

оператор $D_{h(\tau)}$, который в отличие от исходного допускает его подведение под знак интеграла. В итоге получаем вычислительную схему вида $((D_{h(\tau)}T)g)(x)$, реализуемую соответствующим квадратурным процессом.

Выбор параметров модели h и τ для аппроксимационных функционалов типа $f_\beta(x, g, \varphi_\tau) = ((T_\beta d\varphi_\tau)g)(x)$ в окончательном виде требует надлежащего вычислительного эксперимента для решаемой задачи, допускающей использование каких-либо внешних ограничений на функции и операторы. Вместе с тем, используя аппарат анализа, связанный с теорией приближений функций $f(x)$ интегралами представления типа $f_\beta(x, g, \varphi_\tau)$, можно доказать справедливость следующей леммы 2.

Лемма 2. В случае восстановления функции $f(x)$ на Ω_x , представленной своим σ – приближением $f_\sigma(x)$, имеет место следующее соотношение для параметров модели $((T_\beta d\varphi_\tau)g)(x)$

$$\mu(\sigma) < h < \sqrt[\beta]{\tau}. \quad (42)$$

Это соотношение можно в расчетах использовать в форме

$$C_1 \mu \leq h \leq C_2 \sqrt[\beta]{\tau}, \quad (43)$$

где константы C_1 и C_2 подбираются в вычислительном эксперименте.

Остается напомнить, что численные методы, позволяющие строить вычислительные схемы, реализующие изложенную выше теорию приближения функций (и их производных) по приближенным данным представлены в ранее опубликованных работах авторов [1, 2, 5, 9].

Библиографический список

1. Наац И.Э. Методы приближения суммируемых функций на основе интеграла Стильтьеса применительно к задачам прикладного анализа / И.Э. Наац, Е.П. Ярцева // Наука. Инновации. Технологии: Научный журнал Северо-Кавказского федерального университета. Ставрополь, 2016. № 1. С. 33–46.
2. Наац В.И. Метод численного обращения интегрального уравнения с оператором в форме интеграла Лебега-Стильтьеса / В.И. Наац, Е.П. Ярцева // Наука сегодня: постулаты прошлого и современные теории как механизм эффективного развития в условиях кризиса: сборник научных статей по итогам Международной научно-практической конференции (25–26 марта). Санкт-Петербург, 2016. С. 86–91.

3. Ланцош, К. Практические методы прикладного анализа / К. Ланцош. М.: Физматлит, 1961. 524 с.
4. Мак-Кракен Д., Дорн У. Численные методы и программирование на фортране / Д. Мак-Кракен, У. Дорн. М.: Мир, 1977. 584 с.
5. Наац И.Э. Вычислительная модель для дифференциального уравнения с эмпирическими функциями на основе интегрального уравнения Фредгольма первого рода / И.Э. Наац, В.И. Наац, Р.А. Рыскаленко // Наука. Инновации. Технологии: Научный журнал Северо-Кавказского федерального университета. 2016. № 2. С. 37–48.
6. Тихонов, А.Н. Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. М., 1979. 288 с.
7. Натансон, И.П. Конструктивная теория функций / И.П. Натансон. М.: Физматлит, 1949. 526 с.
8. Данфорд Н. Линейные операторы: общая теория / Н. Данфорд, Дж. Т. Шварц. М.: Изд-во иностранной литературы, 1962. 427 с.
9. Наац И.Э. Построение обобщенных производных для суммируемых функций на основе их сингулярных интегралов и исследование регуляризации их сходимости / И.Э. Наац, В.И. Наац, Е.П. Ярцева // Естественные и технические науки в современном мире: сборник научных статей по итогам XII Международной научно-практической конференции (г. Москва, 10 февраля 2017г.). М.: Научный журнал «CHRONOS», 2017. С. 54–62.
10. Наац И.Э. Математические модели и численные методы в задачах экологического мониторинга атмосферы / И.Э. Наац, В.И. Наац. М.: Физматлит, 2010. 327 с.

References

1. Naats I.Je. Metody priblizhenija summiruemyh funkcij na osnove integrala Stilt'esa primenitel'no k zadacham prikladnogo analiza (On the Methods of approximation of integrable functions based on the Stieltjes integral with respect to the tasks applied analysis) / I.Je. Naats, E.P. Jarceva // Nauka. Innovacii. Tehnologii: Nauchnyj zhurnal Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta. Stavropol', 2016. № 1. S. 33–46.
2. Naats V.I. Metod chislennogo obrashhenija integral'nogo uravnenija s operatorom v forme integrala Lebega-Stilt'esa (Method of numerical treatment of integral equations with operators the form of an integral of the Lebesgue-Stieltjes) / V.I. Naats, E.P. Jarceva // Nauka segodnja: postulaty proshlogo i sovremennye teorii kak mehanizm jeffektivnogo razvitiya v uslovijah krizisa: sbornik nauchnyh statej po itogam Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii (25-26 marta). Sankt-Peterburg, 2016. S. 86–91.
3. Lancosh, K. Prakticheskie metody prikladnogo analiza (Practical methods of applied analysis) / K. Lancosh. M.: Fizmatlit, 1961. 524 s.
4. Mak-Kraken D., Dorn U. Chislennye metody i programmirovaniye na fort-rane (Numerical methods and programming in Fortran) / D. Mak-Kraken, U. Dorn. M.: Mir, 1977. 584 s.

5. Naats I.Je. Vychislitel'naja model' dlja differencial'nogo uravnenija s jem-piricheskimi funkcijami na osnove integral'nogo uravnenija Fredgol'ma pervogo roda (A computational model for a differential equation with empirical functions on the basis of the integral Fredholm equation of the first kind) / I.Je. Naats, V.I. Naats, R.A. Ryskalenko // Nauka. Innovacii. Tehnologii: Nauchnyj zhurnal Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta. Stavropol', 2016. № 2. S. 37–48.
6. Tihonov, A.N. Metody reshenija nekorrektnyh zadach (Methods of solving ill-posed problems) / A.N. Tihonov, V.Ja. Arsenin. M., 1979. 288 s.
7. Natanson, I.P. Konstruktivnaja teorija funkcij (Constructive function theory) / I.P. Natanson. – M.: Fizmatlit, 1949. 526 s.
8. N. Danford. Linejnye operatory: obshhaja teorija (Linear operators: General theory) / N. Danford, Dzh. T. Shvarc. M.: Izd-vo inostranoj literatury, 1962. 427 s.
9. Naats I.Je. Postroenie obobshhennyh proizvodnyh dlja summiruemymykh funk-cij na osnove ih singuljarnyh integralov i issledovanie reguljarizacii ih sho-dimosti (On the Construction of generalized derivatives for integrable functions based on their singular integrals and the study of regularization of their convergence) / I.Je. Naats, V.I. Naats, E.P. Jarceva // Estestvennye i tehnicheckie nauki v sovremennom mire: sbornik nauch-nyh statej po itogam XII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii (g. Mos-kva, 10 fevralja 2017g.). M.: Nauchnyj zhurnal «CHRONOS», 2017. S. 54–62.
10. Naats I.Je. Matematicheskie modeli i chislennye metody v zadachah jekologicheskogo monitoringa atmosfery (On the Mathematical models and numerical methods in problems of ecological monitoring of the atmosphere) / I.Je. Naats, V.I. Naats. M.: Fizmatlit, 2010. 327 s.

УДК 004.5+612.06

Туровский Я.А. [Turovsky Ya.A.],
Борзунов С.В. [Borzunov S.V.],
Алексеев А.В. [Alekseev A.V.],
Болдырев С.В. [Boldyrev S.V.]

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО КАНАЛА ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В ОКУЛОГРАФИЧЕСКИХ И НЕЙРО- КОМПЬЮТЕРНЫХ ИНТЕРФЕЙСАХ

**Modeling of the additional channel of feedback
in eye-tracking and neuro-computer interfaces**

В работе проведен анализ особенностей применения дополнительного канала связи компьютер-человек в рамках нейрокомпьютерного (мозг-компьютер) и окулографического интерфейсов. Разработана математическая модель функционирования данного канала и его влияния на принятие решений пользователем, учитывающая изменение точности определения сгенерированной пользователем команды в зависимости от времени анализа процесса. В основу модели положен подход, согласно которому при получении информации о характере обработки сигналов программно-аппаратной частью интерфейса, пользователем может осуществлять изменение своего состояния, влияющего на дальнейшую обработку результатов. Проведено численное моделирование для нейрокомпьютерных и окулографических интерфейсов, рассчитаны значения диапазонов времени, в течение которых предъявление информации о результатах предварительной классификации команд пользователя может обеспечить улучшение результатов работы. Полученные результаты позволяют оптимизировать использование разработанных технологий дополнительного канала коммуникации человек-компьютер в аспекте увеличения скорости их работы.

The paper analyzes the features of the application of the additional computer-human communication channel within the neurocomputer (brain-computer) and oculographic interfaces. A mathematical model of the functioning of this channel and its influence on the decision making by the user, taking into account the change in the accuracy of the definition of the user-generated command, depending on the time of the process analysis, is developed. The model is based on the approach according to which when receiving information about the nature of signal processing by the hardware and software part of the interface, the user can change his state, which influences the further processing of the results. Numerical modeling for neurocomputer and oculographic interfaces was carried out, the values of the time ranges during which the presentation of information on the results of the preliminary classification of the user's commands can provide an improvement in the results of work. The obtained results allow to optimize the use of the developed technologies of the additional human-computer communication channel in the aspect of increasing the speed of their work.

Ключевые слова: интерфейсы мозг-компьютер, окулографические интерфейсы.

Key words: brain-computer interfaces, eye-tracking interfaces.

Введение

Развитие информационных технологий (ИТ) в сочетании с достижениями нейронаук привело в последние десятилетия к появлению нового вида интерфейсов человек-компьютер, реализованных на иных при-

нциях управления, чем клавиатура, джойстик, мышь и подобные манипуляторы. К представителям таких интерфейсов можно отнести интерфейсы мозг-компьютер (нейрокомпьютерные интерфейсы – НКИ), где управляющие устройства сигналы регистрируются непосредственно с мозга в качестве электрической активности, оптических феноменов или МРТ-ответа [1, 2], и окулографические интерфейсы (ОИ), где командами становятся направления взгляда и/или движения зрачка [3, 4]. Учитывая значительный потенциал данных интерфейсов в плане быстроты их реакции в ответ на сгенерированные пользователем команды, интуитивности управления и возможностей восстановления для людей с ограниченными возможностями, над данной тематикой работает большое число научных групп.

Тем не менее, до сих пор скорость работы и окулографических и нейрокомпьютерных интерфейсов уступает в скорости, точности и эргономичности уже существующим интерфейсам на основе клавиатуры и мыши. Таким образом, актуальным стал поиск новых подходов для совершенствования окулографических и нейрокомпьютерных интерфейсов и воплощения их теоретических возможностей в практических программно-аппаратных решениях. В настоящее время можно отметить несколько направлений этих работ.

Во-первых, это поиск новых физиологических феноменов в плане выявления сигналов мозга или движения глаз, которые могут быть использованы как команды управления для внешних устройств (компьютеры, самоходные шасси, летательные аппараты и т.д.), сигналы о наличии ошибок в распознавании и т.д.

Во-вторых, разработка новых методов обработки данных с мозга, которые позволят из уже существующих данных выделить новую информацию или же новых устойчивых и точных алгоритмов выделения на видеоизображении глаз и зрачка пользователя.

В-третьих, гибридизация интеллекта компьютера и человека с целью обеспечения при недостаточной пропускной способности канала человек-компьютер реакцию последнего, воспроизводящую характерные паттерны поведения пользователя без его непосредственных команд.

Паллиативным методом увеличения скорости работы указанных выше интерфейсов является изменение, например, их графической части обеспечивающей большую, за счёт оптимального расположения визуальных «кнопок», скорость передачи данных. Ещё одним из вариантов яв-

ляется формирование дополнительного канала связи [4] компьютер-человек, по которому пользователю сообщаются данные о характере работы НКИ и ОИ. В частности – результаты текущей обработки команд пользователя. Таким образом, пользователь видит, насколько успешно или неуспешно идёт обработка информации о тех его физиологических состояниях, которые служат командами. Видя это, пользователь получает возможность изменять свои текущие физиологическое состояние в желательную сторону, повышая точность работы интерфейса. Следовательно, актуальным является моделирование работы НКИ и ОИ в условиях наличия дополнительного канала коммуникации компьютер-человек.

Целью исследования является моделирование работы НКИ и ОИ в условиях наличия дополнительного канала коммуникации компьютер-человек с учётом различных параметров точности работы интерфейсов в плане распознавания команд пользователя.

Материалы и методы исследования

Рассмотрим модель работы НКИ и ОИ в условиях наличия дополнительного канала связи компьютер-человек. На первом этапе смоделируем ситуацию работы интерфейса человек-компьютер. Одним из параметров этой работы будет являться функция вероятности распознавания интерфейсом команд пользователя. Очевидно, что по мере роста времени t , в течение которого происходит оценка анализируемого в качестве команды паттерна (например значений ЭЭГ, или положения зрачка), нарастает точность распознавания данной команды. Далее, при продолжении роста времени накопления команды, точность её распознавания снижается в силу объективных физиологических причин: утомление и снижение внимания пользователя, необходимость реагировать на новые события и т.д. Однако, поскольку это время достаточно велико, факт снижения точности распознавания можно игнорировать. Итак, предположим, что вероятность правильного распознавания $f_{\text{баз}}$ монотонно изменяется со временем t по закону

$$f_{\text{баз}}(t) = \frac{e^{\alpha t}}{(1 - p_0) / p_0 + e^{\alpha t}}, \quad (1)$$

где $p_0 = f_{\text{баз}}(0)$ – вероятность правильного распознавания в начальный момент времени,

$\alpha > 0$ – параметр, отвечающий за скорость изменения функции (чем больше α , тем больше скорость роста $f_{\text{баз}}(t)$ с ростом t).

Под временем мы в дальнейшем будем понимать номер дискретного отсчёта сигнала, зарегистрированного тем или иным прибором. В момент времени t_1 (рис. 1), пользователь получает информацию о результате акта распознавания сигнала, после чего пользователь может изменить со-

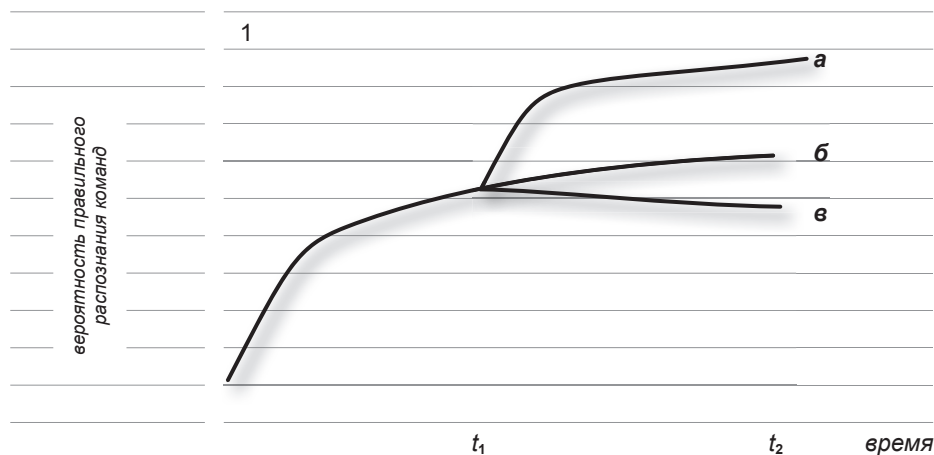


Рис. 1. Траектории вероятностей в условиях дополнительной информации для пользователя о ходе работы ОИ или НКИ.

стояние или остаться в прежнем (другими словами, в данный момент времени происходит трифуркация возможных состояний пользователя).

Из рис 3. видно, что *а* – вариант при котором пользователь изменяет своё состояние в момент времени t_1 так, что повышает вероятность правильного распознавания команд, *б* – оставляет своё состояние без изменений, *в* – изменяет своё состояние в момент времени t_1 так, что повышает вероятность правильного распознавания команд. Изменение состояния приведёт к тому, что вероятность распознавания может повыситься — она станет определяться функцией $f_+(t)$ (вариант *а*), или понизиться — произойдёт переход на функцию $f_-(t)$ (вариант *в*) или остаться без изменений — $f_{\text{баз}}(t)$ (вариант *б*). Вероятности перечисленных событий равны p_+ , p_- и p_0 соответственно в случае верного распознавания при $t = t_1$ и p'_+ , p'_- и p'_0 в случае неверного. Отметим, что в период времени t_1 интерфейс не принимает окончательного решения относительно выбора команды сгенерированной пользователем. Пользователю только сообщается текущий (промежуточный) результат обработки данных интерфейсом.

Далее в момент времени $t = t_2$ ещё раз происходит выбор. Этот выбор является окончательным – интерфейс принимает решение относительно того, какая именно команда была сгенерирована пользователем и, соответственно, какую надлежит исполнять.

Подмножество пространства событий, приводящих к правильному распознаванию, состоит из 6 точек:

1. $f_{\bar{\alpha}3}(t_1)p_+f_+(t_2)$ — правильное распознавание в t_1 и в t_2 после повышения вероятности;
2. $f_{\bar{\alpha}3}(t_1)p_0f_{\bar{\alpha}3}(t_2)$ — правильное распознавание в t_1 и в t_2 без изменения;
3. $f_{\bar{\alpha}3}(t_1)p_-f_-(t_2)$ — правильное распознавание в t_1 и в t_2 после уменьшения вероятности;
4. $(1 - f_{\bar{\alpha}3}(t_1))p_+'f_+(t_2)$ — неправильное распознавание в t_1 и правильное в t_2 после повышения вероятности;
5. $(1 - f_{\bar{\alpha}3}(t_1))p_0'f_{\bar{\alpha}3}(t_2)$ — неправильное распознавание в t_1 и правильное в t_2 без изменения;
6. $(1 - f_{\bar{\alpha}3}(t_1))p_-'f_-(t_2)$ — неправильное распознавание в t_1 и правильное в t_2 после уменьшения вероятности.

Получаем, что вероятность распознавания увеличилась по сравнению с базовым случаем в Q раз, где

$$Q = [f_{\bar{\alpha}3}(t_1)p_+f_+(t_2) + f_{\bar{\alpha}3}(t_1)p_0f_{\bar{\alpha}3}(t_2) + f_{\bar{\alpha}3}(t_1)p_-f_-(t_2) + (1 - f_{\bar{\alpha}3}(t_1))p_+'f_+(t_2) + (1 - f_{\bar{\alpha}3}(t_1))p_0'f_{\bar{\alpha}3}(t_2) + (1 - f_{\bar{\alpha}3}(t_1))p_-'f_-(t_2)] / f_{\bar{\alpha}3}(t_2) \quad (2)$$

Преобразуем полученное выражение:

$$Q = (f_{\bar{\alpha}3}(t_1)/f_{\bar{\alpha}3}(t_2)) [p_+f_+(t_2) + p_0f_{\bar{\alpha}3}(t_2) + p_-f_-(t_2)] + (1 - f_{\bar{\alpha}3}(t_1)/f_{\bar{\alpha}3}(t_2)) [(p_+'f_+(t_2) + p_0'f_{\bar{\alpha}3}(t_2) + p_-'f_-(t_2))] \quad (3)$$

Для получения удобной аналитической оценки величины Q введём предположение: вероятности перехода в точке трифуркации не зависят от результата $p_+ = p_+'$, $p_- = p_-'$ и $p_0 = p_0'$, тогда получим

$$Q = p_0 + \frac{p_+f_+(t_2) + p_-f_-(t_2)}{f_{\bar{\alpha}3}(t_2)} \quad (4)$$

Используя условие сохранения полной вероятности $p_+ + p_0 + p_- = 1$, приведём Q к виду:

$$Q = 1 + p_+ \frac{f_+(t_2) - f_{\bar{\alpha}3}(t_2)}{f_{\bar{\alpha}3}(t_2)} + p_- \frac{f_-(t_2) - f_{\bar{\alpha}3}(t_2)}{f_{\bar{\alpha}3}(t_2)} \quad (5)$$

Отношение вероятностей в новом и базовом случае превышает единицу (т.е. даёт улучшение распознавания при выборе команд интерфейсом) если

$$p_+(f_+(t_2) - f_{\text{баз}}(t_2)) > p_-(f_{\text{баз}}(t_2) - f_-(t_2)) \quad (6)$$

Таким образом, получен достаточный признак для определения применимости метода. Превышение, после трифуркации значений f_+ взвешенное на p_+ должно быть больше превышения базовой вероятности над f_- взятое с весом p_- . В этом случае новый метод с большей вероятностью приводит к правильному распознаванию интерфейсом сигнала или паттерна, сгенерированного пользователем.

Из (6) следует, что модель показывает возможности увеличения скорости работы интерфейсов только при условии, что $\alpha_+ > \alpha_{\text{баз}} t_{\text{баз}}$, где $t_{\text{баз}}$ показывает время измерения вероятностей распознавания команд на основе базисной функции. Именно в этом случае возможно улучшение вероятности распознавания интерфейсом команд пользователя при изменении его состояния в момент времени t_1 .

Результаты исследования и их обсуждение

Численное моделирование работы НКИ в условиях наличия дополнительного канала связи компьютер человек

Рассмотрим ситуации, возникающие при работе НКИ, учитывающие в зависимости от времени t_1 необходимость обеспечивать те или иные вероятности перехода от $f_{\text{баз}}(t_1)$ к $f_-(t_1)$ или же к $f_+(t_1)$. Для приближения к реальным показателям работы интерфейсов примем для НКИ и ОИ дискретное время с шагом в 0,1 сек.

Таким образом, для НКИ, распознающего 6 команд, значения функции согласно (1) будут $p_0 = 0,167$, $\alpha_{\text{баз}}$ от 0,02 до 0,2 (рис. 2а). Для ОИ, имеющего лучшие параметры скорости работы и распознавания команд для 6 команд примем $p_0 = 0,167$, $\alpha_{\text{баз}}$ от 0,08 до 0,9 (рис. 2б).

Рассмотрим условие $\alpha_+ > \alpha_{\text{баз}} t_{\text{баз}}$ применительно к НКИ. Очевидно, что мы имеем два ограничения по времени. С одной стороны, пользователю требуется некоторое время для того, чтобы осознать передаваемому по каналу компьютер-человек. С другой, если изменение состояния пользователя произойдёт через слишком большое время, то сложится ситуация, при которой функция $f_+(t)$, даже имея значительно большую скорость роста, всё равно будет уступать по своим значениям функции $f_{\text{баз}}(t)$, делая, таким образом, принципиально невозможным улучшить показатели работы НКИ. Рассмотрим

возможные диапазоны применимости параметра α_+ при условии изменения параметров $\alpha_{\text{баз}}$ и t_1 (рис. 3). Обратим внимание на то, что временной порог осознания стимула находится в районе 100 мс [5]. Очевидно, что если момент времени t_1 информация о текущем решении по выбору команд программно аппаратной частью интерфейса будет визуализирована для пользователя, то к данным рисунка 3, необходимо учесть ещё ~100 мс на процесс осознания пользователем полученных данных. Добавим дополнительное условие, согласно которому в любой точке от t_1 до t_2 $f_{\text{баз}} < f_+(t_1)$.

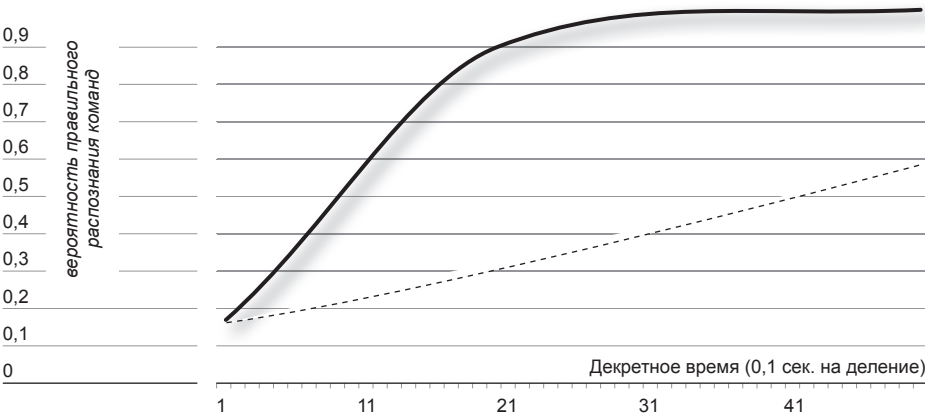


Рис. 2а. Исследуемый диапазон вероятностей в зависимости от времени для НКИ.

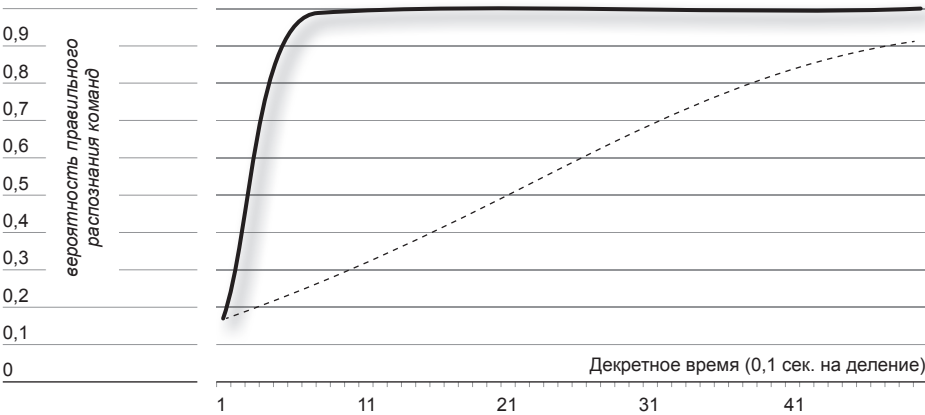


Рис. 2б. Исследуемый диапазон вероятностей в зависимости от времени для ОИ.

Итак, из рис. 3 следует, что ниже указанных кривых условие $\alpha_+ > \alpha_{\text{баз}} t_{\text{баз}}$ выполняется, а следовательно, например для $\alpha_{\text{баз}} = 0,02$ и $\alpha_+ = 0,6$ пользователь должен изменить своё состояние, зная данные предварительной работы раньше чем через три секунды от начала работы НКИ над обработкой новой команды. Учитывая время осознания стимула ясно, что интерфейс должен по графическому каналу сообщить пользователю информацию о предварительном выборе раньше, чем 2,9 сек. Из рис.3 следует, что начиная с $\alpha_{\text{баз}} = 0.13$ функция улучшения распознавания сигналов пользователя имеющая $\alpha_+ = 0,4$ уже не может быть эффективна ни на каком отрезке времени.

Практическую ценность представляют не столько параметры α сколько значения вероятности точного распознавания паттернов мозговой активности пользователя для определения возможных временных диапазонов предъявления предварительных данных работы НКИ. Для этого на рис.3 был введён параметр $p(0,8)$ как отражающий время в течении которого $f_{\text{баз}}(t)$ обеспечивает 80% вероятность распознавания паттерна мозговой активности пользователя при заданном α . Полученные результаты интерпретируются следующим образом. Если эмпирически получено, что, например, через 3 секунды обработки паттернов мозговой активности пользователя имеется 80% точность распознавания генерируемых им команд; при том, что на более коротких отрезках времени этот результат будет меньше, а на длинных больше, то в качестве параметра модели можно взять $\alpha_{\text{баз}} = 0,1$.

Очевидно, что если пользователь способен изменить своё «ментальное» состояние таким образом, чтобы повысить вероятность распознавания команд, то информацию о предварительных результатах работы программно

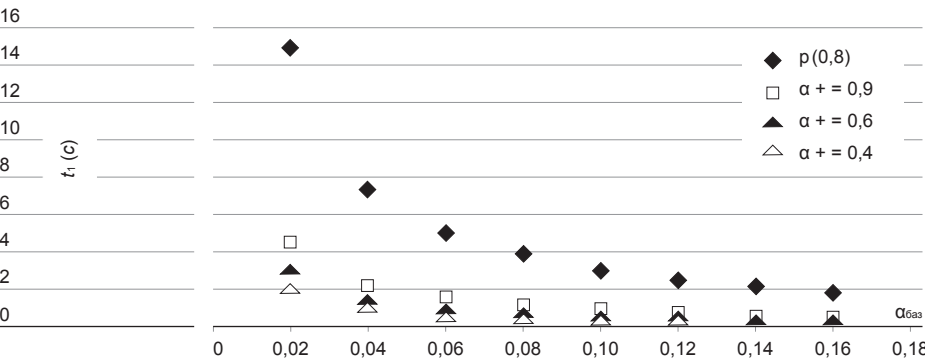


Рис. 3. Зависимость между параметром функции распознавания команд НКИ для 6 вариантов абаз и временем принятия предварительного решения интерфейсом, ранее которого необходимо сообщить пользователю о результатах предварительной классификации его состоянии программно-аппаратной частью НКИ.

аппаратного комплекса пользователю необходимо сообщить, раньше чем 0,9 секунды от начала обработки паттернов его мозговой активности. Причем 0,9 сек выбрано в том случае, если эмпирически установлено, что в новом «ментальном» состоянии [6], например, при значительной концентрации внимания, имеющиеся программно аппаратные решения обеспечивают 80% точность распознавания команд пользователя через 0,4 секунды. Таким образом, полученные данные позволяют, используя эмпирические результаты работы разных типов НКИ, определить потенциальную эффективность дополнительного канала связи компьютер-человек и, следовательно, оценить необходимость и возможность реализации дополнительного канала коммуникации человек-компьютер применительно к задачам НКИ.

Численное моделирование работы ОИ в условиях наличия дополнительного канала связи компьютер-человек

В отличие от НКИ, моделирование ОИ имеет свою специфику, связанную с итерационным процессом управления. Действительно, в случае НКИ информация о предварительной интерпретации тех или иных команд поступает к пользователю однократно. Второй раз результат работы программно-аппаратной части НКИ пользователь видит уже тогда, когда управляемое устройство выполняет ту или иную команду. В случае же ОИ пользователь видит метку-курсор, соответствующую положению его зрачка. Следовательно, изменяя направление взгляда, пользователь видит ответную реакцию ОИ и тем самым может вновь, в рамках очередной итерации, модифицировать своё поведение. При данном подходе для моделирования удобнее использовать концепцию «цепочек команд» [7] вида

$$\xi_1(n+1) \Rightarrow \xi_2(n+2) \Rightarrow \xi_3(n+3) \Rightarrow \dots \Rightarrow \xi_\lambda(n+\lambda).$$

Иными словами, если существует и уже выполнена команда ξ_1 в момент дискретного времени $(n+1)$, то, следовательно, возможно выполнение команды $\xi_2(n+2)$ при условии её существования, а при выполнении команды $\xi_2(n+2)$ возможно выполнение следующей команды $\xi_3(n+3)$ при условии её существования и т. д. Однако, в отличие от [7] в этом случае под командой подразумевается не завершённый «квант поведения» [8], а интерпретация текущего положения зрачка программно-аппаратной частью ОИ. При этом, если маркер-курсор перемещается в нужную пользователю сторону, то команда воспринимается как успешная, в противном случае как ошибочная. Таким образом, на рис.2б изображена итоговая функция оценки вероятности правильного распознавания команд при перемещении зрачка. Учтем, что в видеоокулографических интерфейсах одним из лимитирующих факторов скорости их работы является частота кадров фиксируемых видеокамерой.

Применительно к нашим задачам [3] частота считывания кадров не превышала 20 Гц и, следовательно, ОИ не может изменять положения маркера-курсора с большей частотой. Используя рисунок 3 можно получить те же результаты, что и при управлении посредством НКИ, однако, значительный интерес представляют те диапазоны функций $f(t)$ которые показывают высокую скорость работы окулографического интерфейса, превышающие таковую у НКИ ($\alpha_{\text{баз}} > 0,2$, что даёт 80% точность распознавания команд уже через 0,4 с). Результаты моделирования представлены в таблице 1.

Таблица 1. РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ВРЕМЕНИ ПРЕДЪЯВЛЕНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЮ ИНФОРМАЦИИ ПО КАНАЛУ СВЯЗИ КОМПЬЮТЕР-ЧЕЛОВЕК

$\alpha_{\text{баз}}$	$p(0,8)$	$\alpha +$	
		2,5	1,5
0,9	0,4	—	—
0,7	0,5	0,1	—
0,5	0,6	0,2	0,3
0,3	1	0,3	0,25
0,1	3	1	1

Из таблицы 1 видно, что при высокой скорости классификации $\alpha_{\text{баз}} > 0,7$ отсутствуют возможности для использования дополнительного канала компьютер человек, сообщаящий пользователю о предварительных данных распознавания команд интерфейсом. Высокая скорость распознавания команд интерфейсом снимает необходимость в дополнительном канале информации человек-компьютер. В то же время относительно низкие значения $\alpha_{\text{баз}} < 0,1$ позволяют, в целом, использовать дополнительный канал коммуникации, при этом информация пользователю будет сообщаться в течение времени меньше чем 0,3 сек от начала распознавания команды программно-аппаратной частью интерфейсу. Таким образом, применение дополнительного канала для ОИ хотя и носит ограничения в плане времени предъявления стимулов пользователю, тем не менее, может быть использовано и для интерфейсов с большой скоростью работы.

Выводы

В работе проведен анализ особенностей применения дополнительного канала связи компьютер-человек в рамках нейрокомпьютерного (мозг-компьютер) и окулографического интерфейсов. Разработана математическая модель функционирования данного канала и его влияния на принятие решений пользователем, учитывающая изменение точности опре-

деления сгенерированной пользователем команды в зависимости от времени анализа процесса. Проведено численное моделирование для нейрокомпьютерных и окулографических интерфейсов, рассчитаны значения диапазонов времени, в течение которых предъявление информации о результатах предварительной классификации команд пользователя может обеспечить улучшение результатов работы. Полученные результаты позволяют оптимизировать использование разработанных технологий дополнительного канала коммуникации человек-компьютер в аспекте увеличения скорости их работы.

Библиографический список

1. Schalk G., McFarland D.J., Hinterberger T., Birbaumer N., Wolpaw J.R. BCI2000: A general-purpose brain-computer interface (BCI) system // IEEE Transactions On Biomedical Engineering. 2004. vol. 51. Pp. 1034–1043.
2. Nicolas-Alonso L.F., Gomez-Gil J. Brain Computer Interfaces, a Review // Sensors (Basel). 2012. 12(2): 1211–1279.
3. Туровский Я.А., Кургалин С.Д., Алексеев А.В. Анализ движения глаз человека при управлении самоходным шасси с использованием системы видеоокулографического интерфейса // Сенсорные системы. 2017. №1. С. 51–58.
4. Туровский Я.А., Кургалин С.Д., Вахтин А.А., Борзунов С.В., Алексеев А.В. Информационные потоки при формировании дополнительного канала обратной связи для интерфейса мозг-компьютер // Технологии живых систем. 2016. Т. 13. № 7. С. 34–40.
5. Костандов Э.А. Психофизиология сознания и бессознательно. СПб.: Питер, 2004.
6. Перекрытие крупномасштабных сетей головного мозга человека, регистрируемых фМРТ в состоянии покоя и при выполнении ментальных задач / В.М. Верхлютов, П.А. Соколов, В.Л. Ушаков, Б.М. Величковский. Когнитивная наука в Москве: новые исследования : материалы конференции / под ред. Е.В. Печенковой, М.В. Фаликман. 2015. С. 59–61.
7. Оценка скорости работы нейрокомпьютерного интерфейса, реализованного с использованием гибридного интеллекта / Я.А. Туровский, С.Д. Кургалин, С.В. Борзунов // Биомедицинская радиоэлектроника. 2015. № 3. С. 61–70.
8. Системные механизмы поведения / под ред. К.В. Судакова. М: 1990, 240 с.

References

1. Schalk G., McFarland D.J., Hinterberger T., Birbaumer N., Wolpaw J.R. BCI2000: A general-purpose brain-computer interface (BCI) system // IEEE Transactions On Biomedical Engineering. 2004. vol. 51. Pp. 1034–1043.

2. Nicolas-Alonso L.F., Gomez-Gil J. Brain Computer Interfaces, a Review // *Sensors* (Basel). 2012. 12 (2): 1211–1279.
3. Turovskij Ja.A., Kurgalin S.D., Alekseev A.V. Analiz dvizhenija glaz cheloveka pri upravlenii samohodnym shassi s ispol'zovaniem sistemy videookulograficheskogo interfejsa (Analysis of the movement of the human eye during the control of the self-propelled chassis using the video-oculographic interface system) // *Sensornye sistemy*. 2017. No1. S. 51–58.
4. Turovskij Ja.A., Kurgalin S.D., Vahtin A.A., Borzunov S.V., Alekseev A.V. Informacionnye potoki pri formirovanii dopolnitel'nogo kanala obratnoj svyazi dlja interfejsa mozg-komp'yuter (Information flows during the formation of an additional feedback channel for the brain-computer interface) // *Tehnologii zhivyh sistem*. 2016. T. 13. No 7. S. 34–40.
5. Kostandov Je.A. Psihofiziologija soznaniya i bessoznatel'nogo (Psychophysiology of consciousness and the unconscious). SPb.: Piter, 2004.
6. Perekrytie krupnomasshtabnyh setej golovnogogo mozga cheloveka, registriruemyh fmrt v sostojanii pokoja i pri vypolnenii mental'nyh zadach (Overlapping large-scale networks of the human brain, recorded fmrt at rest and in the performance of mental tasks) / V.M. Verhljutov, P.A. Sokolov, V.L. Ushakov, B.M. Velichkovskij. Kognitivnaja nauka v Moskve: novye issledovaniya : materialy konferencii / pod red. E.V. Pechenkovoj, M.V. Falikman. 2015. S. 59–61.
7. Ocenka skorosti raboty nejrokomp'yuternogo interfejsa, realizovanogo s ispol'zovaniem gibridnogo intellekta (Estimation of the speed of operation of the neurocomputer interface realized with the use of hybrid intelligence) / Ja.A. Turovskij, S.D. Kurgalin, S.V. Borzunov // *Biomedicinskaja radioelektronika*. 2015. No 3. S. 61–70.
8. Sistemnye mehanizmy povedenija (Systemic mechanisms of behavior) / pod red. K.V. Sudakova. M: 1990, 240 s.

УДК 004.315

Червяков Н.И. [Chervyakov N.I],
Ляхов П.А. [Lyakhov P.A.],
Калита Д.И. [Kalita D.I.],
Васькина А.В. [Vaskina A.V.]

ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ФИЛЬТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ВЫЧИСЛЕНИЯМИ В СИСТЕМЕ ОСТАТОЧНЫХ КЛАССОВ

**Numerical implementation
of the image filtering method with computations
in Residue Number System**

В статье предлагается численное решение задачи цифровой фильтрации изображения с применением системы остаточных классов вместо известной двоичной арифметики. Обосновывается, что применение непозиционной системы остаточных классов позволит увеличить скорость и снизить энергопотребление приложений цифровой обработки изображений в оттенках серого. Анализируются известные схемы, на основе которых происходит процесс фильтрации изображений. Обосновывается неэффективность применения известных схем, связанная с возможностью возникновения ошибок из-за переполнения динамического диапазона СОК. Приводится новая схема процесса преобразований фильтрации, которая позволяет получать корректные результаты цифровой обработки, не зависящие от размера обрабатываемого цифрового изображения и маски фильтра. Полученные результаты, могут быть использованы при построении специализированных систем цифровой обработки изображений с низким энергопотреблением и высокой скоростью работы.

In this paper a numerical solution of the problem of digital image filtering with the use of the Residue Number System (RNS) instead of the known binary arithmetic proposes. It is substantiated that the application of the non-position RNS will allow increasing the speed and reducing power consumption of digital image processing applications. Analyzed known schemes, based on which the process of image filtration occurs. The inefficiency of the application of known schemes is substantiated, connected with the possibility of errors due to the overflow of the dynamic range of the RNS. A new scheme of the filtration transformation process is given, which allows obtaining correct results of digital processing, independent of the size of the digital image being processed and the filter mask. The obtained results can be used in the construction of specialized digital image processing systems with low power consumption and high speed of operation.

Ключевые слова: цифровая обработка изображений, цифровые фильтры, фильтр Лапласа, система остаточных классов, набор модулей

Key words: digital image processing, digital filter, Laplace filter, residue number system, module set.

Введение

Цифровая обработка изображений имеет широкий спектр применения в различных областях науки и техники, таких как, машинное зрение, медицина, спутниковая связь, военное и охранное дело, автоматический контроль продукции сельского хозяйства [1], графическое и мультимедийное искусство [2] и т.д. Разработанные приложения цифровой обработки изображений, которые используются в перечисленных областях, должны обладать,

с одной стороны, простотой аппаратной реализации, низким энергопотреблением системы, высокой скоростью обработки информации и высоким уровнем безопасности [3], и с другой стороны, использовать математические методы обработки, которые приведут к улучшению визуального качества изображения, которое получается в ходе обработки [4].

Поскольку основным инструментом цифровой обработки являются цифровые фильтры, то в связи с этим идет активный поиск новых эффективных методов цифровой обработки изображений, которые базируются на разных численных методах и алгоритмах [5]. Применение таких методов позволит уменьшить потребляемую мощность и увеличить скорость обработки данных в приложениях цифровой обработки изображений. Система остаточных классов (СОК) является перспективным инструментом в решении обозначенных задач. Благодаря свойству параллельного выполнения операций СОК может быть эффективно использована в приложениях с преобладающей долей операций сложения, вычитания и умножения [6]. Одним из таких приложений является цифровая обработка изображений, в частности цифровая фильтрация [4].

В данной статье будет показана численная реализация процесса фильтрации на конкретном фрагменте изображения. Рассмотрены известные схемы преобразователей, использующихся в обработке, а также предложена новая, которая позволяет получать корректные результаты обработки.

Материалы и методы

1. Введение в цифровую обработку изображений

Цифровую фильтрацию определяет используемый в процессе цифровой фильтр. Говоря о процессе цифровой фильтрации (обработки) изображений следует отметить, что в данном случае цифровой фильтр позволяет накладывать на изображение различные эффекты, например: размытие, резкость, деформация, шум и т. д. При этом под цифровым фильтром понимается математический алгоритм обработки изображения. Большая группа цифровых фильтров имеет один и тот же алгоритм вычислений, но эффект, накладываемый фильтром на изображение, зависит от коэффициентов, используемых в алгоритме [5]. Чаще всего в процессе цифровой обработки изображений используют фильтры с конечной импульсной характеристикой, основанные на теории линейных систем и применении двумерных сверток.

Под сверткой понимается способ представления какого-либо векторного значения скалярным значением. Применительно к обработке изображений векторное значение представляет собой цвет группы пикселей, а скалярное значение, получаемое на основе свертки, представляет собой цвет пикселя, получаемого в результате применения к исходному изображению какого-либо эффекта.

Обработка изображения с применением такого рода фильтров описывается следующей формулой [2]:

$$C_{new}[i][j] = \sum_{k=0}^m \sum_{l=0}^n a_{k,l} C_{old} \left[i - \frac{m}{2} \right] \left[j - \frac{n}{2} \right] \quad (1)$$

где m и n – это константы фильтра, которые задают двумерный размер фильтра;
 a – коэффициенты фильтра, определяющие тот эффект, который накладывает фильтр.

Таким образом, чтобы применить фильтр к изображению необходимо провести вычисления для каждого из значений пикселей. При этом, каждый из пикселей рассматривается вместе с матрицей, центральным элементом которой он является. Перемножаем соответствующие значения двух матриц и их сумму присваиваем рассматриваемой точке.

В данной статье будем рассматривать изображение в оттенках серого. В таком формате изображение представляет собой прямоугольный массив целых чисел (пикселей). Количество уровней серого являются целыми степенями 2, то есть пиксель представляет яркость или темноту [2, 4]. Таким образом, чем больше число, кодирующее пиксель, тем ярче изображение в этой точке. В стандартных приложениях обработки изображений величины пикселей изображения в оттенках серого кодируются 8-битными числами и находятся в диапазоне [0,255] причем 0 обозначает черный цвет, 255 белый цвет. Если в результате обработки изображения получается отрицательное число, то оно заменяется на 0 (черный цвет). В случае получения числа, большего чем 255, оно заменяется на 255 (белый цвет). На рисунке 1 схематически представлен принцип отображения чисел в цвет пикселя изображения в оттенках серого.

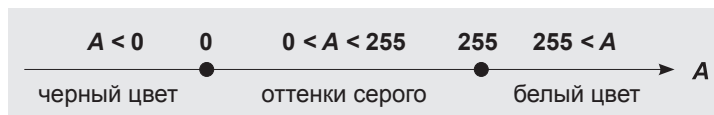


Рисунок 1. Зависимость цветности пикселя, представленного в оттенках серого, от величины кодового числа.

В качестве иллюстративного примера работы фильтра рассмотрим фильтр Лапласа для повышения резкости, который также будем использовать в дальнейшем для численных расчетов. Пример маски фильтра Лапласа представляет собой матрицу вида:

$$[a_{k,l}] = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 9 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Маска фильтра определяется как сумма вторых производных и вычисляется как сумма перепадов на соседях центрального пикселя.

Применение фильтра Лапласа к цифровому изображению позволяет повысить контрастность изображения, увеличивая его резкость. Фильтр такого типа называют фильтрами высоких частот. Ядро фильтра имеет значение, большее 1, в точке (0,0). Общая сумма всех значений равна 1. Эффект повышения резкости достигается за счет того, что фильтр подчеркивает разницу между интенсивностями соседних пикселей, удаляя эти интенсивности друг от друга [4]. Причем, эффект резкости будет тем сильнее, чем больше значение центрального члена ядра. Признаком применения такого фильтра является получение на изображении заметных светлых и менее заметных темных ореолов границ. На рисунке 2 приведен результат работы фильтра повышения резкости. Рисунок 2б был сдвинут на 128 для улучшения визуального восприятия.



Рисунок 2.
а) Изображение «девушка» до обработки;
б) Изображение «девушка» после обработки фильтром Лапласа для выделения контуров.

2. Введение в систему остаточных классов

В СОК числа представляются в базисе взаимно-простых чисел, называемых модулями $\beta = \{m_1, \dots, m_n\}$, $\text{НОД}(m_i, m_j) = 1$, для $i \neq j$. Произведение всех модулей СОК $M = \prod_{i=1}^n m_i$ называется динамическим диапазоном системы. Любое целое число $0 \leq X < M$ может быть единственным образом представлено в СОК в виде вектора $\{x_1, x_1, \dots, x_n\}$, где $x_i = |X|_{m_i} = X \bmod m_i$ [7].

В случае использования отрицательных чисел, число располагается в следующих интервалах:

$$-\frac{M-1}{2} \leq X \leq \frac{M-1}{2}, \text{ для нечетных } M, \quad (3)$$

$$-\frac{M}{2} \leq X \leq \frac{M}{2} - 1, \text{ для четных } M, \quad (4)$$

Восстановление числа X по остаткам $\{x_1, x_1, \dots, x_n\}$ основано на Китайской Теореме об Остатках (КТО) [6]:

$$X = \sum_{i=0}^n \left\| M_i^{-1} \right\|_{m_i} x_i \left\| M_i \right\|_M, \quad (5)$$

где $M_i = M/m_i$.

Элемент $\left\| M_i^{-1} \right\|_{m_i}$ означает мультипликативный обратный элемент для M_i , по модулю m_i .

В процессе фильтрации изображений будем использовать Китайскую Теорему об Остатках, а также Модифицированную Китайскую теорему об остатках. Применив КТО в совокупности с LUT-таблицами можно выполнять операции над числами с наименьшими потерями информации. Применение модифицированной КТО поможет уменьшить динамический диапазон системы и как следствие повысить эффективность реализации.

3. Архитектурная организация процесса фильтрации изображения

Численная организация процесса фильтрации напрямую связана с его структурной схемой. Поэтому, говоря о фильтрации изображения, особое место должна занимать схема этого процесса, которая должна включать в себя поэтапно каждый процесс.

Для выполнения операций в СОК необходимо первоначально преобразовать числа из позиционной системы счисления в систему остаточных классов, т.е. применить операцию прямого преобразования ПСС-СОК [7]. Таким образом, схема, на основе которой должно проходить это преобразование должна сначала получить значения пикселей, после этого преобразовать их в представление СОК, а затем выполнять цифровую обработку изображений, а именно цифровую фильтрацию. После прохождения описанной операции к числам, представленным в СОК, должна быть применена обратная операция для получения информации в ПСС. Исходя из этого, в [8] авторы представляют операцию фильтрации изображения как процесс, состоящий из трех этапов. Каждый из этих этапов описывается следующим образом:

1. Преобразование значений пикселей из позиционной системы счисления в систему остаточных классов. Этот этап включает в себя решение нескольких задач: чтение значения пикселей входного цифрового изображения в виде десятичных или двоичных чисел; выбор соответствующего набора модулей СОК, который удовлетворяет ограничению, накладываемому на динамический диапазон системы; создание справочной LUT-таблицы для более быстрой обработки; присваивание новых значений пикселей в соответствии с СОК, полученных на этом этапе.

2. Операция фильтрации изображения с вычислениями в СОК.

3. Обратное преобразование полученных значений пикселей из СОК в ПСС. Этап включает в себя: получение значений пикселей в виде остатков в СОК; определение числа остатков; преобразование каждого остатка в свою первоначальную форму с применением LUT-таблиц.

Особое место в описанном процессе прямого и обратного преобразований из ПСС в СОК и обратно отводится просмотрным LUT-таблицам, так как они повышают работу всей системы в целом. Используются таблицы во время перехода значений пикселей из ПСС в СОК и обратно, что естественно приводит к более быстрому преобразованию значений.

Покажем свою обобщенную модифицированную схему, придерживаясь которой можно получить обработанное цифровое изображение (рис. 5).

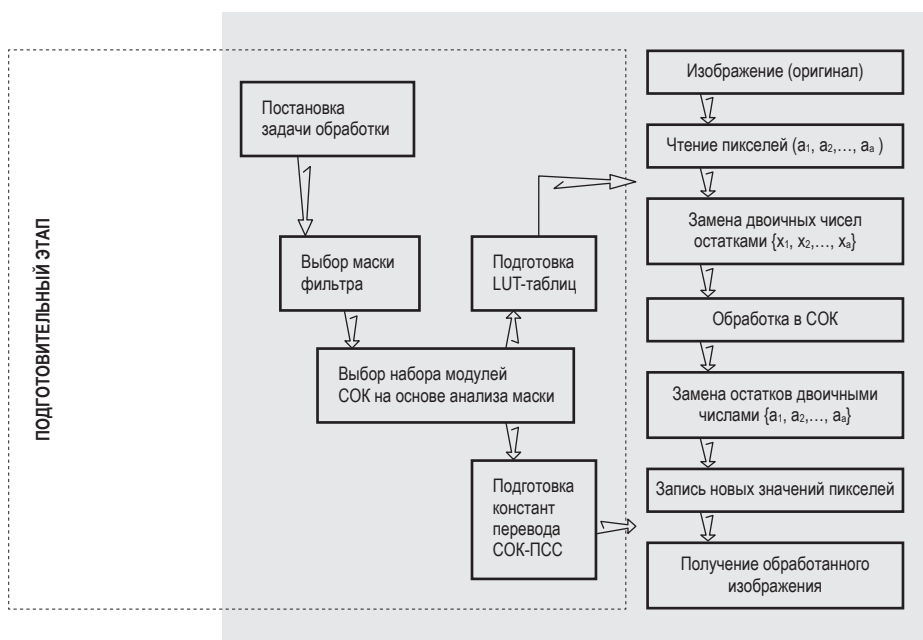


Рисунок 5. Предлагаемая схема процесса фильтрации изображения.

Отличительной особенностью предлагаемой схемы является то, что в ней учтен подготовительный этап фильтрации, в процессе которого происходит выбор маски фильтра и выбор набора модулей СОК, который занимает одно из важных мест, в процессе обработки изображений. Причем эти операции зависят от изначально поставленной задачи обработки. В [1] выбор набора модулей СОК происходит уже после чтения значений пикселей изображений, что может привести к получению некорректных результатов работы системы, обработки изображений [9, 10].

Результаты и обсуждение

1. Численная реализация фильтрации на примере изображения в оттенках серого

Рассмотрим более подробно влияние цифровой фильтрации на изображение на примере известных фильтров Привита, Собеля, Гаусса, Лапласиана. Фильтрация будет проводиться в пространственной области с применением изображения в оттенках серого. Для представления одного изображения будем использовать двумерную матрицу размером $M \times N$. Значение каждого элемента из этой матрицы показывает степень яркости, при этом каждый элемент принимает 8 битное значение, которое может варьироваться в пределах 0 – 255. В математическом пакете MATLAB такое представление изображения запишется следующим образом [11]:

$$F(x, y) = \begin{bmatrix} F(1,1) & F(1,2) & \dots & F(1,N) \\ F(2,1) & F(2,2) & \dots & F(2,N) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ F(M,1) & F(M,2) & \dots & F(M,N) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Сочетание функции и маски изменений уровней серого, записанного в виде формулы (8) называется фильтром. Для того чтобы применить линейный фильтр к массиву изображения необходимо перемножить все коэффициенты изображения на соответствующие прилегающие элементы из фильтра (маски) и суммировать все полученные значения [2]. В случае выполнения фильтрации в пространственной области, маска накладывается на соответствующий участок изображения, двигается на нем, а в качестве вычисляемых значений используются соответствующие значения пикселей, которые совпали при наложении маски [4]. Таким образом, после такой операции получается новое изображение в оттенках серого, вычисленное в соответствии с предложенной маской. Математическая интерпретация описанной операции соответствует формуле (7):

$$g(x, y) = \sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b w(s, t) f(x + s, y + t), \quad (7)$$

где a и b – положительные числа;
 $f(x, y)$ – функция для заданного фильтра;
 $w(s, t)$ – функция для значений выходного изображения.

Предположим, что коэффициенты маски размером 3×3 можно представить в виде:

$$\begin{bmatrix} w(-1,1) & w(-1,0) & w(-1,-1) \\ w(0,1) & w(0,0) & w(0,-1) \\ w(1,1) & w(1,0) & w(1,-1) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Коэффициенты значений пикселей имеют следующие значения:

$$\begin{bmatrix} f(x-1, x+1) & f(x-1, y) & f(x-1, y-1) \\ f(x, y+1) & f(x, y) & f(x, y-1) \\ f(x+1, y+1) & f(x+1, y) & f(x+1, y-1) \end{bmatrix} \quad (9)$$

Перемножим две представленные матрицы коэффициентов (8) и (9) между собой и просуммируем полученные значения [11]:

$$\sum_{s=-1}^1 \sum_{t=-1}^1 w(s, t) f(x+s, y+t)$$

Таким образом, процесс фильтрации можно поделить на 3 этапа:

1. Расположение заданной маски на фрагменте изображения.
2. Умножение коэффициентов фильтра на смежные коэффициенты изображения.
3. Нахождение общей суммы полученных значений.

Все множество фильтров, которые используются для получения улучшения качества цифрового изображения можно поделить на две категории: низкочастотные и высокочастотные фильтры. Обработка цифрового изображения низкочастотным фильтром, который проходит через полосу низкочастотных пикселей и изменяет высокочастотные пиксели, может привести к скрытым изображениям. Фильтр высоких частот, который проходит через высокочастотные пиксели и вносит изменения в полосу низких частот пикселей, приводит к появлению шума на краях изображения [5]. Наиболее известными фильтрами, применяемыми для решения обозначенных проблем, которые так же применяются для решения задач повышения или понижения резкости изображения, выделения контура, шумопонижения и т. д. являются следующие фильтры:

Фильтры Превитта для выделения контура:

$$P_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, P_y = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Фильтры Собеля для выделения контура:

$$P_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, P_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

Поскольку операция фильтрации изображения согласно формуле (1) требует большого количества выполнения арифметических операций сложения и умножения значений пикселей с соответствующей маской, то можно сделать вывод, что для операций, связанных с цифровой обработкой изображений необходимо повышение скорости выполнения этих операций. Кроме того, увеличение скорости работы системы приведет к понижению энергопотребления цифрового приложения. Подходящим решением

проблемы является применение непозиционной системы счисления. Помимо свойства высокого параллелизма, которым обладает СОК, архитектура такой системы может использовать в своей работе комбинационные схемы, а также просмотрные таблицы (LUT-таблицы). Эти преимущества, заключающиеся в выработке достаточно высокой скорости работы системы и малой потребляемой мощности, подчеркивают преимущества применения СОК в приложениях цифровой обработке изображений [8].

В [9, 10, 12, 13] описан актуальный вопрос, возникающий при цифровой обработке изображений, а именно выбор корректного набора модулей. Поэтому, исходя из результатов полученных ранее, применим, предлагаемый нами в [10] набор модулей и для решения данной задачи. Предлагаемый набор модулей имеет вид: $\{5, 7, 9, 16\}$.

2. Моделирование численного метода

Покажем работу данного набора модулей на примере конкретного изображения. В качестве входного изображения будем рассматривать изображение «девушка» в оттенках серого. Входные значения пикселей в этом изображении представлены в виде:

$$\begin{bmatrix} 252 & 254 & 250 & 250 \\ 250 & 253 & 254 & 251 \\ 254 & 253 & 252 & 251 \\ 254 & 252 & 253 & 254 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Преобразуем все имеющиеся значения пикселей изображения (10) и значения маски фильтра (2) в значения, представленные в СОК. В качестве выбранного набора модулей будем использовать набор $\{5, 7, 9, 16\}$. Динамический диапазон набора $M = 5 \cdot 7 \cdot 9 \cdot 16 = 5040$ подходит для цифровых изображений, представленных в оттенках серого. Тогда для выбранных значений пикселей получим:

$$\begin{bmatrix} \{2,0,0,12\} & \{4,2,2,14\} & \{0,5,7,10\} & \{0,5,7,10\} \\ \{0,5,7,10\} & \{3,1,1,13\} & \{4,2,2,14\} & \{1,6,8,11\} \\ \{4,2,2,14\} & \{3,1,1,13\} & \{2,0,0,12\} & \{1,6,8,11\} \\ \{4,2,2,14\} & \{2,0,0,12\} & \{3,1,1,13\} & \{4,2,2,14\} \end{bmatrix}$$

Значения маски фильтра переписутся в виде:

$$\begin{bmatrix} \{4,6,8,15\} & \{4,6,8,15\} & \{4,6,8,15\} \\ \{4,6,8,15\} & \{4,2,0,9\} & \{4,6,8,15\} \\ \{4,6,8,15\} & \{4,6,8,15\} & \{4,6,8,15\} \end{bmatrix}$$

Учитывая использование LUT-таблицы в обратном преобразовании при переходе от системы остаточных классов к позиционной сис-

теме счисления необходимо построить таблицу поиска для значений пикселей цифровых изображений (табл. 1).

Таблица 1. Значения пикселей цифровых изображений в ПСС и СОК

Значения пикселей в наборе модулей {5,7,9,16}	Значения пикселей в позиционной системе счисления
{0,5,7,10}	250
{1,6,8,11}	251
{2,0,0,12}	252
{3,1,1,13}	253
{4,2,2,14}	254

Рассмотрим более подробно процесс фильтрации значений изображения. В качестве обрабатываемого массива данных будем использовать массив того же размера 3×3 , что и маска фильтра. При умножении значений изображений на соответствующие значения фильтра получим:

$$\begin{bmatrix} \{2,0,0,12\} & \{4,2,2,14\} & \{0,5,7,10\} \\ \{0,5,7,10\} & \{3,1,1,13\} & \{4,2,2,14\} \\ \{4,2,2,14\} & \{3,1,1,13\} & \{2,0,0,12\} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \{4,6,8,15\} & \{4,6,8,15\} & \{4,6,8,15\} \\ \{4,6,8,15\} & \{4,2,0,9\} & \{4,6,8,15\} \\ \{4,6,8,15\} & \{4,6,8,15\} & \{4,6,8,15\} \end{bmatrix} =$$
$$= \begin{bmatrix} \{8,0,0,180\} & \{16,12,16,210\} & \{0,30,56,150\} \\ \{0,30,56,150\} & \{12,2,0,117\} & \{16,12,16,210\} \\ \{16,12,16,210\} & \{12,6,8,195\} & \{8,0,0,180\} \end{bmatrix}.$$

Далее сложим все соответственные коэффициенты друг с другом, после чего получим остаток каждого по модулю. Полученный результат $\{3,6,6,2\}$ соответствует значению первого пикселя изображения, представленного в СОК. Проведем аналогичную операцию для оставшихся значений пикселей, после чего получим:

$$\begin{bmatrix} \{3,6,6,2\} & \{2,6,2,0\} \\ \{0,3,3,15\} & \{2,2,4,7\} \end{bmatrix}. \tag{11}$$

Для перевода найденных значений из представления в СОК обратно в ПСС применим КТО. Поскольку найденный динамический диапазон СОК равен $P = 5 \cdot 7 \cdot 9 \cdot 16 = 5040$, тогда по формуле $P = P/P_i$ найдем диапазоны для каждого из четырех модулей $\{5, 7, 9, 16\}$ и остатки при делении:

$$\begin{aligned} P_i &= 1008, & 1008 \bmod 5 &= 3 \\ P_2 &= 720, & 720 \bmod 7 &= 6 \\ P_3 &= 560, & 560 \bmod 9 &= 6 \\ P_4 &= 315, & 315 \bmod 16 &= 1 \end{aligned}$$

Применяя обратную операцию, получаем следующие значения:

$$\begin{aligned}3 \cdot x_1 &= 1 \bmod 5 \rightarrow x_1 = 2 \\6 \cdot x_2 &= 1 \bmod 7 \rightarrow x_2 = 6 \\2 \cdot x_3 &= 1 \bmod 9 \rightarrow x_3 = 5 \\11 \cdot x_4 &= 1 \bmod 16 \rightarrow x_4 = 3\end{aligned}$$

Найдем массив B_i :

$$\begin{aligned}B_1 &= P_1 \cdot x_1 = 1008 \cdot 2 = 2016; \\B_2 &= P_2 \cdot x_2 = 720 \cdot 6 = 4320; \\B_3 &= P_3 \cdot x_3 = 560 \cdot 5 = 2800; \\B_4 &= P_4 \cdot x_4 = 315 \cdot 3 = 945;\end{aligned}$$

Тогда полученное значение пикселя после обратной операции преобразования будет записано как:

$$\begin{aligned}A &= 3 \cdot 2016 + 6 \cdot 4320 + 6 \cdot 2800 + 2 \cdot 945 = 50658, \\50658 \bmod 5040 &= 258.\end{aligned}$$

Проведя аналогичные операции для каждого из значений (11) получим преобразованные значения пикселей из СОК в ПСС:

$$\begin{bmatrix} 258 & 272 \\ 255 & 247 \end{bmatrix}.$$

Все вычисления производились с использованием пакета прикладных программ MATLAB. Результатами моделирования являются, полученные гистограммы для цифровых изображений для входного изображения и изображения, полученного после фильтрации (рисунки 3 и 4 соответственно). По горизонтальной оси каждого графика отложены значения уровней яркости r_k , а по вертикальной – значения гистограммы $h(r_k) = n_k$. Тем самым, эти графики выражают зависимости $h(r_k) = n_k$ от r_k или $p(r_k) = n_k / n$ от r_k (в случае, если значения гистограммы нормализованы) [2]. Из этих графиков видно, что ненулевые уровни гистограммы покрывают широкую часть диапазона яркостей, а также, что распределение значений пикселей не слишком отличается от равномерного, за исключением числа пиков, возвышающихся над остальными значениями. Интуитивно можно сделать вывод, что изображение, распределение значений элементов которого близко к равномерному и занимает весь диапазон возможных значений яркостей, будет выглядеть высококонтрастным и будет содержать большое количество полутонов [8].

Таким образом, основываясь только на информации, содержащейся в гистограмме исходного изображения, можно построить функцию преобразования, которая позволит автоматически добиваться такого эффекта.

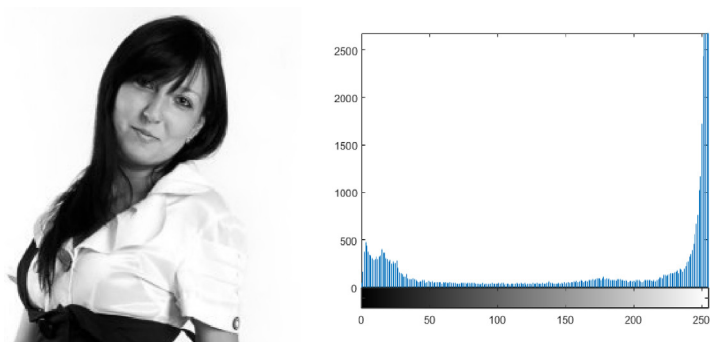


Рисунок 3. Входное изображение «девушка» до обработки фильтром и его гистограмма значений изображения.

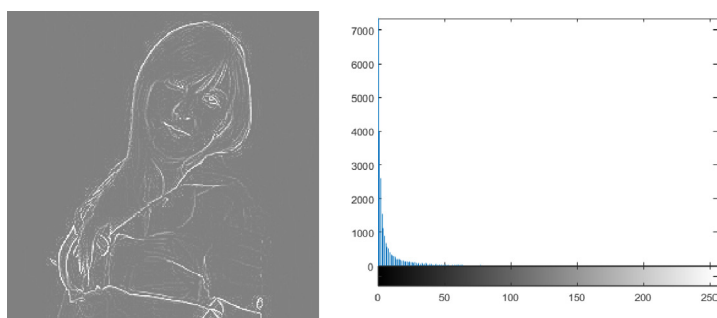


Рисунок 4. Обработанное фильтром изображение «девушка» и его гистограмма значений изображения.

Выводы

В статье исследован вопрос о численной реализации метода цифровой фильтрации изображений с использованием вычислений в системе остаточных классов. Показано, что предложенный численный метод, использующийся при цифровой фильтрации изображений позволяет сократить вычислительные затраты, возникающие при выполнении арифметических операций сложения и умножения. Эффективность метода достигается за счет применения системы остаточных классов, которая способна распараллелить процесс вычислений. Разработанная архитектурная организация процесса цифровой фильтрации позволяет получить корректный результат обработки, независимо от размера изображения и маски фильтра. Преимущества схемы обусловлены тем, что она учитывает подготовительный этап фильтрации, в процессе которого происходит выбор набора модулей СОК и маски фильтра непосредственно до самого процесса фильтрации.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Президента Российской Федерации МК-5980.2016.9.

Библиографический список

1. Галушкин А.И. Нейрокомпьютеры для обработки изображений / А.И. Галушкин, Н.С. Томашевич, Е.И. Рябцев // Нейрокомпьютеры в прикладных задачах обработки изображений. Кн. 25. 2007. 74–109 с.
2. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений. Издание 3-е, исправленное и дополненное [Текст] / Р. Гонсалес, Р. Вудс // М.: Техносфера. 2012. 1104 с.
3. Дамьяновски В. CCTV. Библия охранного телевидения: Перевод с английского / В. Дамьяновски // Москва: Ай-Эс-Пресс, 2003. 344 с.
4. Желтов С.Ю. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения [Текст] / С.Ю. Желтов // М.: Физматкнига, 2010. 672 с.
5. Белодедов М.В. Методы проектирования цифровых фильтров: Учебное пособие / М. В. Белодедов // Волгоград: Издательство Волгоградского государственного университета, 2004. – 60 с.
6. Червяков Н.И. Нейрокомпьютеры в остаточных классах / Н.И. Червяков, П.А. Сахнюк, А.В. Шапошников, А.Н. Макоха А.Н // М.: Радиотехника, 2003. 272 с.
7. Акушский И.Я. Машинная арифметика в остаточных классах / И.Я. Акушский, Д.И. Юдицкий // М.: Советское радио, 1968. 440 с.
8. Taleshmekeail D.K. The use of residue number system for improving the digital image processing / D. K. Taleshmekeail, A. Mousavi // In Proc. of 10th International Conference on Signal Processing, 2010, pp. 775–780.
9. Червяков Н.И. О выборе диапазона системы остаточных классов для цифровой обработки изображений / Н.И. Червяков, П.А. Ляхов, Д.И. Калита // Инфокоммуникационные технологии. 2016. Т. 14. №2. С. 111-122.
10. Chervyakov N.I. Effect of RNS dynamic range on grayscale image filtering / N.I. Chervyakov, P.A. Lyakhov, D.I. Kalita, K.S. Shulzhenko // 2016 XV International Symposium Problems of Redundancy in Information and Control Systems (REDUNDANCY), St. Petersburg, 2016, pp. 33-37.
11. Курячий М.И. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие для вузов / М.И. Курячий // Томск: Томск. гос. Университет систем упр. и радио-электроники. 2009. – 190 с.
12. Wang W. A high-speed residue-to-binary converter for three-moduli $(2^k, 2^k, 1, 2^{k-1} - 1)$ RNS and a scheme for its VLSI implementation / W. Wang, M.N. Swamy, M.O. Ahmad, Y. Wang // IEEE Trans. on Circuits and Systems-II: Analog and Digital Signal Processing. 2000. 47, No. 12. Pp. 1576–1581.
13. Wang W. A study of the residue-to-binary converters for the three-moduli sets / W. Wang, M.N.. Swamy, M.O. Ahmad, Y. Wang // IEEE Trans. Circuits Syst. I: Fundamental Theory Appl., 50: 235-243.

References

1. Galyshkin A.I. Neyrokomputery dlya obrabotki izobrazhenii (Neurocomputers for image processing) / A.I. Galyshkin, N.C. Tomashevich, E.I. Ryabcev // Neyrokomputery v prikladnykh zadakh obrabotki izobrazhenii. Kn. 25. 2007. 74–109 c.
2. Gonsales R. Cifrovaya obrabotka izobrazhenii (Digital image processing). Izdanie 3, ispravlennoe i dopolnennoe [Tekst] / R. Gonsales, R. Vydys // M.: Texnosfera. 2012. 1104 c.
3. Damyanovski V. CCTV. Bibliya oxrannogo televideniya (Bible guarding television) / V. Damyanovski // Perevod s angliiskogo – Moskva. 2003. 344 c.
4. Jeltov S.U. Obrabotka i analiz izobrazhenii v zadachakh mashinnogo zreniya [Tekst] (Image processing and analysis in computer vision problems) / S. U. Jeltov // M.: Fizmatkniga. 2010. 672 c.
5. Belodedov M.V. Metody proektirovaniya cifrovyykh filtrov (Methods for designing digital filters) / M. V. Belodedov // Ychebnoe posobie. – Volgograd. 2004. 60 c.
6. Chervyakov N.I. Neyrokomputery v ostatochnykh klassakh (Neurocomputers in the residual classes) / N.I. Chervyakov, P.A. Shaposhnikov, A.N. Makoxa. M.: Radiotekhnika, 2003. 272 c.
7. Akyshskii I.Y. Mashinnaya arifmetika v ostatochnykh klassakh (Machine arithmetic in the residual classes) / I.Y. Akyshskii, D.I. Udickii // M.: Sovetskoe radio, 1968. 440 c.
8. Taleshmekeail D.K. The use of residue number system for improving the digital image processing / D.K. Taleshmekeail, A. Mousavi // In Proc. of 10th International Conference on Signal Processing, 2010, pp. 775-780.
9. Chervyakov N.I. O vybere diapazona sistemy ostatochnykh klassov dlya cifrovykh obrabotki izobrazhenii (About the choice of the range of the residue number system for digital image processing) / N.I. Chervyakov, P.A. Lyaxov, D.I. Kalita // Infokommunikatsionnye tekhnologii. 2016. T. 14. №2. C. 111–122.
10. Chervyakov N.I. Effect of RNS dynamic range on grayscale image filtering / N.I. Chervyakov, P.A. Lyakhov, D.I. Kalita, K.S. Shulzhenko // 2016 XV International Symposium Problems of Redundancy in Information and Control Systems (REDUNDANCY), St. Petersburg, 2016, pp. 33-37.
11. Kuryachii M.I. Cifrovaya obrabotka signalov (Digital signal processing) / M.I. Kuryachii // Tomsk. gos Universitet sisten upr. i radioelektroniki. Tomsk. 2009. 190 c.
12. Wang W. A high-speed residue-to-binary converter for three-moduli $(2^k, 2^k, 1, 2^{k-1} - 1)$ RNS and a scheme for its VLSI implementation / W. Wang, M.N. Swamy, M.O. Ahmad, Y. Wang // IEEE Trans. on Circuits and Systems-II: Analog and Digital Signal Processing. 2000. 47, No. 12. Pp. 1576–1581.
13. Wang W. A study of the residue-to-binary converters for the three-moduli sets / W. Wang, M.N. Swamy, M.O. Ahmad, Y. Wang // IEEE Trans. Circuits Syst. I: Fundamental Theory Appl., 50: 235–243.

УДК 911.3:711.4

Бадов А.Д. [Badov A.D.]

ОСОБЕННОСТИ ГЕОГРАФИИ ПРЕСТУПНОСТИ НА СЕВЕРНОМ КАВКАЗЕ В СОВРЕМЕННЫЙ ПЕРИОД

Features of geography of crime in the North Caucasus in the modern period

В статье рассматриваются особенности криминальной ситуации в Северо-Кавказском экономическом районе. Выявляются и анализируются показатели общей преступности, преступлений против личности, экономических преступлений и преступлений в сфере незаконного оборота наркотиков. Выявлены географические факторы преступности. Показано, что на Северном Кавказе регистрируется существенная территориальная дифференциация общей преступности, убийств и покушений на убийство, умышленного причинения тяжкого вреда здоровью, изнасилований и покушений на изнасилования, грабежей, краж, разбоев, преступлений в сфере экономической деятельности, наркопреступлений. Приведены сравнения с общероссийской ситуацией. Рассчитана доля отдельных видов преступлений в общей структуре противоправных деяний. Определены темпы динамики отдельных видов преступлений. Выявлены существенные изменения в структуре потребления наркотиков. Одним из «нарколидеров» района является Северная Осетия, через которую проходят основные наркотрафики из-за рубежа в Российскую Федерацию. Определены основные направления оптимизации ситуации. Повышение уровня жизни населения, снижение числа безработных могут существенно снизить уровень преступности и количество терактов. Необходимо обратить особое внимание и на снижение латентности преступлений в регионе.

The article discusses the features of the criminal situation in the North Caucasus economic region, identifies and analyzes the indicators of total crime, violent crimes, economic crimes and crimes in the sphere of drug trafficking. Geographical factors of crimes are identified. It was found that the North Caucasus has a substantial territorial differentiation of total crime, murders and attempted murders, intentional infliction of grievous bodily harm, rape and attempted rape, robberies, thefts, robberies, crimes in the sphere of economic activity, drug-related crimes. Comparisons with the all-Russian situation are given. Percentage of certain types of crimes in the overall structure of wrongful acts were calculated. Dynamics of certain types of crimes were determined. Significant changes in the structure of drug consumption were revealed. One of the drug leaders is the North Ossetia region, which straddles major drug trafficking from abroad to the Russian Federation. The main directions of optimization of the situation were determined. Raising living standards, reducing the number of unemployed can significantly reduce the crime rate and the number of terrorist attacks. It is necessary to pay special attention to the reduction of latency of crimes in the region.

Ключевые слова: Северный Кавказ, преступность, коэффициенты, наркопреступность, регионы, убийства, грабежи, разбой.

Key words: North Caucasus, criminality, factors, drug crime, regions, murders, robberies.

Введение

Преступность, как одно из отрицательных социальных явлений, всегда привлекала внимание ученых и специалистов различных направлений. Это связано с ее огромным влиянием на все стороны жизни че-

ловека. По самым скромным подсчетам, ежегодные издержки федерального бюджета достигают 10%, отвлекается более 8% экономически активного населения. Значительные размеры территории нашей страны, существенная территориальная дифференциация уровня преступности, разнообразие криминологических факторов и т. д. вызвали потребность развития географии преступности (геокриминологии) в нашей стране, которая исследует взаимосвязи между географическими условиями, уровнем, характером и территориальными закономерностями изменения преступности [1: 6].

Географическое изучение преступности в нашей стране тем более актуально в настоящее время, когда в условиях снижения общих показателей преступности, увеличивается доля тяжких и особо тяжких преступлений и усиливается территориальная дифференциация уровня преступности.

Материалы и методы

Теоретической и методологической основой статьи послужили исследования ученых, как в области географии, так и в области криминологии. Были использованы общенаучные и социально-географические методы исследований: сравнительно-географический, пространственного анализа, экономико-географический анализ, исторический, литературный, геоситуационный, системно-структурный, программно-целевой, нормативно-правовой и др. Фактологической основой явились статистические сборники «Регионы России. Социально-экономические показатели».

Для исследования общего уровня преступности чаще всего применяют общий коэффициент преступности (ОКП) – отношение числа преступлений за год на 1000 жителей к среднегодовой численности всего населения [2, 3, 5].

Результаты и их обсуждение

Судя по официальной статистике, уровень преступности в России и большинстве ее регионов постоянно снижается. Так ОКП в России за 2005–2014 гг. снизился в 1,6 раза, что весьма существенно учитывая общемировую тенденцию к увеличению уровня преступности. Снижение уровня преступности в нашей стране можно объяснить резким изменением социально-экономических и политических условий в нашей стране.

На Северном Кавказе темпы снижения были не такими высокими и это можно объяснить «низкой стартовой площадкой» северокавказских регионов. Так в большинстве республик СКЭР ОКП в 2005 г. был в несколько раз (!) ниже, чем в целом по России. Причины подобного феномена были подробно описаны в работе А.Д.Бадова «География преступности в России в постсоветский период» [2]. Тем не менее, и в 2014 г. ОКП регионов СКЭР был существенно ниже аналогичного среднероссийского показателя. Так ОКП России в целом в 2014 г. составлял 15,37‰, а СКЭР – 9,56‰ (табл. 1). В пределах СКЭР наблюдалась существенная территориальная дифференциация в пока-

зателях ОКП. По данным за 2014 г. регионы Северного Кавказа можно под разделить на: 1) регионы с высоким уровнем ОКП (более 11 %, Краснодарский и Ставропольский края, Ростовская область); 2) регионы со средним ОКП (8–11%, Кабардино-Балкария, Адыгея, Северная Осетия); 3) регионы с низким ОКП (5–7,9%, Карачаево-Черкесия); 4) регионы с очень низким ОКП (менее 5%, Дагестан, Ингушетия, Чечня).

Однако чаще всего ОКП дает неполное представление о складывающейся ситуации. Это связано со сложной структурой преступлений. При этом в одних регионах больше совершается тяжких преступлений, убийств и покушений на убийства, изнасилований и т.д.; в других регионах больше совершается экономических преступлений. На уровень и структуру преступлений оказывают разнонаправленное влияние многие факторы, которые также необходимо учитывать [6, 7, 8, 9, 11].

В связи с этим весьма часто применяют другие показатели. Например, коэффициент убийств и покушений на убийство (K_y).

В целом по Северному Кавказу K_y в 1,5 раза был ниже среднероссийского показателя. Самые низкие показатели были зафиксированы в Краснодарском крае (0,02%). Ниже среднесеверокавказского уровня (0,06%) были показатели Чечни (0,04%), Адыгеи, Ингушетии и Кабардино-Балкарии (0,05%). На этом фоне резко выделялись Карачаево-Черкесия (0,12%) и Дагестан (0,08%).

В целом по России в 2014 г. были весьма высокими коэффициенты умышленного причинения тяжкого вреда здоровью ($K_{вз}$, 0,24%). В Северо-Кавказском регионе эти коэффициенты были более чем в два раза ниже (0,11%). Различия $K_{вз}$ России и Северного Кавказа наблюдались и в 1990–2003 гг., хотя были и не столь существенными [2: 79, 234]. В пределах СКЭР также наблюдались существенные различия в показателях $K_{вз}$. Однако следует заметить, что ни один регион Северного Кавказа не превысил среднероссийский показатель. В целом по показателям $K_{вз}$ регионы Северного Кавказа можно подразделить на:

- 1) регионы с высоким $K_{вз}$ (0,13% и более, Ростовская область, Краснодарский и Ставропольский края);
- 2) регионы со средним $K_{вз}$ (0,09–12,9%, Адыгея, Кабардино-Балкария, Северная Осетия, Карачаево-Черкесия);
- 3) регионы с низким $K_{вз}$ (менее 0,09 %, Дагестан, Ингушетия, Чечня). Данное распределение регионов почти соответствовало распределению в 1990–2003 гг. Исключение – Республика Адыгея, которая в предыдущий период была бесспорным лидером в регионе [2: 179, 5].

Традиционно изнасилования на Северном Кавказе случались значительно реже, чем в целом по России. Однако в последнее время ситуация стала постепенно меняться и в таких регионах как Карачаево-Черкесия (0,04 ‰ и Ставропольский край (0,03 ‰) уже догнали и даже перегнали Россию в целом (0,03 ‰). В Ингушетии в 2014 г. изнасилований не отмечалось вообще. Весьма низкие показатели наблюдались в Адыгее, Северной Осетии и Чечне (0,01 ‰). В целом можно констатировать повсеместное снижение $K_{\text{и}}$ по сравнению с 1990–2003 гг. [2: 305–306].

Таблица 1. ЧИСЛО ПРЕСТУПЛЕНИЙ СОВЕРШЕННЫХ В РЕГИОНАХ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА В 2014 г.,ед.

	Всего	Уб.	УПТВЗ	Изн.	Граб.	Раз.	Кр.	Эк.	Нарк.	Др.
РФ	12361	34786	4246	92069	16416	922562	10164	231462		
СК	242300	1238	2253	390	5940	1311	72294	11617	24031	
Краснодарский край	63100	351	823	106	1620	338	26098	2732	8263	
Ставропольский край	33800	180	389	74	932	222	11573	2884	3635	
Ростовская область	51800	238	681	86	2641	443	25627	2316	5007	
Адыгея	4000	21	55	7	86	17	1351	282	375	
Дагестан	14000	228	140	50	238	120	2412	1016	2635	
Ингушетия	1700	24	9	–	8	9	172	353	433	
Кабардино-Балкария	8700	42	91	29	207	89	2569	544	1094	
Карачаево-Черкесия	3600	60	41	18	70	15	913	527	533	
Северная Осетия	6000	40	68	9	113	32	978	776	1411	
Чечня	3600	54	16	11	25	26	601	187	655	

Источник:

Регионы России. Социально-экономические показатели. 2015: Стат. сб. Росстат. М., 2015. 1266 с.

Таблица 2. КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРЕСТУПЛЕНИЙ В РЕГИОНАХ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА В 2014 Г.

	Ко	Ку	Квз	Ки	Кг	Кр	Ккр	Кэ	Кн	Доля прест. несовер- шеннолет- них
РФ	15,37	0,09	0,24	0,03	0,64	0,11	6,42	0,71	1,61	
СК	9,56	0,06	0,11	0,02	0,30	0,07	3,67	0,59	1,22	2,3
Краснодарский край	11,95	0,02	0,15	0,02	0,30	0,06	4,83	0,51	1,53	2,3
Ставропольский край	12,12	0,06	0,14	0,03	0,33	0,08	4,14	1,03	1,30	3,7
Ростовская область	12,19	0,06	0,16	0,02	0,62	0,10	6,03	0,54	1,18	3,6
Адыгея	8,88	0,05	0,12	0,01	0,19	0,04	3,03	0,63	0,84	4,8
Дагестан	4,74	0,08	0,04	0,02	0,08	0,04	0,81	0,34	0,88	2,0
Ингушетия	3,91	0,05	0,02	–	0,02	0,02	0,38	0,78	0,95	1,3
Кабардино-Балкария	10,09	0,05	0,11	0,03	0,24	0,10	2,99	0,63	1,27	2,5
Карачаево-Черкесия	7,76	0,12	0,09	0,04	0,15	0,03	1,95	1,12	1,13	5,8
Северная Осетия	8,57	0,06	0,10	0,01	0,16	0,04	1,39	1,10	2,00	1,7
Чечня	2,72	0,04	0,01	0,01	0,02	0,02	0,45	0,14	0,49	0,9

Источник: Регионы России. Социально-экономические показатели. 2015: Стат. сб. Росстат.– М., 2015. 1266 с.

Коэффициенты грабежей (K_r) в 2014 г. снизились по сравнению с 2003 годом, а вот по сравнению с 1990 г. изменений практически не наблюдалось. В 2014 г. в целом по России K_r были в 2,1 раза выше, чем на Северном Кавказе. Это примерно столько же, сколько в 2003 г. и несколько более чем в 1990 г.

Таблица 3. ДОЛЯ ОТДЕЛЬНЫХ ВИДОВ ПРЕСТУПЛЕНИЙ В ОБЩЕЙ ПРЕСТУПНОСТИ В РЕГИОНАХ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА В 2014 Г.

	Всего	Уб.	УПТВЗ	Изн.	Граб.	Раз.	Кр.	Эк.	Нарк.	Др.
РФ										
СК	100	0,5	0,9	0,2	2,4	0,5	29,8	4,8	9,9	51,0
Краснодарский край	100	0,6	1,3	0,2	2,6	0,5	41,3	4,3	13,1	36,1
Ставропольский край	100	0,5	1,1	0,2	2,7	0,6	34,2	8,5	10,7	41,5
Ростовская область	100	0,5	1,3	0,2	5,1	0,8	49,5	4,5	9,7	32,4
Адыгея	100	0,5	1,4	0,2	2,1	0,4	33,8	7,1	9,4	45,1
Дагестан	100	1,6	1,0	0,4	1,7	0,9	17,2	7,2	18,8	51,2
Ингушетия	100	1,4	0,5	–	0,5	0,5	10,1	20,8	25,5	40,7
Кабардино-Балкария	100	0,5	1,0	0,3	2,4	1,0	29,5	6,2	12,5	46,6
Карачаево-Черкесия	100	1,7	1,1	0,5	1,9	0,4	25,4	14,6	14,8	39,6
Северная Осетия	100	0,7	1,1	0,1	1,9	0,5	16,3	12,9	23,5	43,0
Чечня	100	1,5	0,4	0,3	0,7	0,7	16,7	5,2	18,2	56,3

Источник: Регионы России. Социально-экономические показатели. 2015: Стат. сб. Росстат. М., 2015. 1266 с.

Внутри СКЭР абсолютным лидером 2014 г. была (как и в предыдущие годы) Ростовская область. Показатели этого региона (0,62‰) были почти равны среднероссийским коэффициентам (0,64‰). Другие регионы СКЭР существенно отставали (от 0,02‰ в Ингушетии до 0,30‰ в Ставропольском крае). В целом тренд увеличения коэффициентов грабежей направлен с юго-востока на северо-запад.

Практически аналогичная картина наблюдалась и с разбоями. С той разницей, что грабежи случались примерно в шесть раз чаще, чем разбои.

Кражей называют тайное хищение чужого имущества. При этом кражи являются самым массовым видом преступлений. Как правило, в общем чис-

ле преступлений против собственности, удельный вес краж колеблется в пределах 80%. Чаще всего выделяют квартирные кражи, кражи транспортных средств и карманные кражи [2: 82, 6]. Их соотношение стало меняться, так как доля квартирных краж стала неуклонно падать.

В 2014 г. коэффициенты краж (K_k) в РФ в целом были в 1,7 раза выше, чем в СКЭР. Внутри СКЭР наблюдается существенная территориальная дифференциация в показателях K_k . Как и в 1990 г. [2: 308, 6] «лидером» по K_k являлась Ростовская область (6,03). Высокие коэффициенты были также в Краснодарском крае (4,83). Близкие к среднерайонным (2,98) были показатели Ставропольского края (4,14), Адыгеи (3,03) и Кабардино-Балкарии (2,99). Сравнительно низкими были показатели Карачаево-Черкесии (1,95), Дагестана (0,81), Чечни (0,45), Северной Осетии (1,39) и Ингушетии (0,38).

Одними из самых распространенных являются экономические преступления, которые в России получили наибольший размах в 1990-х гг. – 71. Все преступления в сфере экономики подразделяются на три основные группы: преступления против собственности; преступления в сфере экономической деятельности; преступления против службы в коммерческих и иных организациях [2: 71].

Доля преступлений в сфере экономики в России непрерывно растет и уже вполне сопоставимы с экономически развитыми странами.

Собственно к преступлениям в сфере экономики относят некоторые виды государственных преступлений, хозяйственные преступления, должностные преступления. Учет и контроль за этими видами преступлений до сих пор не устоялся – 85. Официальная статистика выделяет в настоящее время 13 видов экономических преступлений. Из них наибольший удельный вес имели статьи «Обман потребителей», «Присвоение или растрата», «Уклонение от налогов», «Коммерческий подкуп», «Злоупотребление полномочиями» и др. [2: 71].

Несмотря на рост доли преступлений в сфере экономической деятельности, коэффициенты (K) за 2000–2013 гг. в целом по России упали более чем в три раза. Аналогичная ситуация наблюдалась и на Северном Кавказе, с той лишь разницей, что K в СКЭР всегда были ниже, чем в целом по стране. Примечательно, что и в 2000 и в 2013 году «лидеры на Северном Кавказе были одни и те же – Ставропольский край, Карачаево-Черкесия и Северная Осетия – 309. Самые низкие показатели наблюдались в Чечне и Дагестане (табл. 2).

Одними из наиболее опасных считаются наркопреступления. Как правило, эти правонарушения «тянут» за собой другие преступления. Это связано с тем, что весьма высокая цена наркотиков заставляет наркозависимых совершать кражи, грабежи, разбои и т. п. для того, чтобы добыть необходимые для приобретения наркотиков средства.

Число наркопреступлений в России до начала 2000-х гг. росло весьма высокими темпами [1]. Однако затем наблюдалась некоторая стабилизация

показателей, отмечаемая и на Северном Кавказе. Внутри СКЭР наблюдались существенные территориальные различия в показателях коэффициентов наркопреступлений ($K_{\text{пнпн}}$). Если в 2000 г. «лидером» региона был Краснодарский край, то в 2013 г. это была уже Северная Осетия. При этом K РСО-А был в 1,3 раза выше среднероссийского показателя. В целом по показателям K регионы Северного Кавказа можно подразделить на: 1) регионы с низким уровнем наркопреступлений (менее 1, Чечня, Адыгея, Ингушетия и Дагестан); 2) регионы со средним уровнем наркопреступлений (1–1,4, КЧР, Ростовская область, КБР, Ставропольский край); 3) регионы с высоким уровнем наркопреступлений (Северная Осетия, Краснодарский край).

За 1990–2015 гг. изменились не только показатели наркотизации населения. Так в Северной Осетии в середине 1990-х гг. до 80% потребления приходилось на производные конопли, в середине 2000-х гг. более 80% наркоманов употребляли ацелированный опий, около 15% – каннабиониды и около 5% – героин. Ацелированный опий вытеснил другие наркотики из-за легкости изготовления и дешевизны [1, 2: 105].

В настоящее время приоритеты вновь изменились: на марихуану приходится 81,3%, СДВ – 7,9%, героин – 7,2%, гашиш – 3%, синтетические НС – 0,3 и иные виды – 0,3% [12].

Возврат к «первоисточникам» (марихуане и гашишу) произошел благодаря вытеснению из оборота сырья для ацелированного опия – маковой соломки. Правоохранительные органы сумели также предотвратить распространение сильнодействующих веществ (СДВ – «Трамадол», «Лирика» и др.).

Выводы

Таким образом, в пределах Северо-Кавказского экономического района наблюдается существенная территориальная дифференциация в уровне преступности. Несмотря на снижение числа преступлений, достаточно тяжелая обстановка складывается в Ростовской области, Краснодарском и Ставропольском краях. Наиболее благоприятная ситуация наблюдается в Чечне, Дагестане и Ингушетии.

На Северном Кавказе весьма остро стоит проблема латентности преступлений. Особенно это касается республик Северного Кавказа. Видимо, именно с этим связано существенное различие между официальной статистикой и реальным положением дел. Таким образом, снижение латентности преступлений – одна из главных задач правоохранительных органов. С другой стороны, местные обычаи направлены на снижение преступности. Исключение – террористические акты, которые до сих пор распространены на Северном Кавказе. Они связаны, в большей мере, с бедностью населения и повальной безработицей. Повышение уровня жизни населения, снижение числа безработных могут существенно снизить уровень преступности и количество терактов.

Библиографический список

1. Бадов А.Д. География наркопреступности в России // Вестник Московского университета. Серия 5. География. №3. 2008. М.: МГУ, 2008. С. 55–59.
2. Бадов А.Д. География преступности в России в постсоветский период: Монография. Владикавказ: Изд-во СОГУ, 2009. 333 с.
3. Бадов А.Д., Макоев Х.Х. Региональные особенности преступности на Северном Кавказе в постсоветский период // Известия Русского географического общества. Том 141. Вып. 3. СПб: Наука, 2009. С. 70–76.
4. Бадов А.Д., Макоев Х.Х. Урбанизация и проблемы преступности // Экология урбанизированных территорий. №4. 2008. М.: Камертон. С. 26–29.
5. Бадов А.Д. География преступности в России: изменения за постсоветский период // Вестник Московского университета. Серия 5. География. №2. 2009. М.: МГУ. С. 64–69.
6. Бадов А.Д. Геокриминогенное положение как фактор преступности // Известия РАН. Серия географическая. №2. 2009. М.: Наука. С. 48–51.
7. Белозеров В.С., Чихичин В.В., Глущенко И.В. Региональные особенности этнических миграций на Северном Кавказе // Наука. Инновации. Технологии. Ставрополь: Изд-во СКФУ. 2016. №1. С. 71–92.
8. Куташов В.А., Сахаров И.Е. Наркология. Клиника. Диагностика. Лечение. Воронеж: Изд-во ВГМУ. 2016. 982 с.
9. Лунеев В.В. Преступность XX века. Мировые, региональные и российские тенденции. М.: Норма, 199. 316 с.
10. Регионы России. Социально-экономические показатели. 2015: Стат. сб. / Росстат. М., 2015. 1266 с.
11. Супрунчук И.П. Пространственно-временной анализ террористической деятельности на Северном Кавказе // Наука. Инновации. Технологии. Ставрополь: Изд-во СКФУ. 2014. №3. С. 85–98.
12. Гацоева Н. Героин нашего времени // Северная Осетия, № 36, 3.03.2016. С. 4.

References

1. Badov A.D. Geografija narkoprestupnosti v Rossii (The geography of drug crime in Russia) // Vestnik Moskovskogo universiteta. Serija 5. Geografija. №3. 2008. M.: MGU, 2008. P. 55–59.
2. Badov A.D. Geografija prestupnosti v Rossii v postsovetiskij period: Monografija (Crime geography in Russia in the post-Soviet period). Vladikavkaz: Izd-vo SOGU, 2009. 333 p.
3. Badov A.D., Makoev H.H. Regional'nye osobennosti prestupnosti na Severnom Kavkaze v postsovetiskij period (Regional features of

- crime in the North Caucasus in the post-Soviet period) //Izvestija Russkogo geograficheskogo obshhestva. Tom 141. Vyp. 3. S.-Pb: Nauka, 2009. P. 70–76.
4. Badov A.D., Makoev H.H. Urbanizacija i problemy prestupnosti (Urbanization and Crime Problems) //Jekologija urbanizirovannyh territorij. №4. 2008. M.: Kamerton. P. 26–29.
 5. Badov A.D. Geografija prestupnosti v Rossii: izmenenija za postsovetskij period (Crime Geography in Russia: Changes in the Post-Soviet Period) // Vestnik Moskovskogo universiteta. Serija 5. Geografija. №2. 2009. M.: MGU. P. 64–69.
 6. Badov A.D. Geokriminogennoe polozenie kak faktor prestupnosti (Geocriminogenic situation as a factor of crime) // Izvestija RAN. Serija geograficheskaja. №2. 2009. M.: Nauka. P. 48–51.
 7. Belozеров V.S., Chihichin V.V., Glushhenko I.V. Regional'nye osobennosti jetnicheskikh migracij na Severnom Kavkaze (Regional features of ethnic migration in the North Caucasus) // Nauka. Innovacii. Tehnologii. Stavropol': SKFU. 2016. №1. P. 71–92.
 8. Kutashov V.A., Saharov I.E. Narkologija. Klinika. Diagnostika. Lechenie. (Narcology. Clinic. Diagnostics. Treatment). Voronezh: VGMU. 2016. 982 p.
 9. Luneev V.V. Prestupnost' XX veka. Mirovye, regional'nye i rossijskie tendencii. (Crime of the twentieth century. World, regional and Russian trends) M.: Norma, 199. 316 p.
 10. Regiony Rossii. Social'no-jekonomicheskie pokazateli. (Regions of Russia. Socio-economic indicators) 2015: Stat. sb. Rosstat. M., 2015. 1266 p.
 11. Suprunchuk I.P. Prostranstvenno-vremennoj analiz terroristicheskij dejatel'nosti na Severnom Kavkaze (Spatio-temporal analysis of terrorist activities in the North Caucasus) // Nauka. Innovacii. Tehnologii. Stavropol': Izd-vo SKFU. 2014. №3. P. 85–98.
 12. Gacoeva N. Geroin nashego vremeni (Heroin of our time) // Severnaja Osetija, № 36, 3.03.2016. P. 4.

УДК 911.37

Белозеров В.С. [Belozеров V.S.],
Черкасов А.А. [Cherkasov A.A.]

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЭТНИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ НАСЕЛЕНИЯ РОССИИ^{1,2}

Regional Features of Shaping the Ethnic Structure in the Russian Population

В статье представлен подробный анализ динамики изменения этнической структуры населения в России во второй половине XX начале XXI века. Значительная часть работы посвящена региональным особенностям формирования этнической структуры населения регионов России, в том числе рассмотрена в разрезе городской и сельской местности. Данный анализ позволил выявить общие черты формирования этнической структуры населения у регионов, а так же обозначить их индивидуальные особенности. На основе такого ранжирования была предложена следующая типология регионов по характеру формирования этнической структуры населения: регионы с относительно стабильным этническим составом населения; регионы с активно меняющимся этническим составом населения; регионы интенсивной полиэтнизации. Достаточно важным при проведении данной типологии, является выявление регионов, у которых внутренние, этнорегиональные процессы наиболее выражены и отклоняются от средних показателей по стране. Регионы с активно меняющимся этническим составом населения и регионы интенсивной полиэтнизации требуют более пристального внимания, так как активная смена этнического состава населения может выступать конфликтогенным фактором.

The interest taken by Russian researchers in studying the ethnic structure of the Russian population is due to a number of factors. First, Russia is a multiethnic country, with both vast areas sparsely inhabited by the small peoples of the North and the Far East, and areas with various ethnic groups concentrated together – the South of Siberia, the Volga region, the North Caucasus. Second, the contemporary migration processes change the ethnic structure of the population in the Russian regions, whereas the distribution of certain peoples comes along with the change in the geography [6]. Third, it has been shown that a high rate of transformation in the ethnic structure can lead to an increase in inter-ethnic tensions in certain regions. All these factors above, revealing the comprehensive nature of the current ethnic processes, account for the respective scientific interest.

Ключевые слова: этнический состав населения, русские, регионы России.

Key words: ethnic composition of the population, Russian, regions of Russia.

Soviet and then Russian scientists have been exploring various aspects and issues associated with ethnic processes in Russia. Ethnic aspects of the population structure development have been in the focus of research projects carried out by V.M. Kabuzan, N.G. Volkova, V.S. Belozеров, O.I. Wendina, while the study of ethnic migrations have been within the scope of interest of Zh.A. Zayonchkovskaya, P.M. Polyan, S.V. Ryazantsev, N.V. Mkrtchyan, etc. [7].

1 The study was performed within the grant of President of Russian Federation (NSH–9300.2016.6 “Foreign migrants in Russia: strategies and practices of integration and adaptation in a regional community”)

2 RFBR 16-06-00179 “Development and approbation of system of geoinformation monitoring of ethno-demographic processes (on the example of regions of the North Caucasus)”

To understand the issues of interethnic interaction, it is important to refer to the studies by ethnologists and sociologists published in the works by V.A. Avksentiev, Yu.V. Arutyunyan, S.A. Arutyunov, L.N. Gumilev, L.M. Drobizheva, P.I. Kushner, V.A. Tishkov, A.A. Tsutsiev, etc.

From the stance of studying the ethnic structure of the Russian population at its present stage, it is important to investigate the regional features of the ethnic structure development. Important is to note that this process should be taken both for Russia as a whole as well as in view of the specific features of the ethnic structure of the urban and rural population.

Materials and methods

The data employed in the study was based on the All-Union (1959–1989) and the All-Russian (2002, 2010) national censuses [9]. To identify the regional features of the dynamics in the ethnic structure and classifying the Russian regions subject to the ethnic structure development (urban and rural population) the basic criterion was the change in the ratio of various ethnic groups, namely ethnic Russians as the largest group.

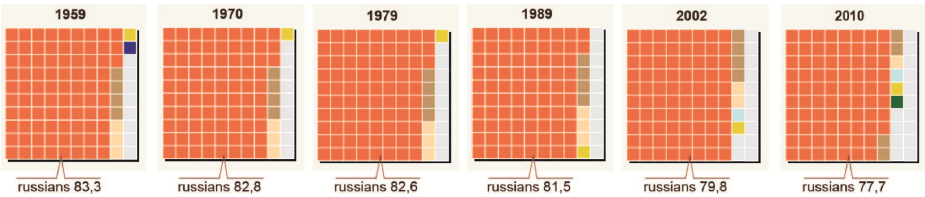
Results and discussion

Ethnic structure of the Russian population. The Russian Federation is home to more than 180 peoples the largest group being ethnic Russians. The 2010 census revealed that the group in question accounts for 111 mln people of Russia's entire population, which stands for 77.7%. Classification of the ethnic groups has shown that ethnic Russians are the only group with a count of over 100 mln, followed by 6 other ethnic groups exceeding 1 mln people each – Tatars, Ukrainians, Bashkirs, Chuvashi, Chechens, and Armenians. All these groups, apart from Armenians, account for over 1.0% of the entire population. The total share of these peoples accounts for 9.0% of Russia's entire population. There are 11 peoples with populations of 500,000 – 1,000,000 accounting for 4.7% (2010). The ethnic groups with populations varying in between 100,000 – 500,000 are 23 (3.7%). Other ethnic groups number below 100,000 accounting for 4.9% of the whole of Russia [8].

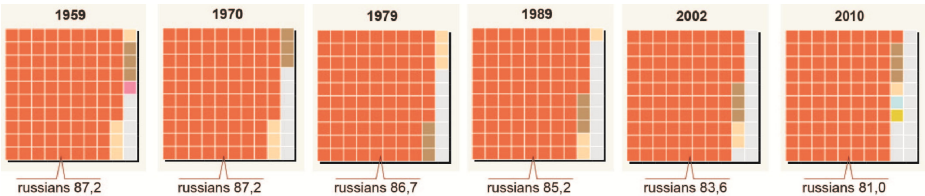
Speaking of dynamics in the ethnic structure of Russia's population we would like to note that late XX – early XXI Centuries witnessed no dramatic change in the share of the major ethnic groups; however there were certain changes some of which stand proof to significant trends.

A common trend has been a decrease in the share of ethnic Russians along with an increase in the numbers of other groups. Within the period of 1959 through 2010, the share of ethnic Russians went down by 5.6% (83.3% in 1959 to 77.7% in 2010) (Fig. 1). The decrease of ethnic Russians is accompanied with a decrease in the share of Ukrainians, Byelorussians, Jews, Germans, etc. The ethnic groups in question have been on a decrease through the post-Soviet time. During that, there has been an increase in the share of the peoples coming from the North Caucasus (ethnic-

ETHNIC DISTRIBUTION OF THE RUSSIFN POPULATION, %



ETHNIC DISTRIBUTION OF THE URBAN POPULATION IN RUSSIFN, %



ETHNIC DISTRIBUTION OF THE RURAL POPULATION IN RUSSIFN, %

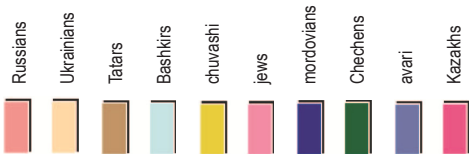
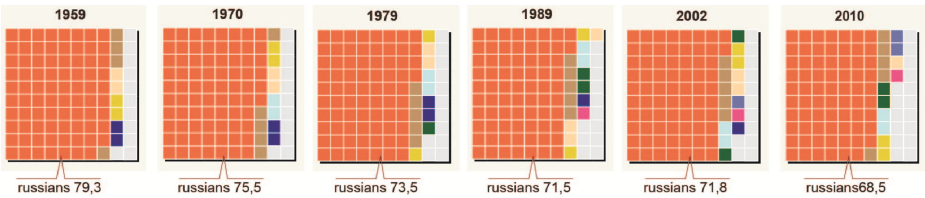


Fig. 1. Ethnic distribution of the Russian population, 1959–2010, %.

ities populating Dagestan, Chechens, etc.), Transcaucasia (Armenians, Azerbaijanis) as well as among the major groups of Middle Asia (first of all, Tajiks and Uzbeks) [4].

These processes keep changing the ethnic structure of Russia’s population. Note to be made that until 1989 the changes in the ethnic structure of the country’s population could be described as “smooth, while afterwards the pace of change in the ethnic structure has increased significantly.

When scrutinizing the ethnic structure taking into account their urban or rural belonging, note to be made that the share of

ethnic Russians in urban areas exceeds that of the rural areas (as of 2010 – urban – 81.0%; rural – 68.5%). At the same time the share of ethnic Russians in the whole of the total urban population from 1959 to 2010 went 6.2% down, while a similar decrease in the rural population was 10.8%! This demonstrates more intensive transformation of the ethnic distribution among rural population, which is largely due to the fact that most aboriginal peoples inhabiting the Northern Russia, Siberia, Far East, the North Caucasus, and the Volga region still mostly belong to rural groups that have not overcome the urbanization threshold (the share of urban population below 50%). Urbanization process is especially prominent among ethnic Russians, Ukrainians, Byelorussians, Jews, Armenians and others, which has had an effect on their presence in the structure of the urban population for several decades [2].

The transformation of Russia's ethnic structure reveals significant regional specifics. However, given all the individual scenarios for the regions of Russia there are certain features and trends common for whole groups of regions [3]. This served the basis for classifying the regions subject to their ethnic structure development.

Classification of Russia's regions depending on their ethnic structure formation. In the later XX – early XXI Centuries the changes in the regional ethnic structure were due to the ethnic specifics of the population reproduction and the migration movements; the socio-economic context; the ethnic and political factors, etc. Certain regions of Russia appear to have general trends in the changes affecting the ethnic structure while other areas demonstrate region-specific features, which offers a basis to classify Russia's regions. Within the period of 1959–2010, the share of ethnic Russians in the population of the country went 5.6% down (83.3% to 77.7%). We accepted the difference of 5.6% in the share of ethnic Russians as an average value while deviations from the value in regions would allow us making conclusions regarding the regional specifics in the ethnic dynamics. At the same time we also into view the features pertaining to the change in the share of other ethnic groups. Therefore, the values typical of Russia at large would be average ones when working with regional specifics³.

— **regions with a relatively stable ethnic structure in the population**, they are 62, can be broken into four subtypes: 1) Subtype I – the share of ethnic Russians went up by 0 to 5.6%; 2) Subtype II – the share of ethnic Russians went down by 0.1% to 5.6%; 3) Subtype III – the share of ethnic Russians went up by more than 5.6%; 4) Subtype IV – the share of ethnic Russians went down by more than 5.6%. This type can be described with a relatively stable ethnic stricture of the population. In 2010 the regions belonging to this type concentrated 90.1% of the ethnic Russians. Geographically they are located most-

ly in the European part of Russia as well as include areas that were actively developed by Russians within XVIII–XX Centuries (South European part of Russia, Siberia and Far East areas). Logically, *the Subtype of the regions where the share of ethnic Russians went more than 5.6%* should belong to areas with a stable ethnic structure because due to the increasing share of ethnic Russians the areas get more and more mono-ethnic and by the end of the period in question these regions, basically all of them, turn into areas traditionally inhabited by ethnic Russians. This is due to the fact that the regions within this Subgroup witnessed an intensive decrease in the share of other peoples. Ethnic Russians had an increase in their share at the Jewish Autonomous District, for instance, through an intensive decrease in the share of Jews, while in the Kaliningrad Area a similar increase was due to a general decrease in the number of Byelorussians, Ukrainians and Lithuanians. This picture offers a striking background against the regions, which belong to the *Subtype where the share of ethnic Russians went down by more than 5.6%*. There are eleven of such regions concentrated in the Central part of the European Russia including St. Petersburg. Apart from ethnic Russians, no other ethnicity has any significant share in the areas mentioned above.

— **regions with dynamically changing ethnic structure (14 all in all)**, can be divided into two subtypes: 1) Subtype I – mild de-Russification – a 5.6%–20.0% decrease in the share of ethnic Russians within the indicate period of time; 2) Subtype II – intensive de-Russification – the decrease in the share of ethnic Russians within 1959–2010 was over 20.0%. This type can be described with a decreasing share of ethnic Russians in the urban population of the Russian regions against an increasing share of other ethnicities. All the regions of this type are ethnic units, which can be divided into four areas. One includes the Republics of the North Caucasus and the Republic of Kalmykia, which belong to the type of mild de-Russification. The exception is the Chechen Republic as well as the Republic of Kalmykia and Ingushetia, which belong to the regions with intensive de-Russification. As for the Volga region, only the Republic of Bashkortostan there is part of areas with mild de-Russification. A third area is the southern part of East Siberia and that includes three regions, where Altai and the Republic of Buryatia are part of the Subgroup with mild de-Russification, while Tuva is a region with intensive de-Russification. A fourth area is in the eastern part of the country and includes the Republic of Yakutia (Sakha) and the Chukotka Autonomous Region that belong to the regions with mild de-Russification. In 2010 the regions of this type concentrated 3.2% of the ethnic Russian population.

— **regions revealing intensive poly-ethnization.** There are 6 of such regions and they embrace 2 Subtypes: 1) Subtype I shows an increase in the number of the ethnic Russians as well as a growth in the number of other peoples while the share of ethnic Russians in the population structure is

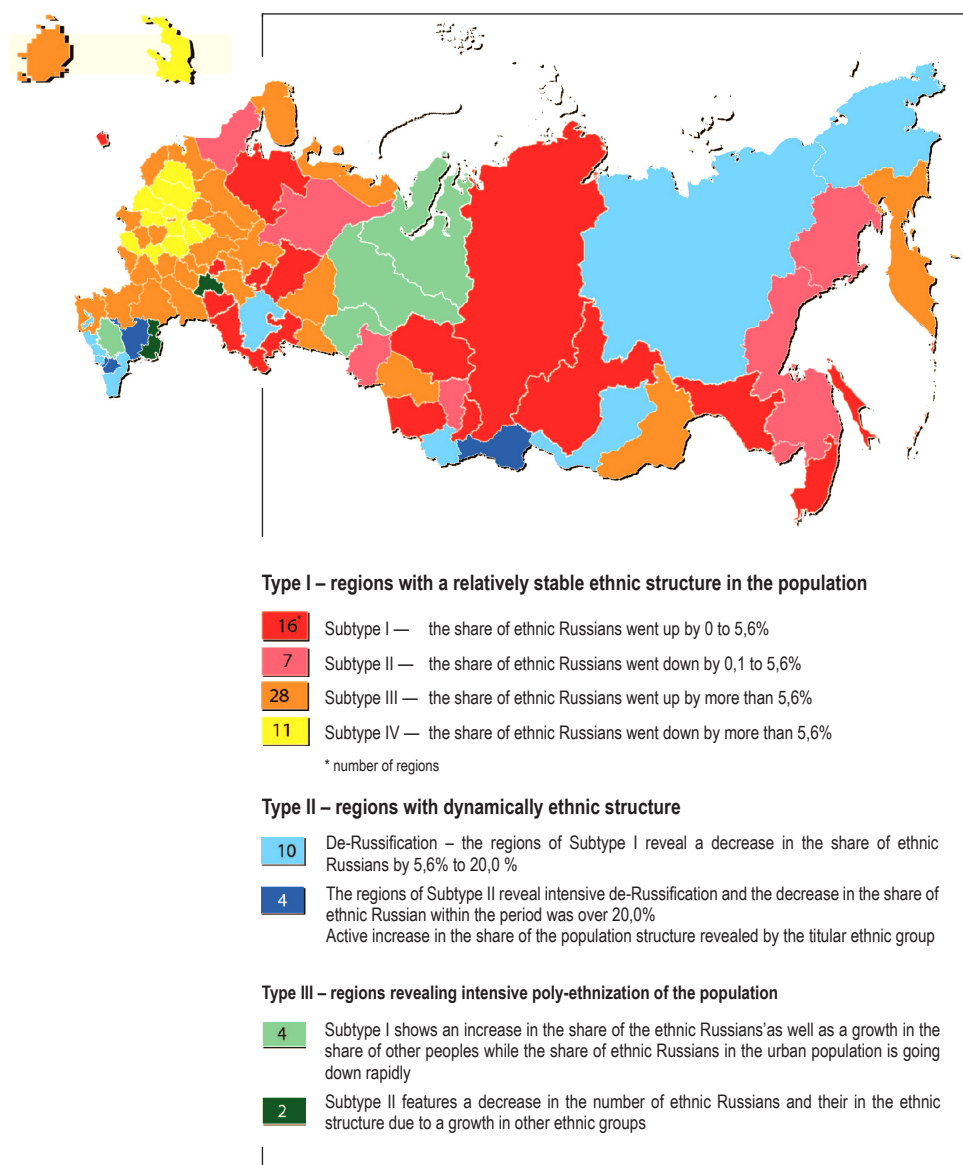


Fig. 2.

Classification of the regions of Russia based on the ethnic structure features.

going down rapidly; 2) Subtype II features a decrease in the number of ethnic Russians and their share in the ethnic structure due to a growth in other ethnic groups. Subtype I are the regions revealing active industrial progress at this current stage – the Tyumen region, the Khanty-Mansiisk Autonomous District, the Yamalo-Nenets Autonomous District as well as the Stavropol region. Subtype II has 2 regions – the Ulianovsk and the Astrakhan areas. As of 2010, the regions of this type stood for a 6.7% concentration of the ethnic Russians.

Classification of Russia's regions depending on their urban ethnic structure development. From 1959 till 2010, the share of the ethnic Russians in the urban population of Russia went down by 6.2%, (87.2% to 81.0%). The difference at 6.2% in the changing share of the urban ethnic Russians was taken as an indicator of stability.

— **regions with a relatively stable ethnic structure in the urban population** – they are 57 – can be divided into four Subtypes:

1) Subtype I – the share of ethnic Russians went up by 0 to 6.2%; 2) Subtype II – the share of ethnic Russians went down by 0.1% to 6.2%; 3) Subtype III – the share of ethnic Russians went up by more than 6.2%; 4) Subtype IV – the share of ethnic Russians went down by more than 6.2%. This type reveals a relatively stable composition of the structure in the urban population. In 2010 these regions concentrated 91.7% of the urban ethnic Russians. Geographically, this is the central part of the European Russia as well as the regions that were actively developed by ethnic Russians in the XVIII–XX Centuries (South of the European Russia, the regions of Siberia and Far East). There is also a Subtype of regions where the share of ethnic Russians went more than 6.2% down. These regions are five being located in the Central part of Russia. In these regions, no other ethnic group stands for any prominent share in the population. During that, however, the index of the share of other peoples (with a balance of below 1.0% each) taken together exceeded 10.0% in all the regions.

— **regions with dynamically changing ethnic structure in the urban population**, of them all in all, are divided into 2 Subtypes:

1) Subtype I – mild de-Russification (mono-ethnization), where the decrease in the share of ethnic Russians was 6.2%–20.0%; 2) Subtype II – intensive de-Russification and the decrease in the share of ethnic Russia within the period (1959–2010) was over 20.0%. This type of regions features a decreasing share of ethnic Russians in the urban population as well as an increase among other ethnic groups. All these regions are ethnic units. It is important to note that reliable statistic data concerning certain regions of this type is available from the year 1970 on, so the calculation embraced the period of 1970–2010. The regions that are part of this type could be conditionally divided into four areas. One embraces the republics of the North Caucasus and the Republic of Kalmykia that belong to the subgroup of intensive de-Russification. Exception here is the Republic of Adygea that reveals mild de-Russification. Another area includes the ethnic units at the Volga region and Ural and is mostly of mild de-Russification (Mordovia, Mari El, Tatarstan, Bashkortostan) except the Chuvash Republic, which is part of Subgroup II. A third area is located in the southern part of East Siberia and includes three regions where Altai and Buryatia reveal mild de-Russification unlike Tuva, which shows de-Russification of intensive type. A fourth area is in the north of East Siberia including the Magadan Area and Yakutia, which are rated

among the regions of mild de-Russification. In 2010 the regions of this type concentrated 4.9% of the urban ethnic Russian population.

— **regions revealing intensive poly-ethnization.** These are 6 and they are divided into 2 Subtypes: 1) Subtype I shows an increase in the share of ethnic Russians as well as a growth in the share of other peoples while the share of ethnic Russians in the urban population is going down rapidly; 2) Subtype II features a decrease in the number of ethnic Russians and their share in the ethnic structure due to a growth in other ethnic groups. The regions of Subtype I, if taken geographically, strike a North-to-South stretching zone, and include regions that can boast of active industrial development currently – the Tyumen region, the Khanty-Mansiisk Autonomous District, the Yamalo-Nenets Autonomous District. Subtype II embraces 2 regions – the Ulianovsk and the Astrakhan areas. As of 2010, the regions of this type concentrated 3.5% of the urban ethnic Russians.

Classification of the regions of Russia subject to their rural ethnic structure. The dynamics of the rural ethnic structure shows certain specifics. First, there is a higher rate of decrease in the ethnic Russian population compared to urban areas; second, many ethnic groups that have not overcome the urbanization threshold maintain a high reproduction rate and feature low migration mobility, which has its impact on the ethnic structure dynamics in areas that such ethnicities inhabit in a close-together fashion.

Within the period of 1959–2010, the share of ethnic Russians in the rural population of Russia went down by 10.8% (79.3% to 68.5%). We took the difference of 10.8% in the rural population structure change as a stable index.

— **regions with a relatively stable ethnic structure in the rural population,** of which there are 66, include four Subtypes: 1) Subtype I – the share of ethnic Russians went up by 0% to 10.8%; 2) Subtype II – the share of ethnic Russians went down by 0.1% to 10.8%; 3) Subtype III – the share of ethnic Russians went up by more than 10.8%; 4) Subtype IV – the share of ethnic Russians went down by more than 10.8%. This type features a relatively stable ethnic structure in the rural population. In 2010 such regions represented a concentration of 90.5% rural ethnic Russians. These regions are located all over the country. The Subgroup where the share of ethnic Russians went up more than 10.8% includes two areas in the Far East – the Primorsky and the Khabarovsk regions. Five regions make up a Subgroup where the share of ethnic Russians in the rural population went down by more than 10.8%. These are the Republic of Karelia, the Nenets Autonomous District, the Murmansk and Chita Regions. Apart from ethnic Russians, no other of the ethnic groups has a significant share in these regions.

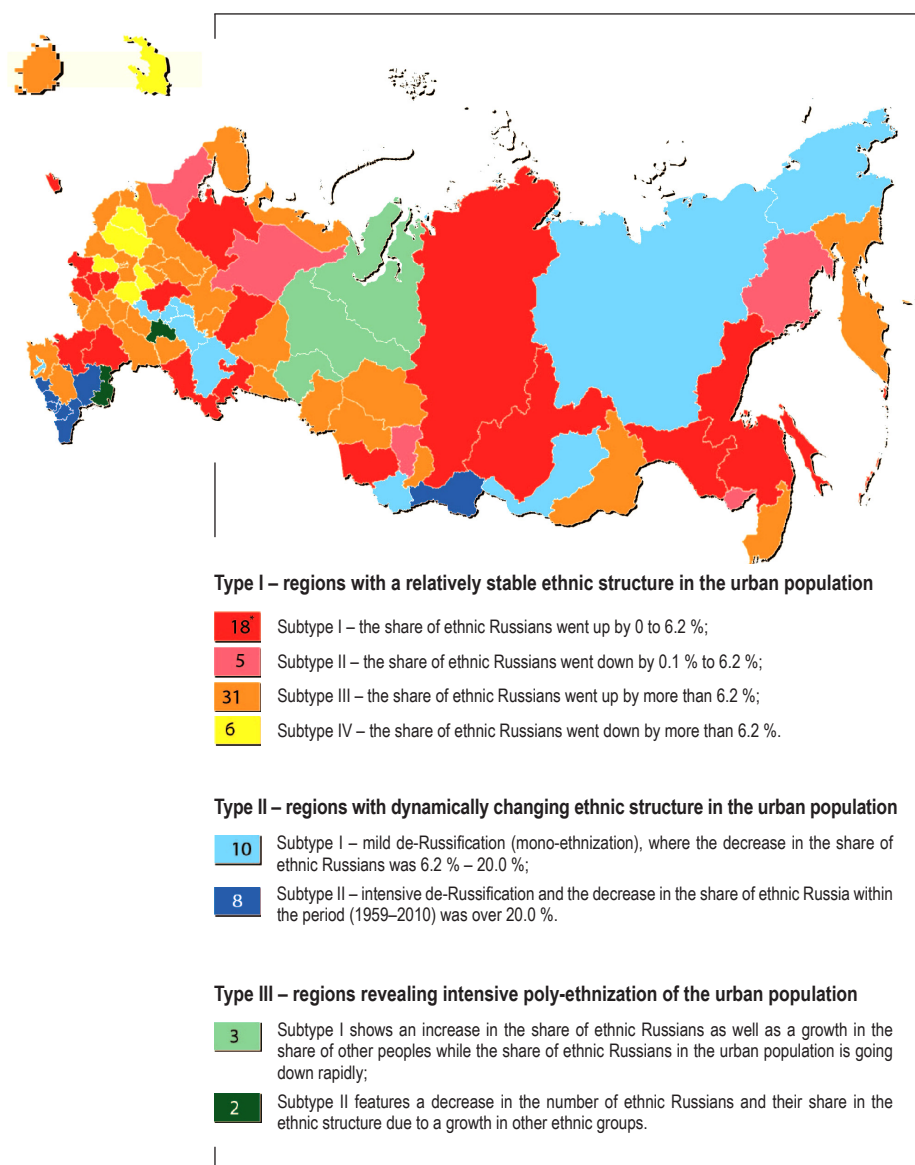


Fig. 3.

Classification of the regions of Russia based on the ethnic structure of the urban population.

— **regions with a dynamically changing ethnic structure in the rural population**, 11 of them in total, which feature two

Subtypes: 1) Subtype I – mild de-Russification – a decrease in the share of ethnic Russians by 10.8% to 20.0%; 2) Subtype II reveals intensive de-Russification and the decrease in the share of ethnic Russia within 1959–2010 was over 20.0%. This type reveals a reducing share of ethnic Russians in the ethnic structure of the rural population along with an increase in the share of other ethnicities. All these regions are ethnic units. An important note to make is that stable reliable statistics is available from the year 1970 on so our calculation embraced the period of 1970–2010. The regions that are part of this type can be conditionally divided into four areas.



Fig. 4.

Classification of the regions of Russia based on the ethnic structure of the rural population.

One of the areas includes the Republics of the North Caucasus and the Republic of Kalmykia. The regions of mild de-Russification include Karachai-Circassian Republic. The category of regions demonstrating intensive de-Russification includes the Republic of Adygea, Ingushetia, and the Chechen Republic. Another area includes the ethnic units of the Volga region and Ural, which fall mostly in the Subgroup of mild de-Russification (Mordovia, Mari El, Tatarstan, Bashkortostan), whereas the Chuvash Republic belongs to Dsubgroup II. A third ar-

ea is in the south of East Siberia embracing three regions where Altai and the Republic of Buryatia belong to the Subgroup with mild de-Russification, while Tuva shows intensive de-Russification. A fourth area is in the north of East Siberia and includes the Magadan Area and Yakutia rating among the regions of mild de-Russification. In 2010 the regions of this type accounted for 3.4% of the rural ethnic Russian population.

— **regions revealing intensive poly-ethnization of the rural population** are represented with one Subtype alone and feature a decrease in the number of ethnic Russians and their share in the ethnic structure due to a growth in other ethnic groups. In 2010 these regions presented a concentration of 6.1% of the rural ethnic Russians. These are three regions – the Stavropol Region, the Astrakhan and the Volgograd areas.

Conclusions. An analysis of the regional features of the ethnic structure in the population of Russia has revealed that whole groups of regions share common features. The most important point about carrying out this classification is the identifying the regions where internal ethno-regional processes are most pronounced and deviate from the average indices for the country. The regions with an actively changing ethnic structure of the population and the ones of intense poly-ethnization require closer attention, since an active change in the ethnic structure may act as a conflict factor.

Библиографический список

1. Белозеров В.С., Черкасов А.А. Исследование этнических аспектов урбанизации в России с помощью ГИС технологий // Вестник Ставропольского государственного университета. 2012. Вып. 80 (3). С. 183–188.
2. Белозеров А.А., Панин А.Н., Черкасов А.А. Миграции и расселение в России титульных этносов стран южного Кавказа // География и регион Пермь, 2015. С. 28–35.
3. Белозеров В.С., Черкасов А.А. Региональные особенности формирования этнической структуры городского населения России // Проблемы региональной экологии: общественно-научный журнал. 2013. №3. С. 218–220.
4. Белозеров А.А., Панин А.Н., Приходько Р.А., Чихичин В.В., Черкасов А.А. Этнический атлас Ставропольского края. Ставрополь: изд-во ФОК-Юг, 2014. 314 с.; ил.
5. Белозеров В.С., Черкасов А.А. ГИС-мониторинг этнических процессов в России // Наука. Инновации. Технологии. – Ставрополь. 2013. №1. С. 157–161.
6. Тикунов В.С., Белозеров В.С., Щитова Н.А., Панин А.Н, Черкасов А.А. Геоинформационный мониторинг: инструмент пространственно-временного анализа миграции населения // Вест-

ник Московского университета. Серия 5: География. №2. 2015. С. 33–39.

7. Черкасов А.А. Мониторинг этнических аспектов урбанизации на основе ГИС-технологий: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Ставрополь, 2013.
8. Belozero V. S., Tikunov V. S., Cherkasov A. A., Ibrahimov A., Caliskan V. Geoinformation technologies in the study of ethnic aspects of urbanization in Russia // *Geography, environment, sustainability*. 2013. №4(6). С. 19–30.
9. Федеральная служба государственной статистики. URL: <http://www.gks.ru>.

References

1. Belozero V.S., Cherkasov A.A. Issledovanie jetnicheskikh aspektov urbanizatsii v Rossii s pomoshh'ju GIS tehnologij (Research of ethnic aspects of urbanization in Russia with GIS technologies) // *Vestnik Stavropol'skogo gosudarstvennogo universiteta*. 2012. Vyp. 80 (3). S. 183–188.
2. Belozero A.A., Panin A.N., Cherkasov A.A. Migratsii i rasselenie v Rossii titul'nyh jetnosov stran juzhnogo Kavkaza (Migration and resettlement in Russia of major ethnicities of the South Caucasus countries) // *Geografija i region Perm'*, 2015. S. 28–35.
3. Belozero V.S., Cherkasov A.A. Regional'nye osobennosti formirovaniya jetnicheskoy struktury gorodskogo naseleniya Rossii (Regional features of the formation of the ethnic structure of the urban population of Russia) // *Problemy regional'noj jekologii: obshhestvenno-nauchnyy zhurnal*. 2013. No3. S. 218–220.
4. Belozero A.A., Panin A.N., Prihod'ko R.A., Chihichin V.V., Cherkasov A.A. Jetnicheskij atlas Stavropol'skogo kraja (Ethnic atlas of the Stavropol Region). Stavropol': izd-vo FOK-Jug, 2014. 314 s.; il.
5. Belozero V.S., Cherkasov A.A. GIS-monitoring jetnicheskikh processov v Rossii (GIS-monitoring of ethnic processes in Russia) // *Nauka. Innovatsii. Tehnologii*. – Stavropol'. 2013. No1. S. 157–161.
6. Tikunov V.S., Belozero V.S., Shhitova N.A., Panin A.N., Cherkasov A.A. Geoinformatsionnyj monitoring: instrument prostranstvenno-vremennogo analiza migratsii naseleniya (Geoinformation monitoring: a tool for spatio-temporal analysis of population migration) // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografija*. No2. 2015. S. 33–39.
7. Cherkasov A.A. Monitoring jetnicheskikh aspektov urbanizatsii na osnove GIS-tehnologij (Monitoring of ethnic aspects of urbanization based on GIS-technologies): avtoref. dis. ... kand. geogr. nauk. Stavropol', 2013.
8. Belozero V. S., Tikunov V. S., Cherkasov A. A., Ibrahimov A., Caliskan V. Geoinformation technologies in the study of ethnic aspects of urbanization in Russia // *Geography, environment, sustainability*. 2013. No4(6). S. 19–30.
9. Federal'naja sluzhba gosudarstvennoj statistiki (Federal State Statistics Service). URL: <http://www.gks.ru>.

УДК 622.279.7

Гасумов Р.А. [Gasumov R.A.]
Костюков С.В. [Kostyukov S.V.],
Овчаров С.Н. [Ovcharov S.N.],
Мочалов В.П. [Mochalov V.P.],
Фёдорова Н.Г. [Fedorova N.G.],
Нифантов В.И. [Nifantov V.I.]

ЖИДКОСТИ ГЛУШЕНИЯ ДЛЯ ГАЗОВЫХ И ГАЗОКОНДЕНСАТНЫХ СКВАЖИН С ПОВЫШЕННЫМИ ПЛАСТОВЫМИ ТЕМПЕРАТУРАМИ

**Fluids for killing gas and gas condensate wells
with high formation temperatures**

В статье проведен анализ различных типов жидкостей глушения, которые могут быть использованы при проведении ремонтных работ на газовых и газоконденсатных скважинах с повышенными пластовыми температурами. Определено, что жидкости глушения на эмульсионной основе или полимерные растворы (без твердой фазы) имеют ряд недостатков существенно ограничивающих их применение в таких условиях. Теоретически обоснована возможность и перспективность использования в качестве жидкости глушения в условиях повышенных пластовых температур составов с конденсированной твердой фазой. В статье также отмечено, что образующаяся в растворе твердая фаза должна относиться к кислоторастворимым химическим соединениям, обеспечивая возможность полного удаления ее частиц из призабойной зоны пласта при кислотных обработках.

The article analyses various types of well-kill fluids that can be used when carrying out repair work of gas and gas condensate wells with high formation temperatures. Killing fluids based on the emulsion or polymer solution (without solid phase) are determined to have a number of disadvantages which significantly limit their use in such conditions. The possibility and perspectives of using the compounds with a condensed solid phase as killing fluids under high formation temperatures are theoretically proved. The article also notes that the solution formed in the solid phase is supposed to treat as acid chemical compounds and provide the possibility of complete removal of its particles from the bottomhole formation zone during acidic treatments.

Ключевые слова: жидкость глушения, капитальный ремонт скважин, глушение скважины, пластовая температура, конденсируемая твердая фаза, газовая скважина.

Key words: well killing fluids, workover, well killing, formation temperature, condensed solid phase, gas well.

Введение

Проведение работ по глушению газовых и газоконденсатных скважин с повышенными пластовыми температурами зачастую является достаточно сложной технологической задачей. Это обусловлено тем, что при повышении температуры многие химические реагенты (полимеры, поверхностно-активные вещества (ПАВ), органические наполнители), входящие в состав технологических жидкостей, особенно в присутствии солей неустойчивы в растворе. В результате этого происходит ухудшение свойств жидкостей глушения и как следствие снижение эффективности их применения. Во многих случаях это может иметь значительные негативные последствия: ава-

рийные ситуации на скважине, ухудшение коллекторских свойств пластов за счет больших поглощений технологических жидкостей в процессе проведения ремонтных работ (приводит к загрязнению призабойной зоны пласта (ПЗП) скважины, набуханию глинистого материала пласта и другим последствиям), существенное снижение производительности скважины в послеремонтный период.

Материалы и методы исследования

Физико-химические и технологические свойства (плотность, условная вязкость, показатель фильтрации, водородный показатель) разработанной жидкости глушения были определены в соответствии с методиками, описанными в работе [1].

Исследования по определению влияния разработанной жидкости глушения на набухание горных пород были произведены по методике К.Ф. Жигача и А.Н. Ярова, учитывающей начальную пористость образца и объем иммобилизованной жидкости. По данной методике существующие методы оценки характера взаимодействия разрабатываемого состава с глинистой породой базируются на исследовании процесса гидратации по коэффициентам набухания, размокания и скорости увлажнения.

Исследования проводили на приборе для определения набухания и размокания грунтов ПНГ-1. Для изучения кинетики набухания отсчет по шкале индикатора производили через следующие промежутки времени (считая от начала опыта) в минутах: 1; 2; 3; 4; 5; 10; 15; 30; 60; 90; 180; 240 и так далее. Опыт по определению величины свободного набухания в приборах считали законченным, если показания индикатора в течение суток изменились не более чем на 0,05 мм. В качестве образца сравнения использовали дистиллированную воду.

Исследования проводились на натуральных кернах Северо-Ставропольского месторождения: керны, представленные мергелем мелоподобным (содержание глинистых фракций – до 70 %, пористость 27,8–33,6 %, минералогическая плотность 2,48–2,63 г/см³, интервал залегания 787–793 м); керны, представленные аргиллитом (глубина залегания 3832–3837 м).

Результаты исследования и их обсуждение

Основной функцией жидкости глушения является препятствование поступлению пластового флюида в ствол скважины в течении проведения ремонтных работ. Это обеспечивается за счет создания гидростатического давления на пласт превышающего пластовое и формирование в ПЗП фильтрационной корки, препятствующей значительному поглощению жидкости глушения.

В настоящее время известно большое количество жидкостей глушения. Их условно можно подразделить на жидкости на водной, эмульсионной и угле-

водородной основе. Для газовых и газоконденсатных скважин как правило применяют жидкости первого или второго типа. Это обусловлено особенностями условий применения. Поверхность поровых каналов коллекторов газовых и газоконденсатных скважин является гидрофильной. Вследствие этого используемые растворы также должны быть гидрофильными, что обеспечивает качественное сцепление фильтрационной корки с породой пласта, препятствуя фильтрации жидкости глушения в процессе проведения ремонтных работ.

В газовой промышленности в качестве жидкостей глушения широко применяются растворы на основе прямых эмульсий [2–8]. Они имеют ряд существенных преимуществ:

- высокая стабильность,
- оптимальные реологические свойства,
- низкая фильтрация,
- инертность к породам продуктивного пласта, пластовым флюидам и подземному оборудованию,
- высокая технологичность в приготовлении.

Кроме того эмульсионные растворы имеют высокие ингибирующие свойства по отношению к набуханию глин пласта, что имеет огромное значение при проведении работ на скважинах с пластами, в которых в качестве цементирующего материала выступают глинистые минералы.

Состав эмульсий достаточно прост и как правило включает воду, углеводородную жидкость (нефть, стабильный газовый конденсат или дизельное топливо) и эмульгатор. Для обеспечения необходимых характеристик (реологических свойств, плотности, pH) жидкость глушения на эмульсионной основе может также содержать полимер и другие функциональные добавки (соли, лигносульфонатные реагенты, кислоты или щелочи).

При всех этих достоинствах эти технологические жидкости большей частью не применимы в условиях повышенных пластовых температур. Это обусловлено комплексом причин, главная из которых заключается в нарушении их устойчивости при повышении температуры. Это можно объяснить двумя причинами:

- повышением мобильности дисперсной фазы и увеличением ее размеров вследствие термического расширения жидкости,
- снижением эффективности эмульгатора при температурах превышающих температуру его помутнения.

Эмульсия – это дисперсная система, в которой в зависимости от ее типа либо вода является дисперсионной средой, а углеводородная жидкость – дисперсной фазой (прямая эмульсия), либо наоборот (обратная эмульсия). Такая система имеет низкую стабильность во времени и поэтому

требует применения стабилизирующего агента – эмульгатора. Его функция заключается в создании вокруг дисперсной фазы (капель несмешивающейся жидкости) оболочки из молекул ПАВ, которые обеспечивают снижение поверхностного натяжения на границе фаз, тем самым препятствуя коалесценции капель дисперсной фазы и седиментации системы в целом. Дисперсная фаза в эмульсии подчиняется законам теплового движения. Мицеллы движутся хаотично причем с повышением температуры их скорость заметно увеличивается. Это приводит к существенному увеличению числа столкновений капель дисперсной фазы друг с другом и повышению вероятности их слияния (коалесценции). Подобная ситуация наблюдается также при повышении температуры выше порога помутнения используемого ПАВ (для многих ПАВ он находится в интервале 50–80 °С). При этом происходит деформация молекул эмульгатора в результате которой он перестает выполнять свои функции. Это приводит к расслоению раствора с потерей его технологических и физико-химических свойств. В присутствии солей в жидкости глушения этот процесс может значительно интенсифицироваться.

Осложняет ситуацию также то, что применяемые эмульгаторы как правило имеют сложный состав и содержат различные по структуре молекулы (жирные спирты, сложные эфиры и другие). Поэтому для многих ПАВ характерен некоторый интервал температур помутнения. В следствие этого достаточно сложно спрогнозировать поведение раствора в конкретных термо-барических условиях.

Также в качестве жидкостей глушения находят применение растворы на полимерной основе [9, 10]. Как правило в их состав входит полимер (или какой-либо комплексный полимерный реагент), функциональные добавки и вода. В качестве функциональных добавок могут использоваться ПАВ, соли, спирты и другие химические соединения, обеспечивающие необходимые характеристики жидкости глушения (плотность, реологические свойства, ингибирование набухания глин, устойчивость к биоразложению и другие) [10]. Такие системы представляют собой истинные растворы. Они термодинамически устойчивы и имеют ряд существенных преимуществ: высокая термостабильность (в зависимости от выбранного полимера); возможность регулирования физико-химических свойств в широких пределах; низкая фильтрация; высокая технологичность в приготовлении; взрывопожаробезопасность; экологичность применения.

Значительным недостатком такого рода жидкостей глушения является то, что в процессе проведения работ возможно их глубокое проникновение в продуктивный пласт и образование в его порах устойчивых полимерных образований (пленок, мембран), которые в зависимости от типа связей с частицами пород пласта могут не удаляться в процессе освоения скважины и соответственно приводить к существенному снижению коллекторских свойств пласта. Это обусловлено тем, что фильтрационная корка при применении полимерных

жидкостей глушения образуется благодаря структурированию полимерных молекул, которые связываются между собой и с породами пласта за счет большого числа функциональных групп (гидроксильных, карбоксильных и других). Но при всем при этом такие структуры как правило достаточно подвижны в пористой среде и легко проникают в коллектор, тампонируя его поры.

Исходя из этого жидкости глушения на эмульсионной и полимерной основе ограниченно могут применяться при проведении ремонтных работ на газовых и газоконденсатных скважинах с повышенными пластовыми температурами.

Более предпочтительными в таких условиях являются жидкости глушения на водной основе содержащие твердые частицы неорганических веществ (наполнитель) и функциональные добавки. В отличие от эмульсий и полимерных растворов такие составы являются стабильными при повышенных температурах и в то же время их фильтрационные корки кроме полимерной части содержат также частицы наполнителя, создающие объемно структурированную полимер-минеральную структуру, которая значительно менее способна к формированию пленок на стенках поровых каналов коллектора. Важным условием для такого рода жидкостей глушения является кислоторастворимость применяемого наполнителя и высокая однородность его распределения по объему раствора.

Наиболее полно этим свойствам удовлетворяют растворы с кислоторастворимой конденсируемой твердой фазой, образующейся в результате химических превращений в процессе приготовления состава.

К достоинствам таких технологических жидкостей следует отнести следующее: конденсируемая твердая фаза жидкости глушения имеет конкретный заданный химический состав с минимальным содержанием неконтролируемых примесей, что обеспечивает ее полное растворение в процессе кислотной обработки; количество твердой фазы может изменяться в широких пределах в зависимости от поставленной задачи (оно пропорционально содержанию образующих ее солей); твердая фаза образуется в жидкости глушения в результате химического взаимодействия компонентов, что обеспечивает повышение технологичности процесса приготовления и высокую однородность распределения твердой фазы в объеме раствора (в отличие от наполнителей вводимых дополнительно); жидкости глушения с конденсируемой твердой фазой обладают высокой стабильностью в широком интервале температур, они взрывопожаробезопасны, экологичны в применении.

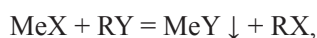
Такие жидкости глушения как правило содержат солевые реагенты, обеспечивающие образование твердой фазы в растворе, стабилизирующие добавки (полимеры, соли) и воду [11, 12]. Формирование частиц твердой фазы происходит во время приготовления жидкости глушения. Важно отметить, что вводимые добавки имеют значительное влияние как на размер частиц так и на их форму. При этом в отличие от эмульсий растворы с конденсирован-

ной твердой фазой могут быть стабилизированы за счет побочных продуктов химических реакций, протекающих в растворе, или с применением дополнительных солевых добавок. Этим во многом и обуславливается высокая термостабильность такого рода жидкостей глушения.

ОАО «СевКавНИПИГаз» имеет большой опыт разработки технологических жидкостей и технологий глушения скважин для месторождений с различными горно-геологическими и климатическими условиями [2, 3, 6, 8, 11, 12]. Однако, несмотря на высокую эффективность разработанных ранее технологических жидкостей на сегодняшний день в связи с возросшими требованиями к их параметрам вопрос усовершенствования и разработки новых составов остается по-прежнему актуальным.

На основе экспериментальных исследований в ОАО «СевКавНИПИГаз» была разработана жидкость глушения с конденсируемой твердой фазой, выбранной из числа кислоторастворимых химических соединений. Она обладает низкой фильтрацией (показатель фильтрации составляет порядка 5–6 мл /30 минут), высокой стабильностью при температурах до 150 °С, имеет плотность до 1070 кг/м³, условную вязкость в пределах 40–80 секунд, нейтральное pH, обеспечивает ингибирование набухания глинистого материала пласта.

В состав разработанной жидкости глушения входят водорастворимая соль кальция, стабилизирующие добавки (соли щелочных металлов), полимерный реагент и вода. Конденсируемая твердая фаза представляет собой по химическому составу кислоторастворимую соль кальция и его гидроксид. Частица твердой фазы образуется в растворе в результате протекания ряда конкурирующих химических реакций. В качестве основной можно рассматривать обменную реакцию следующего типа:



где Me – ион кальция,
X, Y – кислотные остатки используемых солей,
R – химический радикал (как правило, неорганический).

В результате протекания указанной реакции формируются частицы соли кристаллического строения. Их форма определяется типом симметрии кристаллической решетки характерной для данного химического соединения.

Кроме основной в растворе также протекают побочные реакции, приводящие к образованию гидроксида кальция в виде аморфных частиц (характерно для гидроксидов щелочно-земельных элементов). Это обусловлено гидролизом входящих в состав жидкости глушения солей и химическим взаимодействием его продуктов между собой. Интенсивность этого процесса существенно зависит от активности анионов (кислотных остатков) выбранных солей

и от их концентрации. Поэтому в зависимости от соотношения концентраций солей образующих конденсируемую твердую фазу и их природы возможно получение жидкостей глушения с частицами различного фракционного состава (различное соотношение кристаллических и аморфных частиц), что позволит применять ее при проведении ремонтных работ в газовых и газоконденсатных скважинах с неоднородными по проницаемости коллекторами.

В качестве стабилизирующих добавок использованы неорганические соли и полимерный реагент. Действие солевой добавки основано на адсорбции ионов на поверхности зарождающейся конденсированной твердой фазы с образованием двойного электрического слоя препятствующего росту частиц и их седиментации. При этом важно отметить, что такая система достаточно устойчива в условиях изменяющейся температуры в следствие высокой термической и химической стабильности ионов щелочных элементов в водных средах.

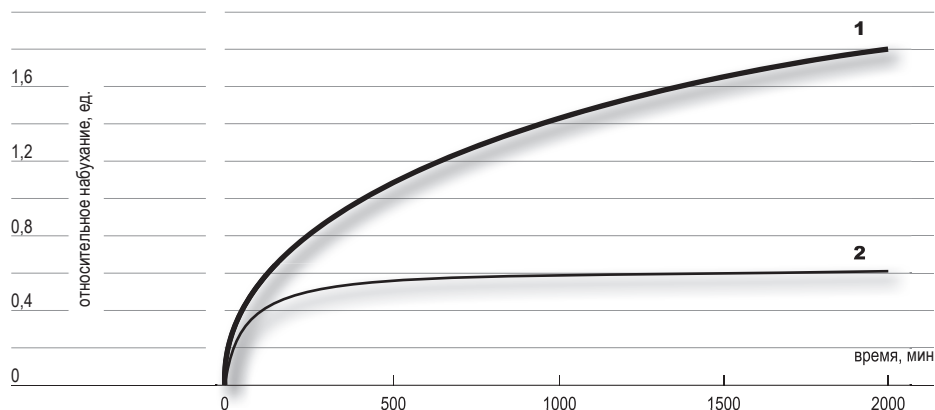
Стабилизирующее действие полимерного реагента основано на снижении подвижности частиц конденсированной твердой фазы в растворе. Это обусловлено структурированием жидкости глушения за счет взаимодействия полимерных молекул с молекулами воды, частицами зарождающейся дисперсной фазы и друг с другом. Использованный в разработанной жидкости глушения полимерный реагент выбран из числа термостойких, что обеспечивает стабильность системы при температурах до 150 °С.

Также разработанная жидкость глушения обладает высокими ингибирующими свойствами по отношению к глинам различного минералогического состава. Это обусловлено следующим: в жидкости глушения содержатся соли щелочных металлов, обеспечивающие протекание обменных процессов при взаимодействии с глинистой породой (по катионному механизму); полимерная составляющая жидкости глушения обеспечивает образование адсорбционных структур на глинистых частицах, что препятствует их гидратации.

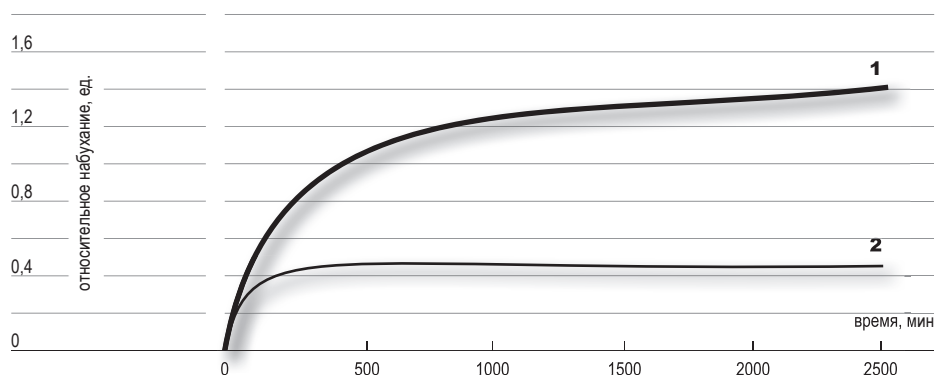
Результаты исследования влияния жидкости глушения с конденсируемой твердой фазой на набухание различных глинистых пород представлены на рисунке 1. Таким образом применение в качестве жидкостей глушения составов с кислоторастворимой конденсируемой твердой фазой позволит обеспечить качественное и безопасное проведение ремонтных работ на газовых и газоконденсатных скважинах с повышенными пластовыми температурами. Это обусловлено теоретическими предпосылками и рядом неоспоримых достоинств такого рода технологических жидкостей.

Выводы

В результате анализа теоретических данных и практического опыта исследований в процессе разработки жидкостей глушения на эмульсионной и полимерной основе было установлено, что такие технологические жидкости, несмотря на высокую эффективность их использования в различ-



1 – дистиллированная вода,



2 – разработанная жидкость глушения

Рис. 1. Влияние жидкости глушения с конденсируемой твердой фазой на набухание мелоподобного мергеля (а) и аргиллита (б).

ных скважинных условиях, зачастую ограниченно применимы при проведении ремонтных работ на газовых и газоконденсатных скважинах с повышенными и высокими пластовыми температурами. Это обусловлено рядом причин, наиболее значимые из которых: низкая термостабильность и неудовлетворительные технологические свойства жидкостей глушения в условиях применения. На основе лабораторных и стендовых исследований выявлено, что для глушения скважин с повышенными пластовыми температурами перспективным является применение жидкостей глушения с кислоторастворимой конденсируемой твердой фазой. Их использование позволит обеспечить качественное и безопасное проведение ремонтных работ на газовых и газоконденсатных скважинах с повышенными пластовыми температурами, что обусловлено теоретическими предпосылками и рядом неоспоримых достоинств такого рода технологических жидкостей.

Библиографический список

1. Рязанов Я.А. Энциклопедия по буровым растворам. Оренбург: Издательство «Летопись», 2005. 664 с.
2. Гасумов Р.А., Минликаев В.З. Техника и технология ремонта скважин: монография в 2-х т. М.: Газпром экспо, 2013. Т. 1. 360 с.
3. Гасумов Р.А., Минликаев В.З. Повышение и восстановление производительности газовых и газоконденсатных скважин: монография. М.: Газпром экспо, 2010. 477 с.
4. Гилаев Г.Г., Хисметов Т.В., Бернштейн А.М., Заворотный В.Л., Заворотный А.В. Применение термостойких жидкостей глушения на основе нефтяных эмульсий // Нефтяное хозяйство. 2009. № 8. С. 64–66.
5. Gladkov P. Development of a new well-killing fluid based on oil-wetting agent Ng-1 for polymineral low-permeable reservoirs // World Applied Sciences Journal. 2014. № 31 (6). P. 1078–1081.
6. Гасумов Р.А., Шихалиев И.Ю., Жуков Е.А. Опыт применения эффективных разработок «СевКавНИПИгаз» при оказании сервисных услуг на скважинах подземных хранилищ газа ПАО «Газпром» // Газовая промышленность. 2015. № 11. С. 54–58.
7. Силин М.А., Магадова Л.А., Акимов О.В., Ануфриев В.П., Лопухов М.А. Передовые технологии глушения скважин // Нефтяное хозяйство. 2015. № 1. С. 66–70.
8. Шихалиев И.Ю., Шихалиева И.С., Седярова В.Д., Шихалиева И.И. Эффективность применения облегченных эмульсий для глушения скважин при ремонтно-восстановительных работах в продуктивных пластах с аномально низкими пластовыми давлениями // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2014. № 6. С. 34–38.
9. Попова Ж.С. Экологически чистые технологические растворы для бурения и ремонта скважин // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2010. № 4. С. 45–46.
10. Силин М.А., Магадова Л.А., Гаевой Е.Г., Губанов В.Б., Магадов В.Р., Елисеев Д.Ю. Применение жидкостей глушения на полисахаридной основе в скважинах с низким давлением и после гидроразрыва пласта // Нефтяное хозяйство. 2010. № 4. С. 104–106.
11. Гасумов Р.А., Гаврилов А.А., Вагина Т.Ш. Гидросолегелевый блокирующий состав и технология его применения на скважинах Западно-Сибирского нефтегазового бассейна // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2009. № 10. С. 34–36.
12. Гасумов Р.А., Вагина Т.Ш., Гаврилов А.А. Глушение скважин с временным блокированием продуктивного пласта на газовых скважинах с АНПД месторождений Крайнего Севера // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2007. № 9. С. 37–40.

References

1. Rjazanov Ja.A. Jenciklopedija po burovym rastvoram (Encyclopedia of drilling fluids). Orenburg: Izdatel'stvo «Letopis'», 2005. 664 s.
2. Gasumov R.A., Minlikaev V.Z. Tehnika i tehnologija remonta skvazhin (Engineering and technology of well workover): monografija v 2-h t. M.: Gazprom jekspo, 2013. T. 1. 360 s.
3. Gasumov R.A., Minlikaev V.Z. Povyshenie i vosstanovlenie proizvoditel'nosti gazovyh i gazokondensatnyh skvazhin (Increase and recovery of productivity of gas and gas condensate wells): monografija. M.: Gazprom jekspo, 2010. 477 s.
4. Gilaev G.G., Hismetov T.V., Bernshtejn A.M., Zavorotnyj V.L., Zavorotnyj A.V. Primenenie termostojkih zhdkostej glushenija na osnove neftjanyh jemul'sij (The use of heat-resistant fluids based on oil emulsions) // Neftjanoe hozjajstvo. 2009. № 8. S. 64–66.
5. Gladkov P. Development of a new well-killing fluid based on oil-wetting agent Ng-1 for polymineral low-permeable reservoirs (Development of a new well-killing fluid based on oil-wetting agent Ng-1 for polymineral low-permeable reservoirs) // World Applied Sciences Journal. 2014. № 31 (6). R. 1078 - 1081.
6. Gasumov R.A., Shihaliyev I.Ju., Zhukov E.A. Opyt primeneniya jeffektivnyh razrabotok OAO «SevKavNIPlgaz» pri okazanii servisnyh uslug na skvazhinah podzemnyh hranilishh gaza PAO «Gazprom» (Experience in the use of efficient JSC «SevKavNIPlgaz» technologies when rendering services in the wells of underground gas storages of Gazprom) // Gazovaja promyshlennost'. 2015. № 11. S. 54–58.
7. Silin M.A., Magadova L.A., Akimov O.V., Anufriev V.P., Lopuhov M.A. Peredovye tehnologii glushenija skvazhin (Advanced technologies of wells killing) // Neftjanoe hozjajstvo. 2015. № 1. S. 66–70.
8. Shihaliyev I.Ju., Shihaliyeva I.S., Sedljarova V.D., Shihaliyeva I.I. Jeffektivnost' primeneniya oblegchennyh jemul'sij dlja glushenija skvazhin pri remontno-vosstanovitel'nyh rabotah v produktivnyh plastah s anomal'no nizkimi plastovymi davlenijami (The effectiveness of using the lightweight emulsion for killing of wells during repair and renewal works in the reservoirs with abnormally low formation pressures) // Stroitel'stvo neftjanyh i gazovyh skvazhin na sushe i na more. 2014. № 6. S. 34–38.
9. Popova Zh.S. Jekologicheski chistye tehnologicheskie rastvory dlja burenija i remonta skvazhin (Environmentally friendly technological solutions for drilling and workover of wells) // Stroitel'stvo neftjanyh i gazovyh skvazhin na sushe i na more. 2010. № 4. S. 45–46.
10. Silin M.A., Magadova L.A., Gaevoj E.G., Gubanov V.B., Magadov V.R., Eliseev D.Ju. Primenenie zhdkostej glushenija na polisaharidnoj osnove v skvazhinah s nizkim davleniem i posle gidrorazryva plasta (Application of killing fluids based on polysaccharide in low pressure wells after fracturing) // Neftjanoe hozjajstvo. 2010. № 4. S. 104–106.
11. Gasumov R.A., Gavrilov A.A., Vagina T.Sh. Gidrosolegelevyj blokirujushhij sostav i tehnologija ego primeneniya na skvazhinah Zapadno-Sibirskogo neftegazovogo bassejna (Hydro-salt-gel blocking composition and technology of application in the wells of Western Siberia oil and gas basin) // Stroitel'stvo neftjanyh i gazovyh skvazhin na sushe i na more. 2009. № 10. S. 34–36.
12. Gasumov R.A., Vagina T.Sh., Gavrilov A.A. Glushenie skvazhin s vremennym blokirovaniem produktivnogo plasta na gazovyh skvazhinah s ANPD mestorozhdenij Krajnego Severa (Killing of wells with temporary blocking of the producing formation in gas wells with abnormally low formation pressures at fields of the Far North) // Stroitel'stvo neftjanyh i gazovyh skvazhin na sushe i na more. 2007. № 9. S. 37–40.

УДК 622.244

Гасумов Р.Р. [Gasumov R.R.],
Осадчая И.Л. [Osadchaya I.L.],
Копченков В.Г. [Kopchenkov V.G.],
Бекетов С.Б. [Beketov S.B].

НАПОЛНИТЕЛИ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ К БЛОКИРУЮЩИМ СОСТАВАМ ДЛЯ ГЛУШЕНИЯ СКВАЖИН

**Fillers of plant origin to blocking compositions
for well killing**

Проведение ремонтно-восстановительных работ в скважинах газовых и газоконденсатных месторождений, находящихся на поздней стадии разработки, отличается повышенной сложностью в силу геолого-технической ситуации. При применении традиционных жидкостей глушения высокая инфильтрация этих растворов в условиях высокой репрессии способствует образованию значительной зоны их проникновения в пласт, что резко ухудшает фильтрационные характеристики пласта и создаёт ряд трудноразрешимых проблем при освоении скважин после ремонта. В статье приводится анализ свойств и поиск различных материалов, потенциально обладающих блокирующими параметрами, рассматриваются особенности применения наполнителей растительного происхождения к технологическим жидкостям, используемых при ведении ремонтных работ в скважинах с целью качественного глушения скважин с временным блокированием продуктивного пласта. Результаты проведенных экспериментальных исследований показали, что реагенты-наполнители растительного происхождения на основе отходов сельскохозяйственного производства позволяют получить пенообразующую систему, выдерживающую высокий перепад давления на пласт, способную в процессе глушения скважины блокировать призабойную зону и при низких депрессиях легко удаляться из пласта, полностью сохранив его проницаемость.

Repair and recovery works in wells of gas and gas condensate fields at the late stage of development are characterized by increased complexity due to the geological and technical situation. High infiltration of traditional well-killing fluids under conditions of high repression promotes the formation of a significant zone of their penetration into the formation which sharply worsens the filtration characteristics of the formation and creates a number of intractable problems in the development of wells after repair. The article gives the analysis of properties and search for various materials potentially possessing blocking parameters. The peculiarities of using plant-based fillers to process fluids used in repair work in wells for the purpose of qualitative killing of wells with temporary blocking of the productive formation are considered. The results of the experimental researches showed that the agents-fillers based on agricultural waste products make it possible to obtain a foaming system withstanding high pressure drop on the formation capable of blocking the bottomhole zone in the process of killing the well and at low depressions easily removable from the formation, completely retaining its permeability.

Ключевые слова: скважина, глушение, блокирование призабойной зоны пласта, технологические жидкости, наполнитель, травяная мука (ТМ), пенообразующая жидкость (ПОЖ), пеноэмульсии, фильтрационно-емкостные свойства.

Key words: well, killing, blocking the bottomhole formation zone, process fluids, filler, herbal flour, foaming fluid, foam emulsion, filtration-capacitive properties.

Введение

Одной из проблем нефтегазовой промышленности является общее сокращение объемов добычи углеводородного сырья, связанное с тем, что эксплуатация многих газовых и газоконденсатных месторождений

находится на поздней стадии разработки, которая сопровождается различными осложнениями, в том числе старением основного скважинного фонда и падением уровня добычи газа и газоконденсата. С целью восстановления и поддержания производительности скважин необходимо проведение в них ремонтно-восстановительных работ. Одним из основных этапов в комплексе проводимых геолого-технических мероприятий является глушение и освоение скважин с применением специальных жидкостей. Основными требованиями к качеству проводимых работ в скважинах является сохранение фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) продуктивного пласта, которое зависит от свойств применяемых технологических жидкостей [1–3].

Материалы и методы исследований

С целью совершенствования составов технологических жидкостей, применяемых для блокирования призабойной зоны продуктивных пластов при глушении и освоении скважин, были проведены многочисленные теоретические, лабораторные и экспериментальные исследования для изучения возможности использования различных реагентов-наполнителей растительного происхождения к жидкостям глушения, а также технологии их приготовления.

Результаты исследований и их обсуждение

Травяную муку (ТМ) как наполнитель жидкости глушения готовят из растительных отходов зерновых хлебов или зернобобовых, или масличных, или прядильных культур, или смеси трав однолетних и многолетних растений, богатых протеином и клетчаткой. Для приготовления муки могут быть также использованы солома и мякина.

К зерновым культурам относятся пшеница, рожь, ячмень, овес, кукуруза, просо, сорго, рис, гречиха; к зернобобовым – горох, соя, люпин, фасоль, кормовые бобы, чина, нут, чечевица; к масличным – подсолнечник, рапс, арахис, кунжут; к прядильным – хлопок, лён, конопля; к однолетним растениям – донник, вика, сераделла, суданская трава; к многолетним – пырей, клевер, райграс, тимopheевка и др.

Состав сырья для приготовления травяной муки, мас. %: протеин 4,4–16,9; жир 1,3–7,5; клетчатка 26,4–42,9; безазотистые экстрактивные вещества (БЭВ) 36,2–48,7; зола 7,5–16,5 (табл. 1).

В группу БЭВ входят моносахариды (глюкоза, фруктоза, галактоза, арабиноза, манноза, ксилоза), дисахариды (мальтоза, лактоза, сахароза), несахароподобные полисахариды (крахмал, пектины, гemicеллюлозы), растительные гумми и слизи, пигменты, смолы, танины, органические кислоты и т.д. [4].

Исходное сырьё для приготовления травяной муки из сельскохозяйственных культур или их отходов предварительно измельчается в сечку с раз-

Таблица 1. ОСНОВНОЙ ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ТРАВЯНОЙ МУКИ, ИЗГОТОВЛЕННОЙ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР И ИХ ОТХОДОВ

Сырьё для приготовления травяной муки	Химический состав, мас. %				
	протеин	жир	клетчатка	БЭВ	зола
Трава естественных угодий	13,0	2,9	28,5	45,3	10,3
Однолетние травы	13,2	3,0	26,4	45,6	11,8
Многолетние травы	14,4	3,4	29,2	44,3	8,7
Смеси:					
– бобовых культур	16,9	2,6	27,3	42,6	10,6
– злаковых культур	11,7	2,9	27,9	48,7	8,8
– злаково-бобовых культур	12,9	3,0	27,7	47,5	8,9
Подсолнечник	11,7	7,5	29,7	39,3	11,7
Кукуруза	10,6	2,9	27,9	48,7	8,8
Сорго	15,4	2,7	19,7	54,8	7,4
Мякина:					
– пшеничная	9,0	1,3	37,0	36,2	16,5
– гречишная	12,6	–	26,6	47,2	13,6
– соевая	15,2	5,7	29,2	40,8	9,1
Солома:					
– пшеничная	4,4	1,6	42,9	43,3	7,8
– гречишная	7,5	1,8	37,6	42,4	10,7
– суданской травы	5,8	1,4	40,4	44,8	7,5

мером частиц до 100 мм в агрегатах типа ИК–3, ИГК–30А, РСС–6 и др. Затем измельченная масса с размером частиц от 20 до 100 мм поступает в универсальные мельницы или дробилки типа АВМ, МДУ и др., где измельчается до степени помола с остатком на сите (размер ячейки 3 мм) не более 5 % [5].

При помоле через решето 3 мм двухкомпонентного состава ТМ и его добавке в пенообразующую жидкость (ПОЖ) в количестве 5 мас. % получили пенную систему с устойчивостью 3840 с/см³ и давлением прорыва пенного экрана 32 МПа при однократном дроблении сырья и с параметрами: устойчивость 4320 с/см³ и давление прорыва 36 МПа – при двукратном помоле. В первом случае давление деблокирования пены из зерна составило 0,4 МПа, во втором – 0,2 МПа.

Учитывая полученные результаты исследований основных технологических показателей жидкостей блокирования для выпуска опытной партии наполнителя ТМ наиболее целесообразно использование растительных отходов зерновых и масличных культур в соотношении 1:1 [6, 7].

При двукратном дроблении сырьевых компонентов через решето 3 мм при 4500 об/мин на агрегате типа КДУ получается наполнитель ТМ следующего фракционного состава (табл. 2):

Таблица 2. ФРАКЦИОННЫЙ СОСТАВ НАПОЛНИТЕЛЯ ТМ ПРИ ДВУКРАТНОМ ДРОБЛЕНИИ

№ пробы, пп	Размер фракции, мм	Количество, мас. %
1	>	9,8
2	1 – 0,5	43,2
3	0,5 – 0,315	22,0
4	0,315 – 0,25	7,0
5	<	18,0

Фракционный состав растительного наполнителя из люцерны и гороховой соломы (ЛГС) (табл. 3):

Таблица 3. ФРАКЦИОННЫЙ СОСТАВ НАПОЛНИТЕЛЯ ИЗ ЛЮЦЕРНЫ И ГОРОХОВОЙ СОЛОМЫ (ЛГС)

№ пробы, пп	Размер фракции, мм	Количество, мас. %
1	>	7,5
2	2,5–1,0	10,5
3	1,0–0,5	16,4
4	0,5–0,315	21,6
5	0,315–0,25	10,2
6	<	33,8

Для опробования в качестве дополнительного компонента к наполнителю ТМ приготовлен состав из отходов масличных и зерновых культур. Добавка ЛГС к ТМ составляла 10, 20 и 30 % по сухому веществу. Влияние комбинированного наполнителя (ЛГС + ТМ) на устойчивость пеноэмульсии видно по данным, приведённым в таблице 4. А именно, дополнительное введение к ТМ добавок наполнителя ЛГС несколько повышает кратность пеноэмульсии и незначительно снижает её устойчивость. Исходя из этого, можно сделать вывод, что применение ЛГС в качестве добавки к ТМ нецелесообразно [8–12].

Таблица 4. УСТОЙЧИВОСТЬ ПЕНОЭМУЛЬСИЙ С КОМБИНИРОВАННЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ

№ п/п	Добавка наполнителя, мас. % от объема ПОЖ	Кратность	Устойчивость, с/ см ³
1	5 ТМ (100)	1,18	14400
2	5 (ТМ + ЛГС = 90 + 10)	1,28	10800
3	5 (ТМ + ЛГС = 80 + 20)	1,33	8640
4	5 (ТМ + ЛГС = 70 + 30)	1,30	12343

Двукратным помолом люцерны и гороховой соломы в соотношении 1:1 через решетку 3 мм получена проба наполнителя ЛГС фракционного состава:

Таблица 5. ФРАКЦИОННЫЙ СОСТАВ НАПОЛНИТЕЛЯ ИЗ ЛЮЦЕРНЫ И ГОРОХОВОЙ СОЛОМЫ (ЛСГ)

№ пробы, пп	Размер фракции, мм	Количество, мас. %
1	>	9,0
2	2,5–1,0	6,0
3	1,0–0,5	15,0
4	0,5–0,315	20,0
5	0,315–0,25	10,0
6	<	40,0
7	>	9,0

Применение в качестве наполнителя только ЛГС в количестве 5 мас.% от объема ПОЖ приводит к образованию устойчивой пеноэмульсии с кратностью 1,22 и нулевым водоотделением за 1 сут. Давление прорыва пенного экрана при блокировании этим составом равно 26 МПа, что ниже 32 МПа при блокировании пеноэмульсией с наполнителем ТМ в количестве тех же 5 мас. %. В то же время устойчивость пенной системы с ТМ соответствует 3840 с/см³ при том же способе помола сырьевых компонентов.

Более высокая устойчивость пеноэмульсии с ЛГС, чем с ТМ, обусловлена, в основном, её фракционным со-

ставом. Так например, содержание последних двух мелких фракций в ЛГС практически вдвое выше, чем в ТМ. При более высокой устойчивости системы с ЛГС её блокирующие свойства ниже, чем пеноэмульсии с ТМ из-за меньшего содержания в ЛГС частиц с большей длиной волокон (> 0,315 мм 50% в ЛГС и 75% в ТМ).

Таким образом, по совокупности полученных данных, наиболее целесообразным является использование ТМ из отходов масличных и зерновых культур определенного фазового состава в качестве наполнителя в блокирующую жидкость.

При поисковых исследованиях по выбору наполнителя для приготовления жидкостей для временного блокирования продуктивных пластов оценивались такие свойства получаемых пеноэмульсий, как устойчивость S (с/см³), кратность пены K , блокирующая и коркообразующая способности, а также фильтрационные свойства.

Экспериментальные исследования основных свойств пенных систем показали, что получаемые пеноэмульсии с растительными наполнителями отличаются от применяемых пенных систем с торфяных наполнителем более высокой стабильностью. Наилучшие пенообразующие свойства и устойчивость имеют составы с травяной мукой из отходов подсолнечника, сои, хлопка, пшеничной и гречишной мякины. Более низкие показатели у пеноэмульсий с наполнителями из кукурузы и сорго. Это, вероятно, обусловлено меньшим, чем у других наполнителей, содержанием склонной к набуханию в жидких средах клетчатки, способной связывать воду (табл. 6).

Таблица 6. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗАКУПОРИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПОЖ С НАПОЛНИТЕЛЯМИ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ НА МОДЕЛИ ТРЕЩИНОВАТОГО КОЛЛЕКТОРА

Добавка наполнителя, % от объема ПОЖ	pH	Кратность	S, с/см ³	РН, МПа	РФ, Мпа	Рсдв., Мпа	Робр, Мпа	Проникновение наполнителя
ПОЖ на основе газоконденсата								
3% Подсолн.* сух.	3,15	2,4	2468	2,8	6,0	30,0	0,6	полное
3% Подсолн.* (192 ч в NaOH)	7,0	2,35	3960	1,6	2,0	17,0	0,2	полное
3% Подсолн* выдерж. в CaCl ₂ 24 ч	5,04	2,35	3142	2,0	2,8	13,2	0,05	полное
3% Соя* сух.	3,65	2,30	2982	1,6	3,2	24,0	0,1	полное
3% Соя* (24 ч в NaOH)	8,2	2,25	3870	1,6	3,0	23,6	0,4	не полное
3% Гречиха* сух.	3,84	2,8	2708	1,2	5,2	22,0	0,2	не полное
3% Гречиха* (168 ч в NaOH)	7,26	2,50	2880	3,2	2,0	20,0	0,05	полное

Добавка наполнителя, % от объема ПОЖ	pH	Крат- ность	S, с/см ³	pH, МПа	РФ, Мпа	Рсдв., Мпа	Робр, Мпа	Проникновение наполнителя
3% Гречиха** сух.	3,16	2,60	2160	0,3	0,4	2,0	0,3	не полное
3% Хлопок-стебель* сух.	3,8	2,60	2520	4,0	7,2	36,8	0,6	полное
3% Хлопок-стебель* (24 ч в NaOH)	7,86	2,70	3000	2,4	4,2	20,8	0,4	полное
3% Хлопок-стебель* (168 ч в NaOH)	7,85	–	–	5,2	7,2	16,4	0,3	полное
3% Хлопок- коробочка* сух.	3,16	2,0	2736	4,0	6,8	16,0	0,2	полное
3% Хлопок- коробочка* (24 ч в NaOH)	7,8	2,0	5760	2,0	3,2	8,8	0,2	полное
3% Полова* сух. в эмул.	4,76	2,50	2468	0,4	0,4	6,8	2,0	не полное
3% Полова* (1 ч в р-ре CaCl ₂)	4,66	2,45	2880	0,4	0,4	28,0	0,1	полное
7% Полова* сух.	4,51	2,20	2834	4,0	3,0	22,0	0,6	полное
3% Полова ** (1 ч в р-ре CaCl ₂)	3,75	2,95	2880	0,3	0,3	6,0	0,3	не полное
7% Полова ** (1 ч в р-ре CaCl ₂)	3,64	2,4	3142	2,0	3,2	28,0	0,6	не полное
3% Гранулы травы* (15 сут в NaOH)	6,8	–	–	1,2	2,8	7,6	0,2	не полное
3% Кукуруза ** (24 ч в NaOH)	9,4	–	–	1,2	2,8	6,8	0,05	не полное
3% Кукуруза ** (120 ч в NaOH)	9,58	–	–	2,0	2,0	6,8	0,05	не полное
3% Кукуруза ** (144 ч в р-ре CaCl ₂)	4,76	–	–	0,3	0,5	14,0	0,7	не полное
3% Сорго ** сух.	4,8	–	–	0,3	0,5	12,4	0,1	не полное
3% Сорго* (120 ч в NaOH)	6,56	–	–	1,0	0,8	2,8	0,1	не полное
ПОЖ на основе дизельного топлива								
7% Подсолн.* (> 1 мес в NaOH)	10,2	2,43	3840	4,0	2,8	10,8	0,4	полное
7% Подсолн.* сух.	4,96	1,60	6912	14,0	8,0	35,0	0,2	полное
3% Полова* (> 1 мес в р-ре CaCl ₂)	5,10	2,75	–	1,6	2,0	36,0	0,5	полное

Добавка наполнителя, % от объема ПОЖ	pH	Крат- ность	S, с/см³	РН, МПа	РФ, Мпа	Рсдв., Мпа	Робр, Мпа	Проникновение наполнителя
3% Полова* (> 1 мес в NaOH)	7,95	2,75	–	1,2	2,4	9,6	0,03	не полное
7% Полова* (> 1 мес в NaOH)	9,61	2,95	3456	4,0	4,0	18,4	0,1	полное
7% Полова* (19 сут в р-ре CaCl ₂)	4,74	2,10	–	6,0	5,4	39,2	0,1	полное
7% Полова* (> 1 мес в р-ре CaCl ₂)	4,06	2,35	–	4,8	4,2	39,2	0,2	полное
7% Гречиха* (> 1 мес в NaOH)	9,24	2,10	5760	6,0	8,8	22,8	0,05	не полное
3% Гранулы травы* сух.	5,10	2,10	2468	2,0	4,0	26,0	0,05	полное
7% Гранулы травы* сух.	4,97	1,75	2880	6,0	5,2	40,0	0,3	полное
7% Хлопок-стебель* сух.	4,95	1,85	2880	4,0	3,6	28,0	0,02	полное
7% Соя* (1 мес в NaOH)	10,6	2,15	6912	4,0	3,4	28,0	0,03	полное

Примечание: Состав ПОЖ, об. %: 25%-й раствор КССБ – 20; дизельное топливо (газоконденсат) – 20; водный раствор CaCl₂ (rB скобках приведен способ обработки наполнителя перед введением в ПОЖ).

* – фракционный состав наполнителя соответствует фракционному составу «Целлофона-F»

** – фракционный состав наполнителя соответствует фракционному составу торфа

В результате проведенных стендовых испытаний установлено (табл. 7)., что пеноэмульсии с такими наполнителями, как подсолнечник, соя, гречиха, хлопок и пшеничная мякина обладают более высокими закупоривающими свойствами, чем пеноэмульсии с наполнителями из кукурузы и сорго. Это обусловлено меньшим содержанием клетчатки в сорго и кукурузе по сравнению с её количеством в вышеперечисленных растительных наполнителях. При набухании в жидких средах объём частиц травяной муки, содержащей достаточное количество клетчатки, увеличивается в 5–8 раз, что позволяет получить систему не только с необходимыми закупоривающими свойствами, но и с пониженной фильтрацией. В совокупности технологические свойства пеноэмульсий как блокирующих жидкостей значительно улучшаются.

Таблица 7. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПЕН

Добавка наполнителя, % от объёма ПОЖ	pH	K	Объём раствора, оставшегося в камере, мл	Объём раствора поглощенного песком, мл	Объём раствора, прошедшего через песчаный фильтр, мл	Толщина внешней корки, мм
ПОЖ на основе газоконденсата						
3% Подсолн.* сух.	3,15	2,40	94,88	28,52	0	1
3% Подсолн.* (24 ч в NaOH)	8,26	2,40	94,88	30,12	1,6	1
3% Подсолн. (192 ч в NaOH)	7,00	2,50	97,89	27,11	0	1
3% Подсолн.** сух.	4,85	3,00	0	0	125	0
3% Подсолн.* не прос., выдерж. в CaCl ₂ 24 ч	4,78	2,30	72,29	33,71	19	1,5
3% Подсолн.* измельч., выдерж. в CaCl ₂ 24ч	5,04	2,35	79,82	31,68	13,5	1
3% Соя* сух.	3,65	2,30	49,7	43,30	32,0	1
3% Соя* (24 ч в NaOH)	8,20	2,25	64,76	36,24	24,0	1
3% Соя* сух.	4,36	2,20	0	0	125	0
3% Гречиха* сух.	3,84	2,80	79,82	28,18	17,0	1,5
3% Гречиха* (24 ч в NaOH)	7,92	2,48	87,35	30,25	7,4	1
3% Гречиха* (168 ч в NaOH)	7,26	2,50	97,89	26,11	1	1
3% Гречиха** сух.	3,16	2,60	0	0	125	0
3% Гречиха** (168 ч в NaOH)	8,08	2,45	0	0	125	0
3% Хлопок-стебель* сух.	3,80	2,60	87,35	27,85	9,8	1
3% Хлопок-стебель* (24 ч в NaOH)	7,86	2,70	67,77	37,23	20,0	1
3% Хлопок-стебель* (168 ч в NaOH)	7,85	2,65	79,82	30,18	15	1,5
3% Хлопок-коро- бочка* сух.	4,07	2,00	87,35	31,65	6,0	1

1	2	3	4	5	6	7
3% Хлопок-коробочка* (24 ч в NaOH)	7,80	2,00	87,35	17,65	20,0	1,5
3% Полова** (1ч в р-ре CaCl2)	3,75	2,60	34,64	56,36	34	0
7% Полова** (1ч в р-ре CaCl2)	3,64	2,40	57,23	29,87	38	2
3% Полова* сух.	4,76	2,50	0	0	125	0
3% Полова* (1ч в р-ре CaCl2)	4,66	2,45	0	0	125	0
7% Полова* сух.	4,51	2,20	42,17	46,83	36	5
3% ТЩН*	5,35	3,23	82,83	25,17	17	1
3% Гранулы травы* (15 сут в р-ре NaOH)	6,8	–	0	0	125	0
3% Кукуруза** (24 ч в NaOH)	9,4	–	0	0	125	0
3% Кукуруза** (120 ч в NaOH)	9,58	–	0	0	125	0
3% Кукуруза** (144 ч в р-ре CaCl2)	4,76	–	0	0	125	0
3% Сорго* сух.	4,8	–	0	0	125	0
3% Сорго** (120 ч в NaOH)	9,38	–	0	0	125	0
3% Сорго* (120 ч в NaOH)	6,56	–	0	0	125	0
ПОЖ на основе дизельного топлива						
3% Соя* (168 ч в NaOH)	8,25	2,20	64,76	28,24	32	1
7% Соя* (168 ч в NaOH)	7,97	2,10	87,35	29,15	8,5	1
7% Соя* (1 мес в NaOH)	10,6	2,15	94,88	15,12	15	1
3% Соя* сух.	3,95	2,25	64,76	30,24	30	1
3% Гречиха* сух.	3,70	2,75	64,76	30,24	30	1
7% Гречиха* (> 1 мес в NaOH)	9,24	2,10	94,88	17,12	13	1,5
7% Подсолн.* сух.	4,96	1,60	94,88	30,12	0	1
7% Подсолн.* (1 мес в NaOH)	10,2	2,43	94,88	27,12	3	1

1	2	3	4	5	6	7
7% Хлопок-стебель* сух.	4,95	1,95	34,64	55,56	35	1
3% Гранулы травы* сух.	5,10	2,10	0	0	125	20 рыхлая
7% Гранулы травы* сух.	4,97	1,75	34,64	40,36	50	10 рыхлая

Поскольку пеноэмульсии с наполнителями из неизмельченных травяных гранул (комбикорма), кукурузы и сорго имеют недостаточную закупоривающую способность (Рсдв), а также высокие фильтрационные свойства, они не могут быть использованы в качестве наполнителей жидкостей для блокирования пластов.

Как следует из данных (таб. 7), на закупоривающие и фильтрационные свойства пеноэмульсий оказывает влияние способ обработки наполнителя перед приготовлением блокирующей жидкости. Обработка щёлочью, как правило, повышает устойчивость пенной системы. Это обусловлено образованием мелкодисперсного осадка гидроксида кальция при взаимодействии щёлочи и хлорида кальция ПОЖ.

Закупоривающая способность пенных систем с наполнителями при обработке последних щёлочью или хлоридом кальция снижается за исключением применения половы (мякины пшеницы).

Степень измельчения наполнителей (фракционный состав, соответствующий составу «Полицелл» или торфа) также оказывает влияние на блокирующие и фильтрационные свойства пенных систем. Наполнители с фракционным составом, близким к составу «Полицелл» (табл. 7), обеспечивают более высокую блокирующую способность и пониженную фильтрацию пеноэмульсий, чем наполнители с фракционным составом, соответствующим торфу. Более крупная фракция наполнителя отрицательно влияет на фильтрационные показатели исследуемых пеноэмульсионных систем, повышая фильтрацию последних до 125 мл (весь объём испытуемого состава, т.е. фильтруется полностью) практически для всех видов используемых наполнителей [13].

Заключение

В результате проведённых исследований по выбору наполнителя в жидкость для временного блокирования продуктивных пластов установлено, что в качестве наполнителей растительного происхождения в соответствии с наиболее низкими фильтрационными свойствами и высокой закупоривающей способностью получаемых ПОЖ может быть рекомендована травяная мука из подсолнечника, мякины гречихи или пшеницы, стебля хлоп-

ка или соевой соломы, а также смеси измельченных трав однолетних и многолетних растений.

С целью предупреждения ухудшения ФЕС пласта, жидкости глушения должны отвечать определенным требованиям, основные из них: достаточное значение плотности, обеспечивающей создание необходимого противодействия на забой скважины; структурно-механические свойства, позволяющие блокировать продуктивный пласт на весь период проведения ремонтных работ, с предотвращением загрязнения ПЗП; возможность легкого извлечения их из пласта потоком газа в процессе освоения скважин при сравнительно низких депрессиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гасумов Р.А. Особенности строительства глубоких скважин в осложненных горно-геологических условиях Пердкавказья / Р.А. Гасумов, В.Г. Копченков, В.Т. Лукьянов, Н.Г. Федорова, С.Н. Овчаров // Наука. Инновации. Технологии. 2017. № 1. С. 123–140.
2. Гасумов Р.А., Минликаев В.З. Повышение и восстановление производительности газовых и газоконденсатных скважин: монография / Р.А. Гасумов, В.З. Минликаев. М.: «Газпром экспо», 2010. 478 с.
3. Гасумов Р.А. Об эффективности применения наполнителей растительного происхождения к технологическим жидкостям / Р.А. Гасумов, Э.Р. Гасумов // Естественные и технические наук. 2016. № 6 (96) С. 48–59.
4. Состав и питательность кормов: Справочник / И.С. Шумилин, Г.П. Державина, А.М. Артюшин и др.; под ред. И.С. Шумилина. М.: Агропромиздат. 1986. 303 с.
5. Вавилов П.П. Практикум по растениеводству / П.П. Вавилов, В.В. Гриценко, В.С. Кузнецов. М.: Колос. 1983. 356 с.
6. Перейма А.А. Исследование блокирующей способности жидкостей глушения с наполнителями растительного происхождения / А.А. Перейма, Р.Р. Гасумов, В.Е. Черкасова, Г.Ф.Тукаева // Сб. научн. трудов: Проблемы эксплуатации и капитального ремонта скважин на месторождениях и ПХГ, вып. 41. Ставрополь: РИЦ «СевКавНИПИгаз». 2004. С. 137–146.
7. Перейма А.А., Черкасова В.Е., Гасумов Р.Р. Пенообразующий состав для глушения скважин / Патент РФ № 2266394. Опубликовано: 20.12.2005.
8. Гасумов Р.Р. Пенообразующий состав для глушения газовых и газоконденсатных скважин на поздней стадии разработки месторождений / Р.Р. Гасумов // Нефтепромысловое дело, 2012. №2. С. 60–64.

9. Гасумов Р.Р. Блокирующие жидкости с наполнителем для глушения скважин / Р.Р. Гасумов // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. 2012. № 1. С. 35-39.
10. Гасумов Р.А. Пенные системы для бурения и ремонта скважин: монография / Р.А. Гасумов, А.В. Калинин, М.Г. Гейхман. М.: «ИРЦ Газпром», 2008. 269 с.
11. Гасумов Р.Р. Пенообразующие жидкости для блокирования продуктивных пластов при их вскрытии перфорацией / Р.Р. Гасумов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2012. № 5. С. 42–46.
12. К вопросу оценки фильтрационных свойств пеноэмульсий с растительными наполнителями / А.А. Перейма, В.Е. Черкасова, Г.Ф. Тукаева // Сб. научн. трудов: Проблемы эксплуатации и капитального ремонта скважин на месторождениях и ПХГ, вып. 41. Ставрополь: РИЦ «СевКавНИПИгаз». 2004. С. 159–168.
13. Гасумов Р.А. Применение реагента-наполнителя «Целлотон-Ф» при проведении капитального ремонта скважин на месторождениях Северного Кавказа / Р.А. Гасумов, Н.А. Костенко, Р.Р. Гасумов, Н.Б. Козлов, В.В. Романов // Сб. тезис. докл. III Региональной науч.-техн. конф. «Вузовская наука – Северо-Кавказскому региону». Ставрополь: СГТУ. 1999. С. 33.

References

1. Gasumov R.A. Osobennosti stroitel'stva glubokih skvazhin v oslozhnennykh gorno-geologicheskikh usloviyakh Predkavkaz'ja (Features of deep wells the construction in the complicated mining and geological conditions of Transcaucasia) / R.A. Gasumov, V.G. Koptchenkov, V.T. Luk'janov, N.G. Fedorova, S.N. Ovcharov // Nauka. Innovacii. Tehnologii. 2017. № 1. S. 123-140.
2. Gasumov R.A., Minlikaev V.Z. Povyshenie i vosstanovlenie proizvoditel'nosti gazovykh i gazokondensatnykh skvazhin: monografiya (Increase and restoration of productivity of gas and gas condensate wells: monograph) / R.A. Gasumov, V.Z. Minlikaev. M.: ООО «Газпром некспо», 2010. 478 s.
3. Gasumov R.A. Ob jeffektivnosti primenenija napolnitelej rastitel'nogo proishozhdenija k tehnologicheskim zhidkostjam (On the effectiveness of the application of vegetable-based fillers to process fluids) / R.A. Gasumov, Je.R. Gasumov // Estestvennye i tehicheskie nauk. 2016. № 6 (96) S. 48–59.
4. Sostav i pitatel'nost' kormov: Spravochnik (omposition and nutrition of feeds: Handbook) / I.S. Shumilin, G.P. Derzhavina, A.M. Artjushin i dr.: Pod red. I.S. Shumilina // M.: Agropromizdat. 1986. 303 s.
5. Vavilov P.P. Praktikum po rastenievodstvu (Workshop on plant growing) / P.P. Vavilov, V.V. Gricenko, V.S. Kuznecov // M.: Kolos. 1983. 356 s.
6. Perejma A.A. Issledovanie blokirujushhej sposobnosti zhidkostej glushenija s napolniteljami rastitel'nogo proishozhdenija (Investigation of the blocking power of well-killing fluids with fillers of plant origin) / A.A. Perejma, R.R. Gasumov, V.E. Cherkasova, G.F. Tukaeva //

- Sb. nauchn. trudov: Problemy jekspluatacii i kapital'nogo remonta skvazhin na mestorozhdenijah i PHG, vyp. 41. Stavropol': RIC «SevKavNIPigaz». 2004. S. 137–146.
7. Perejma A.A., Cherkasova V.E., Gasumov R.R. Penobrazujushhij sostav dlja glushenija skvazhin (Foaming composition for killing of wells) / Patent RF № 2266394. Opublikovano: 20.12.2005.
 8. Gasumov R.R. Penobrazujushhij sostav dlja glushenija gazovyh i gazokondensatnyh skvazhin na pozdnej stadii razrabotki mestorozhdenij (Foaming composition for killing gas and gas condensate wells at the late stage of field development) / R.R. Gasumov // Neft-promyslovoe delo. 2012. № 2. S. 60–64.
 9. Gasumov R.R. Blokirujushhie zhidkosti s napolnitelem dlja glushenija skvazhin (Blocking fluids with filler for killing of wells) / R.R. Gasumov // Vestnik Associacii burovyh podryadchikov. 2012. № 1. S. 35–39.
 10. Gasumov R.A. Pennye sistemy dlja burenija i remonta skvazhin: monografija (Foam systems for drilling and well workover: monograph) / R.A. Gasumov, A.V. Kalinkin, M.G. Gejhman. M.: IRC Gazprom, 2008. 269 s.
 11. Gasumov R.R. Penobrazujushhie zhidkosti dlja blokirovanija produktivnyh plastov pri ih vskrytii perforaciej (Foaming fluids for blocking productive layers when perforating) / R.R. Gasumov // Stroitel'stvo neftjanyh i gazovyh skvazhin na sushe i na more. 2012. № 5. S. 42–46.
 12. Perejma A.A. K voprosu ocenki fil'tracionnyh svojstv penojemul'sij s rastitel'nymi napolniteljami (On the evaluation of the filtration properties of foam emulsions with vegetable-based fillers) / A.A. Perejma, V.E. Cherkasova, G.F. Tukaeva // Sb. nauchn. trudov: Problemy jekspluatacii i kapital'nogo remonta skvazhin na mestorozhdenijah i PHG, vyp. 41. Stavropol': RIC «SevKavNIPigaz». 2004. S. 159–168.
 13. Gasumov R.A. Primenenie reagenta-napolnitelja «Celloton-F» pri provedenii kapital'nogo remonta skvazhin na mestorozhdenijah Severnogo Kavkaza (Application of the reagent-filler "Celloton-F" during workover of wells at the North Caucasus fields) / R.A. Gasumov, N.A. Kostenko, R.R. Gasumov, N.B. Kozlov, V.V. Romanov // Sb. tezis. dokl. III Regional'noj nauch.-tehn. konf. «Vuzovskaja nauka – Severo-Kavkazskomu regionu». Stavropol': SGTU. 1999. S. 33.

УДК 550.8.05

**Дудаев С.А. [Dudaev S.A.],
Керимов А.-Г.Г. [Kerimov A.-G.G.],
Гридин В.А. [Gridin V.A.]
Галай Б.Ф. [Galay B.F.]**

ОПТИМИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СКВАЖИН В АРГИЛЛИТОПОДОБНЫХ ПАЛЕОГЕНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ НА ПРИМЕРЕ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ВОСТОЧНОГО ПРЕДКАВКАЗЬЯ

**Optimization of the complex of geophysical well
investigations in argillite-like paleogene deposits
by the example of oil fields of Eastern Ciscaucasia**

В работе приводятся данные анализа информативности геолого-геофизических методов при решении задачи поисков нефтегазонасыщенных коллекторов в палеогене на территории Восточного Предкавказья. Несмотря на довольно длительную историю изучения глинистых коллекторов, их нетрадиционность оказывает существенное влияние на достоверность результатов геофизических исследований скважины. Традиционная геологическая оценка «сланцеподобных» коллекторов затруднительна ввиду значительной латеральной изменчивости свойств пород, о чем свидетельствуют и результаты опробования коллекторов хадумской свиты. В результате анализа промыслово-геофизических материалов, характеризующих отложения хадумской свиты по пяти месторождениям Ставропольского края, выявлено, что продуктивные, по результатам опробования, интервалы характеризуются повышенными значениями естественной гамма-активности, в интервалах, где керн не отбирался, предпочтительно использовать результаты анализов шлама методом ядерного магнитного резонанса. Достоверность выделения коллекторов в аргиллитоподобных коллекторах геофизическими методами исследования скважин повышается включением в комплекс спектрометрического и широкополосного акустического каротажа.

The paper presents the analysis findings of informativity of geophysical methods for solving the problem of searching collectors saturated with oil and gas in the Paleogene on the territory of Eastern Ciscaucasia. Despite the rather long history of studying clay collectors, their unconventionality has a significant impact on the reliability of the results of geophysical well investigations. Traditional geological evaluation of "state-like" collectors is difficult due to significant lateral variability of rock properties, as evidenced by the results of testing the collectors of Khadum suite. As a result of the analysis of field-geophysical data, characterizing the deposits of Khadum suite for five fields in Stavropol Territory, it was found that the productive intervals, according to sampling results, are characterized by the increased values of natural gamma activity, in the intervals, where the core was not sampled, it is preferable to use the results of drill cuttings analysis obtained by the nuclear magnetic resonance method. The reliability of the segregation of collectors in argillite-like reservoirs by using geophysical methods of well investigations is enhanced by the inclusion of the spectrometric and broadband acoustic logging methods into the complex.

Ключевые слова: геофизические методы, каротаж, палеоген, глинистый коллектор, спектрометрический гамма-гамма каротаж.

Key words: geophysical methods, logging, Paleogene, argillaceous collector, spectrometric gamma-gamma-ray logging.

Введение

Технологический прорыв в сланцевой добыче углеводородов сделал США лидером по производству газа в мире и позволил догнать ведущие страны мира (Саудовскую Аравию и Россию) по производству нефти. Говоря о сланцевой нефти в России, имеются в виду, в том числе и залежи хадумской свиты Предкавказья, хотя с точки зрения литологии таковыми они не являются.

Трудно недооценивать значимость для нашей страны «сланцеподобных» коллекторов, ориентируясь на достижения США, с учетом того, что по ресурсам сланцевых запасов Российская федерация занимает одно из ведущих мест в мире.

Длительное время аргиллитоподобные глины хадумской и баталпашинской свит («хадумиты»), залегающие на глубинах 1300–2200 м при толщине 30–45 м, считались региональными покрывками, в связи с чем основные исследования были направлены на изучение их экранирующих свойств.

Несмотря на довольно длительную историю изучения глинистых коллекторов, их нетрадиционность оказывает существенное влияние на достоверность результатов геофизических исследований скважины (ГИС), как и ограниченный комплекс ГИС, применявшийся в период разведки месторождений. В значительной степени это обусловлено тем, что эффекты, создаваемые присутствием углеводородов в этих коллекторах весьма незначительны, и часто лежат за пределами возможности геофизических методов.

Материалы и методы исследований

Выполненные в 80-х годах прошлого столетия геофизические исследования в плотных глинистых коллекторах нижнемайкопской серии, ранее считавшихся неизвлекаемыми, свидетельствуют об их перспективности с точки зрения добычи УВС.

Хадумские отложения подразделяются на нижнюю (пшихский горизонт), среднюю (полбинский, или острокодовый горизонт) и верхнюю части горизонт Морозкиной балки). Отложения пшихского горизонта представлены аргиллитоподобными плотными глинами, полбинского – в подошве доломитизированными мергелями, в верхней части – мягкими глинистыми мергелями и глинами. Горизонт Морозкиной балки сложен аргиллитами и аргиллитоподобными глинами. Выше залегают отложения баталпашинской свиты – аргиллиты и глины, плотные, некарбонатные. В 20–30 м от подошвы залегают прослои доломитизированного мергеля – баталпашинский репер – делящего свиту на подреперную и надреперную части. Отложения подреперной части продуктивны.

Привлечение зарубежных и отечественных аналогов с целью моделирования природных резервуаров нефти в сложнопостроенных нижнемайкопских глинистых отложениях удовлетворительных результатов не дало.

Полученные по результатам поисково-разведочного бурения геолого-геофизические данные нельзя распространить на весь предполагаемый резервуар и оценить подсчетные параметры «сланцевых» залежей.

Традиционная геологическая оценка «сланцеподобных» коллекторов затруднительна ввиду значительной латеральной изменчивости свойств пород, о чем свидетельствуют и результаты опробования коллекторов хадумской свиты. Например, дебит скважины № 23 Журавского месторождения составлял доли кубических метров в сутки, а скважины № 22 Воробьевского месторождения – до десяти кубических метров в сутки. Также отмечалась существенное различие в продолжительности эксплуатации скважин фонтанным способом. Частое переслаивание слабопроницаемых и непроницаемых литологических разностей приводит к затруднению оттока УВ из низкопроницаемых коллекторов.

В результате анализа промыслово-геофизических материалов, характеризующих отложения хадумской свиты по пяти месторождениям Ставропольского края, выявлено, что продуктивные, по результатам опробования, интервалы характеризуются повышенными значениями естественной гамма-активности (ГК), удельного электрического кажущегося сопротивления (КС). Интервальное время пробега продольной волны ΔT по акустическому каротажу (АК) не позволяет дифференцировать разрез по характеру насыщения.

Необходимо отметить низкую информативность в разрезе нейтронного гамма-каротажа (НГК) и компенсированного нейтронного каротажа (КНК) ввиду низкой чувствительности метода в условиях высокого водородосодержания разреза. Более дифференцированным в продуктивном разрезе является гамма-гамма-картаж в плотностной модификации (ГГК-П), слабо подверженный влиянию глинистости.

Результаты исследований и их обсуждение

Поскольку интегральный характер ГК не позволяет оценить тип глинистых минералов, входящих в структуру скелета, применение гамма-каротажа в спектрометрической модификации (ГК-С) позволяет повысить эффективность методов ГИС при поисково-разведочных работах [1].

Известно, что торий является прямым индикатором объемной глинистости, т. к. торий не входит в состав каркаса (скелета), а рассеян в горной породе. Исходя из вышесказанного, коэффициент глинистости, определенный по содержанию тория, рекомендуется для оценки фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) глинистых отложений.

Ввиду повышенного содержания гидрослюда (48–95 %) в глинах олигоцен (в частности подреперной части) и, соответственно, калия, что никак не связано глинистостью, коэффициент глинистости, определенный по этому показателю, может быть использован для ввода поправок в показания мето-

дов КНК, АК, ГГК-П при оценке пористости коллекторов с учетом влияния глинистых минералов (рис. 1).

С учетом урановой составляющей при анализе показаний (ГК-С) отмечается повышение точности в оценке коэффициента глинистости, так как этот индикатор не связан с глинистостью изучаемых палеогеновых отложений, а зависит от содержания органического углерода ($C_{орг.}$) и форм его распределения [1].

Включение в комплекс ГИС низкочастотной модификации существенно повышает эффективность комплекса для решения проблемы выделения коллекторов в палеогеновых отложениях. Информативность стандартного акустического каротажа, функционирующего на частоте 25 кГц, снижается в низкопористых трещинных глинистых и карбонатных коллекторах ввиду значительного затухания сигнала, в связи с чем регистрация динамических и кинематических характеристик упругих волн затруднительна. Низкочастотной модификацией метода регистрируются скоростные и амплитудные характеристики продольных и поперечных волн, позволяющие провести расчленение геологического разреза по литологии и по насыщению. На величину расчетной скорости акустических волн оказывают влияние жидкости в мелких трещинах, поэтому при определении скоростей продольных и поперечных волн при низких величинах давлений всестороннего сжатия, характерного для отложений палеогена (до 20–25 МПа), следует учитывать данное обстоятельство. Это влияние уменьшается с увеличением всестороннего сжатия в связи с закрытием микротрещин. Таким образом, достоверные результаты акустического метода могут быть получены при использовании волн низкочастотного диапазона (10–12 кГц), когда затухание волны минимизировано, и насыщенность горных пород с более однородной структурой порового пространства определяется сжимаемостью крупных пор, обусловленной упругостью сцементированного скелета породы.

Ввиду сильной изрезанности ствола скважин кавернами достигнуть прижатия каверномера к стенке скважины не удастся, что оказывает негативное влияние на результаты исследований.

Другим подходом в решении задачи выделения хадумитов Восточного Предкавказья является сопоставление коэффициентов пористости K_n , определяемых по данным ГИС и по результатам лабораторных анализов керна. В качестве объекта исследований авторами выбраны отложения хадумской и баталпашинской свит, как наиболее освещенных керном и наиболее выдержанных по площади [2, 3].

В интервалах, где керн не отбирался, использовались результаты анализов шлама методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР) [4]. Результаты исследований методом ЯМР показали высокую степень сходимости в определении коэффициентов пористости по керну и шламу в палеогеновых отложениях. Так, в скважине № 2 Довсунской площади различия в коэффициен-

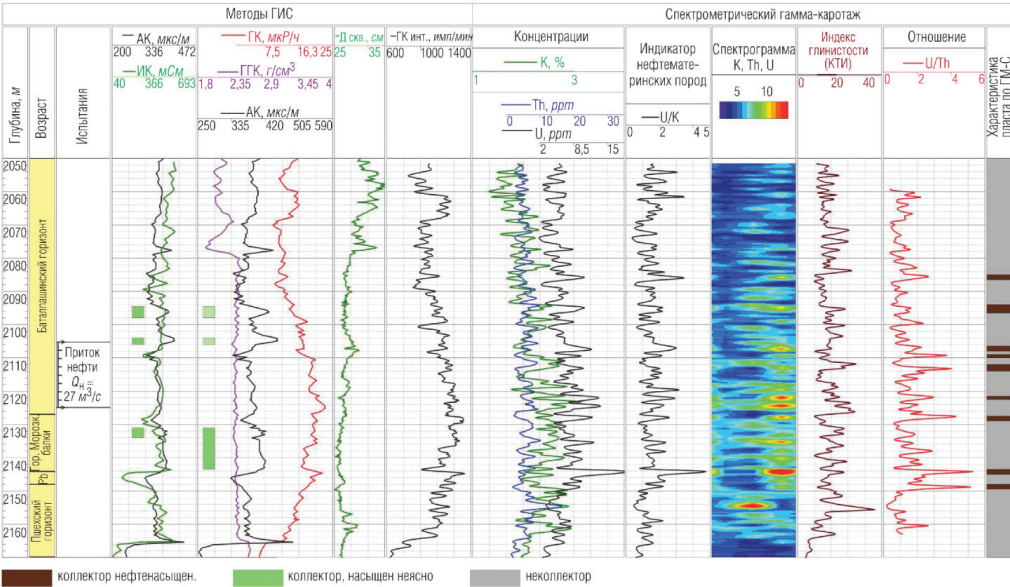


Рисунок 1. Сопоставление различных критериев выделения глинистых коллекторов олигоцена с результатами испытаний в колонне.

тах пористости, определенных по керну и шламу методом ЯМР, составляют в среднем менее 1 % по абсолютным значениям (рис. 2).

Приведенные данные свидетельствуют, что для глинистых отложений палеогена Восточного Предкавказья допустима процедура определения коэффициента пористости методом ЯМР по анализам шлама в условиях низкой представительности керна или его полного отсутствия.

Проведен анализ выполненных замеров пластовых давлений в продуктивных интервалах с целью исключения неоднозначности геологической интерпретации данных комплекса геофизических исследований скважин в пластах с низкими фильтрационно-емкостными свойствами.

Определение проницаемости осуществлялось по кривым давления на точках стояния манометра в середине

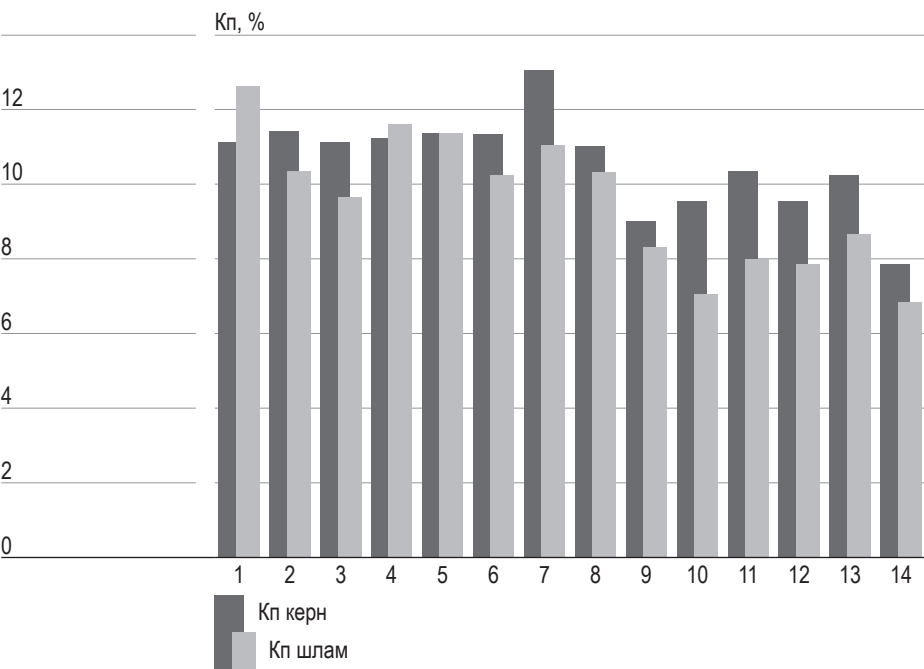


Рисунок 2. Результаты определений K_p по керну и шламу методом ЯМР в скважине № 2 Довсунской площади.

продуктивного пласта. Участок считается непроницаемым в случае отсутствия изменения давления. Предполагаемые нефтеносные пласты опробовались после водоносных и газоносных во избежание искажения результатов ввиду возможного загрязнения прибора нефтью.

Первой однократно отбиралась контрольная проба промывочной жидкости в интервале испытаний без герметизирующего элемента и прижимного устройства. В случае удаленности интервалов испытаний друг от друга более 100 метров отбор контрольных проб флюида проводили в каждом из них.

Испытания в глинистых коллекторах палеогена проводились как в открытом, так и в обсаженном стволе скважины. Отмечались многочисленные случаи отсутствия притока нефти ввиду недостаточного времени проведения испытаний и завышенных депрессий на пласт, вследствие чего судить о продуктивности объектов не представлялось возможным.

Эти факты являются свидетельством процессов смыкания расслоенных листоватых пластинок глинистого коллектора при их освоении на максимальных депрессиях, происходящих в призабойной зоне пласта и приводящих к снижению продуктивности скважины. Учитывая упруго-пластические свойства глин, происходит необратимые деформации каркаса скелета пласта [5].

Таким образом, данные исследования позволяют сделать важный вывод о необходимости тщательного и индивидуального подбора величины депрессии на пласт при испытании скважины для получения объективной информации о насыщении.

Выводы

1. Достоверность выделения коллекторов в аргиллитоподобных коллекторах геофизическими методами исследования скважин повышается включением в комплекс спектрометрического ГК-С и широкополосного акустического каротажа АКШ (при условии удовлетворительного качества за колонной крепи) в сочетании с пластовым испытанием на оптимальных депрессиях. Предложенный подход способствует решению задач доразведки месторождений Восточного Ставрополя при минимальных затратах.
2. Скелет глинистых коллекторов имеет упруго-пластические свойства, ввиду чего даже при незначительной депрессии на пласт происходят необратимые деформации в пластах-коллекторах. При этом отмечается низкая эффективность испытаний, связанная со смыканием расслоенных листоватых пластинок глинистого коллектора при их освоении в течение длительного времени стояния и максимальных депрессиях.

Библиографический список

1. Дудаев С.А., Дудаев Р.С. Хадумиты Предкавказья: новое в геолого-геофизическом изучении, вторичном вскрытии и освоении. М.: Геоинформмарк, 2015. 204 с.
2. Керимов А-Г. Г. Методы оценки коэффициента пористости и глинистости коллекторов в отложениях палеогена на площадях Восточного Ставрополя / Вестник СевКавГТУ серия «Науки о земле», Издательство ГОУВПО «СевКавГТУ». № 4. 2007. Ставрополь. С. 5–9.
3. Богданович Н.И. Определение эффективной пористости методом адсорбции (на примере сложных коллекторов нижнемайкопских отложений Восточного Предкавказья). М.: 1988. С. 89–97.

4. Ядерно-физические методы оперативного анализа шлама. Методические указания по применению / ВНИИ ядерной геофизики и геохимии НПО «Нефтегеофизика». М.: 1984. 58 с.
5. Майдебор В. Н. Особенности разработки нефтяных месторождений с трещиноватыми коллекторами. М.: Недра, 1980. 288 с.

References

1. Dudaev S.A., Dudaev R.S. Hadumity Predkavkaz'ya: novoe v geologo-geofizicheskom izuchenii, vtorichnom vskrytii i osvoenii (Khadumites of Ciscaucasia: breakthrough in geological and geophysical study, secondary opening and development). M.: Geoniformmark, 2015. 204 p.
2. Kerimov A-G. G. Metody ocenki koefficienta poristosti i glinistosti kollektorov v otlozheniyah paleogena na ploshyadyah Vostochnogo Stavropol'ya (Estimation methods of porosity and clayiness coefficient of collectors in the Paleogene deposits on the areas of Eastern Stavropol territory) / Vestnik SevKavGTU seria "Hauki o Zemle", Izdatelstvo GOUVPO "SevKavGTU". №4. 2007. Stavropol. P. 5–9.
3. Bogdanovich N.I. Opredelenie effektivnoi poristosti metodom adsorbtsii (na primere slozhnykh kollektorov nizhnemaikopskikh otlozhenii Vostochnogo Predkavkaz'ya) (Determination of the effective porosity by the adsorption method (by the example of complex collectors of the lower-Maikop deposits of Eastern Ciscaucasia). M.: 1988. P. 89–97.
4. Yaderno-fizicheskie metody operativnogo analiza shlama. Metodicheskie ukazaniya po primeneniyu (Nuclear-physical methods of operative analysis of drill cuttings. Methodical instructions for use) / VNIi yadernoi geofiziki i geohimii NPO "Neftgeofizika". M., 1984. 58 p.
5. Maidebor V. N. Osobennosti razrabotki neftyanih mestorozhdenii s treshinovatymi kollektorami (Features of oil fields' development with fractured collectors). M.: Nedra, 1980. 288 p.

Корнева Л.И. [Korneva L.I.]

ОСОБЕННОСТИ ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ В СТАВРОПОЛЬСКОМ КРАЕ*

Features of the territorial structure of investment projects in the Stavropol Territory

В статье рассматриваются особенности территориальной структуры инвестиционных проектов Ставропольского края, а также специфика действия внутрирегиональных факторов притяжения и размещения инвестиций. Информационной базой послужили сведения, представленные на официальных сайтах органов государственной власти региона, на основе которых автором разработана собственная база данных. В исследовании сопоставляется география и отраслевая принадлежность инвестиционных проектов со сформировавшейся в регионе территориальной и отраслевой структурой хозяйства. Показано, что на внутрирегиональном уровне существует связь между территориальной и отраслевой структурой инвестиций, горизонтом их планирования, суммарным объемом средств и вероятностью реализации инвестиционных проектов и их размещением таких проектов в территориальной системе. Доказано, что инвестиции тяготеют к урбанизованным, устойчивым элементам территориальной структуры хозяйства региона (промышленным центрам, узлам и пунктам, транспортным магистралям федерального уровня), концентрирующим трудовые ресурсы и имеющим высокий потребительский спрос и, как правило, соответствуют локальной специализации территории.

We consider the features of the territorial structure of investment projects in the Stavropol Territory, as well as the specifics of the effect of intra-regional factors of attraction and placement of investments in this article. We have collected information that is presented on the official websites of the state authorities of the region, and on their basis have developed own database of data. Geography and industry affiliation of investment projects are compared with the territorial and sectoral structure of the economy that has emerged in the region in this study. We showed that the link between the territorial and sectoral structure of investments, the horizon of their planning, the total amount of funds and the likelihood of implementing investment projects and their placement in the territorial system exists at the intra-regional level. It is proved that investments tend to urban, stable elements of the territorial structure of the economy of the region (industrial centers, nodes and points, federal highways), concentrating labor resources and having high consumer demand and usually correspond to local specialization of the territory.

Ключевые слова: инвестиции, география инвестиций, территориальная структура инвестиций, Ставропольский край, региональная экономика.

Key words: investment, geography of investment, territorial structure of investments, Stavropol Krai, regional economy.

Введение

В условиях высокой степени зависимости регионального бюджета от государственных трансфертов и низкой доли в экономике секторов, генерирующих поступления от налога на прибыль, инвестиционные вложения в экономику Ставропольского края приобретают важнейшее значение для его устойчивого и поступательного развития. Опубликовано большое количество информационно-аналитических материалов об инвестиционном

* Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ (№16-36-00095 мол_а «Полимасштабный анализ инвестиционной активности регионов Европейской части России»).

развитии региона в целом, в частности посвященных оценке и прогнозированию объема и структуры иностранных инвестиций в Ставропольский край, анализу источников финансирования, проблемам и перспективам привлечения средств в экономику и отдельные ее секторы (преимущественно в АПК и сельское хозяйство, туризм) [1–12].

Работ, посвященных вопросу размещения и отраслевой структуры инвестиций на территории края и опеределению факторов их тяготения к тем или иным территориям, за исключением региона КМВ, фактически отсутствуют. В то же время, учитывая современный глобальный тренд социально-экономического развития в рамках полюсов и точек роста, выявление специфики действия внутрирегиональных факторов притяжения инвестиций, определения связей между размещением инвестиционных проектов и территориальной структурой хозяйства региона представляется нам актуально научной проблемой, требующей проведения исследований.

Материалы и методы исследования

Мы отталкиваемся от гипотезы о том, что если инвестиционный проект успешно «встраивается» в территориально-отраслевую структуру региона, усиливая и дополняя ее, замыкая производственный цикл в рамках муниципального образования, региона либо группы регионов – такой проект будет успешно реализован и окажет положительный социально-экономический эффект на территорию. В противном же случае может возникнуть угроза негативного влияния инвестиционного проекта на сложившееся хозяйство, так как он может нарушить сформировавшиеся прочные связи и полностью изменить порядок взаимодействия субъектов экономической деятельности в рамках определенной территории.

Ввиду отсутствия в географических работах подобных комплексных исследований и методики, мы предложили авторскую программу для изучения пространственного размещения инвестпроектов, которая описана нами ранее [13].

Для анализа инвестиционного развития и географии инвестпроектов Ставропольского края использованы официальные данные региональных министерств и ведомств [14], материалы региональных и отраслевых стратегий, документов территориального планирования, аналитические и статистические данные, характеризующие инвестиционный потенциал территории, на основе которых составлена авторская база инвестиционных проектов региона, включающая 172 планируемых объекта.

Результаты и их обсуждение

Ставропольский край – регион Юга Европейской части России. Его территория располагается между горными этническими республиками и равнинными преимущественно русскоязычными регионами.

Для Ставропольского края характерна аграрно-индустриальная направленность специализации экономики. Основные отрасли экономики: пищевая и химическая промышленность, электроэнергетика, сельское хозяйство, строительство, торговля и общественное питание, туризм и рекреация. Промышленное производство рассредоточено по городам края, ареалы концентрации расположены в его западной и южной частях, где находятся крупнейшие населенные пункты и развита транспортная инфраструктура. Регион занимает 4 место по качеству сельскохозяйственных угодий в России, но имеет существенную дифференциацию территории по степени благоприятности для сельскохозяйственного использования: от наиболее благоприятных в юго-западной части края до рискованного земледелия в восточной части. Южная часть края обладает уникальными туристско-рекреационными ресурсами. В основе территориальной структуры экономики лежит радиально-кольцевая структура, сформированная промышленным узлом на западе края, группой промышленных центров и транспортными путями различного значения. Поддержку структуры по периферии территории осуществляют промышленные пункты, которые также расположены на федеральных и региональных трассах.

Наше исследование, основанное на анализе динамики развития инвестиционного процесса в регионах, показало, что Ставропольский край относится к типу «устойчивые середняки»: его позиция в по объему инвестиций в основной капитал, а также по инвестициям на душу населения в период 1990–2012 гг. оставалась практически неизменной.

Структура инвестиций в основной капитал Ставропольского края за период с 2006 по 2012 гг. претерпела существенные трансформации: вдвое сократилось финансирование сферы транспорта и связи, практически полностью – сферы недвижимости. Вложения в сельское хозяйство, производство энергии, газа и воды, а также строительство несколько увеличились, но в целом их доля невысока. Выросли вложения в социальную сферу, госуправление и оборону. Одновременно меняется и структура ВРП: сократились доли сельского хозяйства, производства электроэнергии, газа и воды, транспорта и связи, выросли доли строительства, торговли, госуправления и обороны. В структуре отгруженных товаров и услуг возросла доля производства пищевых продуктов и металлургического производства, сократилось производство кокса и нефтепродуктов, транспортных средств и оборудования.

Анализ инвестиционных проектов Ставропольского края показал, что из 172 инвестиционных проектов половина направлена развитие промышленного сектора экономики, включая агропромышленное производство, $\frac{1}{4}$ – на развитие сельского хозяйства, 15% – на развитие сферы услуг (что является довольно низким показателем для наличия уникального в России эколого-курортного региона) и незначительная часть связана с развитием инфраструктуры территории.

Всего на территории региона реализовано 19 инвестпроектов, преимущественно в городах южной части края и промузла. Осуществленные инвестпроекты в сфере сельского хозяйства и АПК были немногочисленны, имели низкую стоимость и носили локальный характер в отношении развития отраслевой структуры экономики региона. Крупнейшие же проекты были направлены в развитие сферы туризма и нефтегазохимической промышленности. Большинство реализованных проектов были увязаны со специализацией территории и в большинстве своем направлены на увеличение объемов производства и (или) оказания услуг, но не углубление специализации с расширением спектра услуг или ассортимента товаров.

Основная масса планируемых инвестиционных проектов в западной части Ставрополя связана с промышленным развитием, в восточной – с агропромышленным комплексом, за исключением территорий добычи и переработки углеводородного сырья, в южной части преобладают инвестпроекты рекреационно-лечебного и инфраструктурного направлений.

Абсолютное большинство инвестиционных проектов не зависимо от их отраслевой принадлежности планируется к реализации в агломерациях южной и западной частях Ставропольского края, где сконцентрирована значительная доля населения и развита транзитная транспортная инфраструктура (рис.). Это свидетельствует о преимущественном тяготении нового бизнеса к потребителю, трудовым ресурсам и транспортным магистралям федерального значения, что позволяет сделать предположение: в рыночных условиях потребительский спрос тянет за собой инвестиционный. Более половины инвестпроектов базируются в городских поселениях, что свидетельствует о несущественности фактора земельной ренты на этапе планирования. Земельные ресурсы, необходимые для реализации проектов в сфере сельского хозяйства и АПК, как правило определяют размещение проектов этой направленности в соответствии со специализацией территории.

Среди крупных инвестпроектов в сфере животноводства планируется создание «Восточного агрокомплекса», строительство МТФ, площадок по выращиванию птицы, строительство откормочников свиней, теплиц.

Инвестпроекты в секторе перерабатывающей промышленности (за исключением промышленности строительных материалов и электроэнергетики) связаны с преимущественным развитием городских территорий, а также районных центров. Предполагается создание агропромышленного кластера, строительство двух сахарных заводов, индустриального парка регионального уровня, строительство молочного завода, консервного завода, крупнейшего комплекса по переработке мяса птицы.

Развитие промышленности строительных материалов приурочено к крупным месторождениям строительного сырья и связано с реализацией проектов по строительству металлургического завода по производству ар-

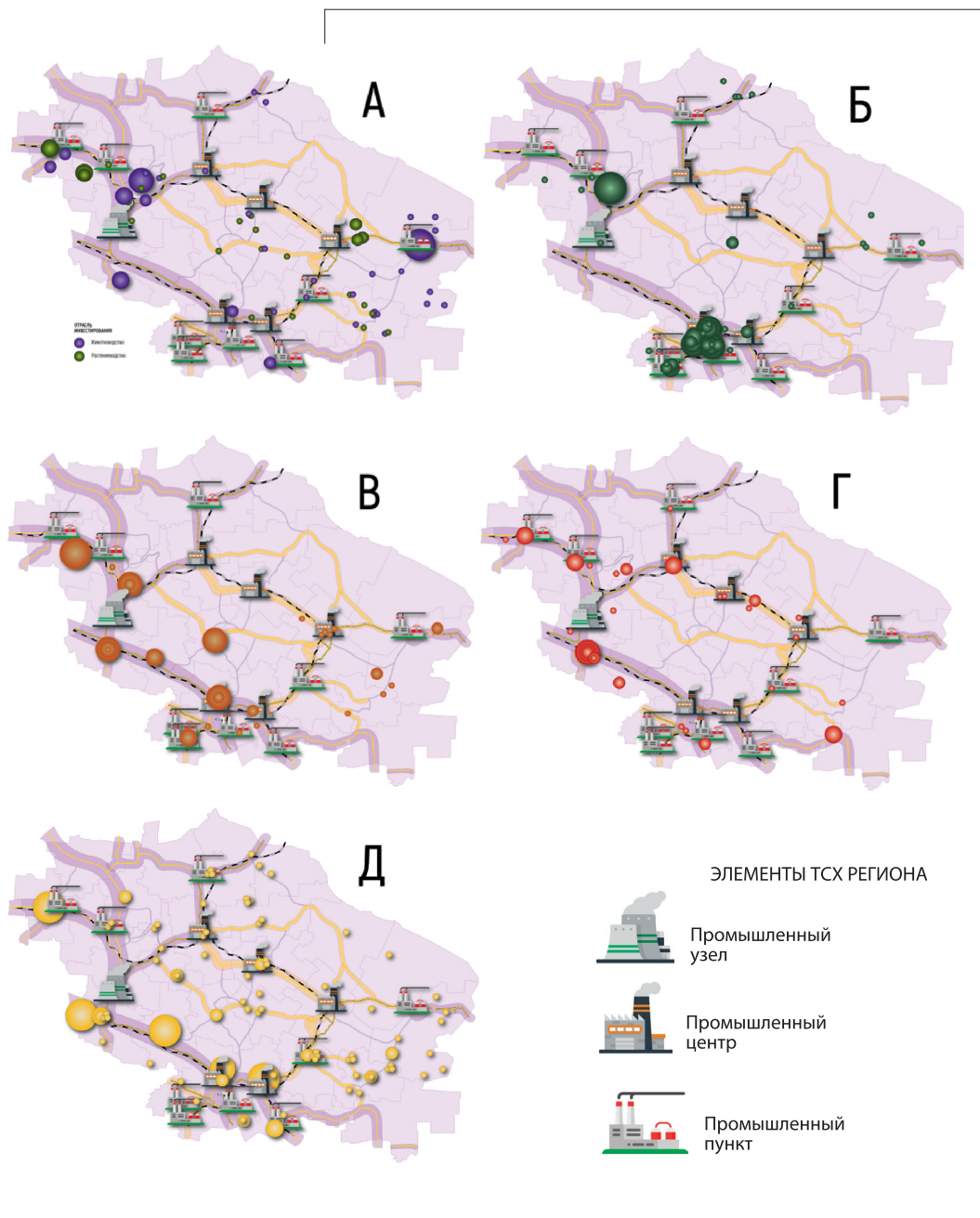


Рисунок.

География инвестиционных проектов Ставропольского края (по состоянию на 2016 г.) в сфере:

А) сельского хозяйства, Б) туризма, В) нефтехимической промышленности, машиностроения, электроэнергетики, Г) промышленности строительных материалов, Д) пищевой и перерабатывающей промышленности.

матуры, завода по производству газобетона, по выпуску керамического облицовочного кирпича, по производству стекломagneзитовых плит, цементного завода.

Значительные вложения предполагаются в отрасль специализации Ставропольского края на юге России – электроэнергетику, а также машиностроение и химическую промышленность. Предполагается реализация таких инвестпроектов, как строительство энергоблока электростанции, солнечной электростанции, гидроэлектростанции, автомобильного завода, завода по производству полимеров, производство одноразовой посуды, производство высокотехнологичных медицинских препаратов, завода по производству инулина и фруктозы, стеклопластиковых труб.

Главными туристическими центрами края согласно существующим инвестиционным проектам останутся территория KBM (лечебно-оздоровительный туризм), а также ряд восточных районов (охота и рыбалка, лечебно-оздоровительный, этнический туризм) и пригороды Ставропольской агломерации (экстремальный и туризм выходного дня).

Трудовой потенциал ряда территорий недостаточно эффективно используется, что провоцирует миграцию лиц трудоспособного возраста в поисках работы и концентрацию населения вокруг ведущих экономических центров региона. В результате этого усиливается социально-экономическая поляризация между развитыми и трудообеспеченными и депопулирующими экономически отсталыми территориями.

Анализ планируемых сроков реализации инвестиционных проектов показывает, что средний горизонт планирования в крае невысок – 3 года. Только 2 территории оказались достаточно привлекательными для инвестиционного освоения в долгосрочной перспективе (более 10 лет) – это строительство комплекса переработки газа Северного Каспия в этилен и его производные и развитие плодоводства, ягодниководства и овощеводства закрытого грунта, включая закладку высокотехнологичного в обслуживании интенсивного сада. Только 11 проектов (6%) рассчитаны на среднесрочную перспективу, они привязаны к узловым элементам ТСХ Ставропольского края. Будучи устойчивыми во времени элементами территориальной и отраслевой структуры экономики региона, обеспеченными транспортной инфраструктурой, концентрирующими трудовые ресурсы и потребительский спрос, они позволяют инвесторам планировать в средне- и долгосрочной перспективе.

Для развития Ставропольского края создано 12 региональных промышленных парков [14]. Все они расположены в городах, которые рассматриваются представителями власти как полюса и центры роста. Сопоставление территориальной структуры региональных промышленных парков (РИП) с ареалами концентрации инвестиционных проектов на территории региона ведет к выводу о их нерациональном планировании: ряд ареалов concentra-

ции инвестпроектов удалены от действующих РИП, некоторые соседствующие РИП дублируют специализацию друг друга, запланировано размещение узкоспециализированного РИП, не подразумевающего развития сопутствующих производств и наличия большого количества резидентов.

Анализ современной территориальной структуры хозяйства Ставропольского края позволил выявить проблемные места в цепочке «производство-переработка-потребление».

Во-первых, это неполное использование ресурсов для развития промышленности строительных материалов. Проблема связана с особенностями размещения потребителя – наиболее активно строительство ведется на территории западных и центральных районов Ставрополя, где и размещены предприятия строительного комплекса.

Во-вторых, в течение всего периода развития овцеводства на территории региона так и не сформировалось комплекса по обработке шерсти и производству продукции текстильной промышленности, в то время как сырье для этой подотрасли имеется в крае в достаточном количестве и оно имеет высокое качество.

В-третьих, на территории западных и северных районов Ставропольского края сформировался ареал выращивания овощей, но существуют проблемы с хранением и переработкой овощей, так как соответствующая инфраструктура и предприятия на данной территории отсутствуют. В то же время, формируемый овощеводческий кластер может повысить конкурентные преимущества экономики края как на территории юга России, так и в рамках реализации комплексных программ обеспечения продовольственной безопасности страны.

В-четвертых, новая активно развивающаяся зона выращивания технических культур – западные района края – не обеспечена достаточным количеством перерабатывающих предприятий данной отрасли. У единственного на территории края сахарного завода не достаточно мощности для переработки существующего объема сахарной свеклы, в связи с чем производители данного вида продукции вынуждены искусственно сокращать объемы его производства, чтобы сократить риски нереализации продукции.

Выявленные тренды изменения сельского хозяйства, промышленности и транспорте определяют необходимость разработки программ по развитию и поддержке территорий, находящихся в периферийных зонах края и территориях, отдаленных от основных транспортных магистралей. Инвестиционное развитие региона должно соответствовать указанным программам и базироваться на принципах государственно-частного партнерства, чтобы гармонизировать интересы территории и инвесторов.

Развитие урбанизированных территорий Ставрополя должно проводиться через диверсификацию экономики, усиление роли высокотехнологических производств (фармацевтическая промышленность, химическая про-

мышленность, нанотехнологии). Эффективное развитие и сохранение жизнеспособности городских населенных пунктов с узкой специализацией экономики может быть обеспечено через реализацию программ развития моногородов.

Реализация запланированных крупных инвестиционных проектов, на наш взгляд, будет приурочена к крупным элементам территориальной структуры хозяйства региона. Способствовать росту инвестиционной активности может актуализация специализации и географии РИП с реальными механизмами послабления налоговой базы для инвесторов, закрепленными на уровне федерального законодательства.

Необходимо пересмотреть предложенные крупные инвестиционные проекты ввиду их недостаточной проработанности, несоответствия территориально-отраслевой структуре хозяйства и экономической целесообразности.

Успехи в инвестиционном освоении во многом будут связаны с инфраструктурным развитием субъекта. Улучшение экономико-географического положения периферийных и окраинных муниципальных районов может быть реализовано через развитие транспортной сети. В частности, намечаемое строительство железной дороги, свяжет поселения а восточной части края с западной и даст прямой выход к портам Каспийского моря и международному транспортному коридору «Север – Юг», кроме того, будет способствовать формированию коридора «Каспий – Черное море». Территории края, попадающие в зону влияния новой транспортной системы, приобретут повышенную градостроительную и инвестиционную привлекательность.

Выводы

Проведенный анализ позволил сформулировать следующие выводы:

1. Знание ареалов территориальной концентрации населения и промышленности, а также особенностей логистической структуры региона, позволяет эффективнее планировать географию и отраслевую направленность РИП.
2. Инвестиции тяготеют к урбанизованным, устойчивым элементами территориальной структуры хозяйства региона (промышленным центрам, узлам и пунктам, транспортным магистралям федерального уровня), концентрирующим трудовые ресурсы и имеющим высокий потребительский спрос и, как правило, соответствуют локальной специализации территории.

3. Большая часть реализованных инвестпроектов имеет низкую стоимость и краткосрочный горизонт планирования, размещена в трудоизбыточных ареалах, увязана с локальной специализацией и направлена на увеличение объемов производства и (или) оказания услуг, но не на углубление специализации с расширением спектра услуг или ассортимента товаров.
4. Размер инвестиций напрямую зависит от транспортно-географического положения территории, что связано со стремлением производителей к минимизации транспортных издержек.
5. В целях совершенствования инвестиционной деятельности на территории Ставропольского края необходимо инвестировать в создание в регионе перерабатывающих предприятий в сфере промышленности строительных материалов (в центральной и западной части края), текстильной промышленности (в восточной части), хранения и переработки продукции овощеводства (в северо-западной и юго-восточной частях) и технических культур (в западной части). Создание фармацевтико-химического кластера в промышленном узле и транспортно-логистического комплекса в пределах западной зоны позволит региону приобрести уникальную специализацию на Юге России и обеспечит устойчивый рост ВРП в среднесрочном периоде. Для гармоничного развития восточных территорий следует обеспечить их транспортную доступность до наиболее значимого города восточной части и создать в нем развитую социальную инфраструктуру.

Библиографический список

1. Лещева М.Г. Тенденции развития и инвестиционные возможности сельского хозяйства региона / Лещева, М. Г. // Региональная экономика: теория и практика. 2014. № 12. С. 2–8.
2. Довготько Н.А. Устойчивый эколого-экономический рост экономики регионов РФ: инвестиционная составляющая / Н.А. Довготько, Л.И. Медведева // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. 2014. № 1 (61). С. 6.
3. Ковачева К.М. Прогнозирование инвестиций в Ставропольском крае / К.М. Ковачева, Л.И. Медведева // Наукапарк. 2013. № 4 (14). С. 90–93.
4. Воробьева Н.В. К вопросу о возможностях привлечения иностранных инвестиций в аграрный сектор Ставропольского края / Воробьева, Н.В. // Сибирская финансовая школа. 2011. № 1 (84). С. 27–28.

5. Воробьева Н.В. Анализ иностранных инвестиций в экономику Ставропольского края (в сравнении 2006 и 2010 г.) / Н.В. Воробьева, Е.Г. Наливайченко // Вопросы экономических наук. 2011. № 6 (51). С. 80–81.
6. Трухачев А.В. Состояние и перспективы развития особой экономической зоны туристско-рекреационного типа в Ставропольском крае / А.В. Трухачев, Е.В. Селеванова // Гуманитарные и социально-экономические науки. 2014. № 5. С. 141–145.
7. Глотова И.И. Эффективность инвестиционных проектов в аграрном секторе региона / И.И. Глотова, Е.П. Томилина, С.Г. Шматко // Экономика сельского хозяйства России. 2015. № 6. С. 43–52.
8. Завьялов М. В. Привлечение иностранных инвестиций в региональную экономику (на материалах Ставропольского края) / М.В. Завьялов // Проблемы экономики и юридической практики. 2013. № 4. С. 156–157.
9. Новосельцева А.П. Привлекательность Ставропольского края для привлечения иностранных инвестиций при вступлении России в ВТО / А.П. Новосельцева // Вестник Ставропольского государственного педагогического института. 2009. Т. 1. № 1–12. С. 249–252.
10. Клишина Ю.Е. Оценка инвестиционной активности в региональном агропромышленном комплексе / Ю.Е. Клишина, О.Н. Углицких // Экономический анализ: теория и практика. 2016. № 6 (453). С. 14–25.
11. Дариенко Ж.Ю. Инвестиции как важный фактор развития предпринимательства в виноградовинодельческом подкомплексе АПК Ставропольского края / Ж.Ю. Дариенко // Terra economicus. 2007. Т. 5. № 1-2. С. 94–97.
12. Митрофанова И.В. Инвестиционные приоритеты и целевые программы развития социохозяйственного комплекса Ставрополя / И.В. Митрофанова, Н.П. Иванов, И.А. Митрофанова // Наука Юга России. 2015. Т. 11. № 4. С. 59–68.
13. Корнева Л.И. Подход к анализу эффективности пространственного размещения инвестиционных проектов / Л.И. Корнева // Наука. Инновации. Технологии. 2013. №3. С. 91–101.
14. Официальный сайт Министерства экономического развития Ставропольского края. URL: <http://www.stavinvest.ru>

References

1. Leshheva M.G. Tendencii razvitiya i investicionnye vozmozhnosti sel'skogo hozjajstva regiona (Tendencies of development and investment opportunities of the region's agriculture) / M.G. Leshheva // Regional'naja jekonomika: teorija i praktika. 2014. № 12. S. 2–8.
2. Dovgot'ko N.A. Ustojchivyy jekologo-jekonomicheskij rost jekonomiki regionov RF: investicionnaja sostavljajushhaja (Sustainable Ecological and Economic Growth of the Economy of the Regions of the Russian Federation: the Investment Component) / N.A. Dovgot'ko, L.I. Medvedeva // Upravlenie jekonomicheskimi sistemami: jelektronnyj nauchnyj zhurnal. 2014. № 1 (61). S. 6.
3. Kovacheva K.M. Prognozirovanie investicij v Stavropol'skom krae (Forecasting of investments in the Stavropol Territory) / K.M. Kovacheva, L. I. Medvedeva // Naupark. 2013. № 4 (14). S. 90–93.
4. Vorob'eva N.V. K voprosu o vozmozhnostjah privlechenija inostrannyh investicij v agrarnyj sektor Stavropol'skogo kraja (To the question of the possibilities of attracting foreign investments into the agrarian sector of the Stavropol Territory) / N.V. Vorob'eva // Sibirskaja finansovaja shkola. 2011. № 1 (84). S. 27–28.
5. Vorob'eva N.V. Analiz inostrannyh investicij v jekonomiku Stavropol'skogo kraja (v sravnenii 2006 i 2010 gg.) (Analysis of foreign investment in the economy of the Stavropol Territory (in comparison with 2006 and 2010)) / N.V. Vorob'eva, E.G. Nalivajchenko // Voprosy jekonomicheskikh nauk. 2011. № 6 (51). S. 80–81.
6. Truhachev A.V. Sostojanie i perspektivy razvitiya osoboj jekonomicheskoy zony turistsko-rekreacionnogo tipa v Stavropol'skom krae (The state and prospects of development of a special economic zone of tourist-recreational type in the Stavropol Territory) / A.V. Truhachev, E.V. Selevanova // Gumanitarnye i social'no-jekonomicheskie nauki. 2014. № 5. S. 141–145.
7. Glotova I.I. Jefferektivnost' investicionnyh proektov v agrarnom sektore regiona (Efficiency of investment projects in the agrarian sector of the region) / I.I. Glotova, E.P. Tomilina, S.G. Shmatko // Jekonomika sel'skogo hozjajstva Rossii. 2015. № 6. S. 43–52.
8. Zav'jalov M.V. Privlechenie inostrannyh investicij v regional'nuju jekonomiku (na materialah Stavropol'skogo kraja) (Attraction of foreign investments in the regional economy (based on the materials of the Stavropol Territory)) / M.V. Zav'jalov // Problemy jekonomiki i juridicheskoy praktiki. 2013. № 4. S. 156–157.
9. Novosel'ceva A. P. Privlekatel'nost' Stavropol'skogo kraja dlja privlechenija inostrannyh investicij pri vstuplenii Rossii v VTO (Attractiveness of the Stavropol Territory for attracting foreign investments upon Russia's accession to the WTO) / A.P. Novosel'ceva // Vestnik Stavropol'skogo gosudarstvennogo pe-dagogicheskogo instituta. 2009. T. 1. № 12-1. S. 249–252.

10. Klishina Ju.E. Ocenka investicionnoj aktivnosti v regional'nom agro-promyshlennom komplekse (Evaluation of investment activity in the regional agro-industrial complex) / Ju.E. Klishina, O.N. Uglickih // *Jekonomicheskij analiz: teorija i praktika*. 2016. № 6 (453). S. 14-25.
11. Darienko Zh.Ju. Investicii kak vazhnyj faktor razvitija predprinimatel'stva v vinogradovinodel'cheskom podkomplekse APK Stavropol'skogo kraja (Investments as an important factor in the development of entrepreneurship in the wine-growing subcomplex of the agro-industrial complex of the Stavropol region) / Zh.Ju. Darienko // *Terra economicus*. 2007. T. 5. № 1-2. S. 94-97.
12. Mitrofanova I.V. Investicionnye prioritety i celevye program-my razvitija sociohozjajstvennogo kompleksa Stavropol'ja (Investment priorities and target programs for the development of the socioeconomic complex of Stavropol Territory) / I.V. Mitrofanova, N.P. Ivanov, I.A. Mitrofanova // *Nauka Juga Rossii*. 2015. T. 11. №4. S. 59-68.
13. Korneva L.I. Podhod k analizu jeffektivnosti prostranstvennogo razmeshhenija investicionnyh proektov (Approach to the analysis of the effectiveness of spatial allocation of investment projects) / Korneva, L. I. // *Nauka. Inno-vacii. Tehnologii*. 2013. №3. S. 91-101.
14. Oficial'nyj sajt Ministerstva jekonomicheskogo razvitija Stavropol'skogo kraja (Official website of the Ministry of Economic Development of the Stavropol Territory). URL: <http://www.stavinvest.ru>.

УДК 595.421(470.63)

Котти Б.К. [Kotti B.K.],
Заикина И.Н. [Zaikina I.N.],
Жильцова М.В. [Zhiltsova M.V.]

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИКСОДОВОГО КЛЕЩА *HYALOMMA MARGINATUM* КОХ (ACARI: IXODIDAE) В СТАВРОПОЛЬСКОМ КРАЕ

Distribution of the ixodid tick *Hyalomma marginatum* Koch (Acari: Ixodidae) in the Stavropol region

Распространение иксодовых клещей, как и других временных эктопаразитов, определяется размещением их хозяев и абиотическими факторами. Одним из массовых видов сем. Ixodidae в Предкавказье является *Hyalomma marginatum* – активный переносчик крымской геморрагической лихорадки. На территории Ставрополья складывается благоприятная обстановка для обитания этого вида. Это наличие подходящих хозяев и приемлемая температура. Вместе с тем, в каждой ландшафтной провинции термические условия и численность хозяев имаго весьма отличны, что сказывается на выживаемости, сроках развития и численности этого вида. *H. marginatum* встречается по всему Ставропольскому краю, предпочитая полупустынные, степные и луговые биотопы и отсутствуя в сплошных лесных массивах. Прокормителями имаго *H. marginatum* на Ставрополье служат, главным образом, крупный и мелкий рогатый скот. Наибольшее значение в качестве хозяев личинок и нимф имеют массовые виды птиц, кормящиеся на земле в местах выпаса скота, заяц-русак и ежи. Численность клеща нарастает от горных ландшафтов к полупустынным, где он распространен повсеместно и является доминирующим видом.

Distribution of ixodid ticks, as well as other temporary ectoparasites, is determined by the location of their hosts and abiotic factors. One of the numerous species of ixodid ticks in Ciscaucasia is *Hyalomma marginatum* Koch – an active carrier of the Crimean haemorrhagic fever. In the territory of Stavropol Region there is a favourable environment for the habitation of this species. At the same time, in each landscape province, the thermal conditions and the number of hosts of the imago are very different, which affects the survival, development and abundance of this species. *H. marginatum* is found around the Stavropol Region, preferring semi-desert, steppe and meadow habitats. Hosts of imagoes of *H. marginatum* in the Stavropol region is, mainly, cattle. The greatest importance as hosts of larvae and nymphs are abundant species of birds feeding on the ground, hare and hedgehogs. The number of ticks increases from mountainous to semi-desert landscapes where it is widespread and is the dominant species.

Ключевые слова: распространение, факторы внешней среды, иксодовые клещи, *Hyalomma marginatum*.

Key words: distribution, environmental factors, ixodid ticks, *Hyalomma marginatum*.

Введение

Hyalomma marginatum Koch, 1844 – палеарктический представитель обширного семейства иксодовых клещей, важнейших переносчиков и резервуаров инфекционных и инвазионных болезней человека и животных. Среди видов Ixodidae, обитающих на Ставрополье, *H. marginatum* выделяется своей многочисленностью, широким распространением и паразитированием на многих домашних и диких животных. Это основной пере-

носчик крымской геморрагической лихорадки в природном очаге и источник заражения возбудителем этой болезни человека.

Обстоятельные экологические исследования иксодид на Северном Кавказе начались в первой половине XX в. К концу прошлого столетия были изучены основные черты распространения, распределения между хозяевами, сезонные изменения активности нападения на прокормителей массовых видов иксодовых клещей рода *Hyalomma* в Предкавказье.

Однако, опубликованные данные о рецентном состоянии населения переносчиков и тенденциях его изменений предварительны и отрывочны.

Для оценки современного состояния природных очагов трансмиссивных заболеваний важным и необходимым является изучение их ландшафтно-биотопического распределения на территории Предкавказья, составление количественной характеристики активности нападения на хозяев.

В жизненном цикле клещей рода *Hyalomma* Koch, 1844 стадии личиночного, нимфального и имагинального питания, когда они являются настоящими паразитами, чередуются с разделяющими их непаразитическими стадиями эмбрионального развития, метаморфоза напитавшихся личинок и нимф, яйцекладки самок и существованием голодающих особей до встречи с хозяевами. Двуххозяинный тип развития *H. marginatum* осуществляется при питании личинок и нимф на птицах, зайце-русаке и ежах, а имаго – на копытных. Личинка, закончив кровососание, остается прикрепленной к хозяину, линяет здесь же на нимфу, и клещ отпадает по окончании нимфального питания.

Период непаразитического существования в жизненном цикле *H. marginatum* составляет обычно не менее одной трети. В это время клещи подвержены воздействию тех же факторов, что и свободноживущие членистоногие.

Несмотря на широкое распространение, у *H. marginatum* весьма неравномерное биотопическое распределение и численность. Нашей целью было выявление возможного механизма воздействия некоторых факторов на размещение *H. marginatum* в Ставропольском крае. При этом первостепенно важным представилось дать оценку влияния размещения основных хозяев и температуры окружающей среды на жизненный цикл клеща.

Материалы и методы исследований

В основу работы положены материалы, полученные авторами в результате полевых исследований в лесостепных, степных, полупустынных и предгорных ландшафтах Ставропольского края в 1999–2014 гг. Используются литературные данные об условиях обитания млекопитающих и птиц, сроках развития *H. marginatum* в лаборатории и материалы Ставропольского гидрометеорологического центра о температуре воздуха.

На наличие иксодовых клещей обследовали 3,5 тысячи голов крупного и 2,2 тысяч голов мелкого рогатого скота, 90 голов других домашних парноко-

пытных и непарнокопытных млекопитающих, 55 особей хищных, 240 грызунов, 17 зайцеобразных, 74 особи насекомоядных 2 видов и 1110 особей диких и домашних птиц 27 видов. На учет клещей в открытых биотопах затрачены 190 человеко-часов, пройдены 172 флаго-км маршрутов, отработали 30600 ловушко-ночей [4, 7]. Использованы также материалы Л.И. Шапошниковой, Н.В. Ермоловой, Н. В. Цапко, А.Ю. Жильцовой

Обработку данных, полученных при учете клещей, проводили по В.Н. Беклемишеву [2]. При этом высчитывали индекс (показатель) обилия – среднее число особей данного вида паразита, приходящееся на единицу учета, индекс встречаемости – процент объектов, на которых обнаружены эктопаразиты данного вида или группы видов, по отношению к общему числу обследованных объектов и индекс доминирования по обилию – процент особей паразитов одного вида от суммы особей всех видов паразитов данной систематической группы.

Температуру нижнего порога развития блох и сумму эффективных температур, необходимых для развития одного поколения *Hyalomma marginatum*, рассчитывали по опубликованным экспериментальным данным Л.Е. Щур [14], применяя обычные формулы [3]:

$$C = T^1 \cdot p^1 - T \cdot p / p^1 - p \cdot X = (T - C) \cdot p,$$

где C – температура нижнего порога развития,
 T, T^1 – температура, при которой совершается развитие преимагинальных фаз,
 p, p^1 – число суток развития,
 X – сумма эффективных температур, необходимая для развития одного поколения клещей (тепловая константа).

Результаты исследований и их обсуждение

Виды рода *Hyalomma* распространены в Южной Европе, по всей территории Африки, в Передней, Средней и Центральной Азии, то есть в пределах Старого Света. Большая часть видов распространена в Передней Азии и Северо-Восточной Африке; южнее экватора проникают лишь несколько видов. Меньшим видовым разнообразием представлены Южная Европа, Средняя, Центральная и Южная Азии.

Большинство видов клещей этого рода – обитатели пояса пустынь, меньшее число видов населяет сухие редколесья и кустарники. Высокая приспособленность этих клещей к обитанию в жарких, сухих, открытых биотопах проявляется как в морфологии и физиологии, так и в поведении.

Характерная особенность рода *Hyalomma* – отсутствие специфичности в выборе хозяев у большинства видов клещей. Почти все виды клещей в ста-

дии имаго паразитируют на различных видах домашнего скота, разводимого в пределах их ареала.

Млекопитающие отрядов *Artiodactyla* и *Perissodactyla* – главные прокормители имаго *H. marginatum*. Основными хозяевами неполовозрелых фаз этого вида являются птицы разных таксономических групп: отряд *Galliformes*, семейство *Phasianidae* и отряд *Passeriformes*, семейства *Alaudidae* и *Corvidae*. В основном, это птицы, гнездящиеся и добывающие корм на земле в условиях, когда контакт с личинками клещей *H. marginatum* легко осуществим.

Но птицы не являются единственными прокормителями ювенильных фаз этого клеща. В большом количестве личинки и нимфы *H. marginatum* встречаются на млекопитающих отрядов зайцеобразные, *Lagomorpha* (семейство *Leporidae*, заячьи) и насекомоядные, *Insectivora* (семейств *Erinaceidae*, ежиные). Паразитирование личинок и нимф *H. marginatum* известно на рептилиях (семейство *Lacertidae*, ящерицы).

H. marginatum Koch, 1844 обладает исключительно обширным ареалом, включающим Средиземноморье, Среднюю Азию, большую часть Африки и Индостанский полуостров. Ареал вида почти совпадает с ареалом рода, его нет лишь в Центральной Азии. В России и сопредельных государствах *H. marginatum* встречается на Украине, в Крыму, Предкавказье, Калмыкии, Дагестане, Нижней Волге, Закавказье, Казахстане. В Среднеазиатских государствах обычно встречается гораздо реже других видов. Северная граница распространения прежде всего определяется теплой и ранней весной. В Казахстане и Средней Азии резкое отрицательное воздействие оказывает высокая сухость воздуха. Здесь эти клещи придерживаются увлажненных мест по речным долинам или поднимаются в горы [8].

Ставропольский край включает лесостепную, степную, полупустынную ландшафтные провинции, провинции предгорных степных и лесостепных ландшафтов и провинции среднегорных ландшафтов лесостепей и остепненных лугов [13]. Здесь обитают 324 вида птиц, 22 вида пресмыкающихся [12].

В каждой провинции можно выделить группы многочисленных и обычных видов млекопитающих, птиц и пресмыкающихся, которые имеют наибольшее значение в формировании трофических связей *H. marginatum* [10].

Ставропольский край – один из ведущих аграрных регионов России. Пахотные земли – наименее пригодный биотоп для многих иксодид, в том числе и для *H. marginatum*. Это проявляется в меньшей численности прокормителей всех активных фаз клеща. Наименее подверглись распадке восточные и северо-восточные, полупустынные районы края. В Нижнекумско-Прикаспийском ландшафте она составляет 29,8%, а в Чограйско-Прикаспийском ландшафте – 37,1% от площади сельхозугодий [5]. Скот выпасают повсеместно, но пастбища распространены, преимущественно, в степной и полупустынной зонах, составляя более половины (55%) площади последней [11].

H. marginatum встречается по всему Ставропольскому краю, предпочитая полупустынные, степные и луговые биотопы и отсутствуя в сплошных лесных массивах. Численность клеща нарастает от горных ландшафтов к полупустынным, где он распространен повсеместно и является доминирующим видом. В степной и лесостепной ландшафтной зоне клещи *H. marginatum* этого вида отмечены нами на степных участках, отсутствуя внутри сплошных лесных массивов. В предгорной ландшафтной зоне нами найдены единичные экземпляры *H. marginatum*.

Из птиц, осмотренных с июня по сентябрь, 67,7% оказались поражены клещами. С них мы собрали 22884 экземпляров иксодовых клещей. Из 27 видов обследованных птиц, клещей *H. marginatum* обнаружили на представителях 16 видов: обыкновенной пустельге (*Falco tinnunculus*), серой куропатке (*Perdix perdix*), перепеле (*Coturnix coturnix*), фазане (*Phasianus colchicus*), индейке (*Meleagris gallopavo*), домашнем гусе (*Anser anser*), цесарке (*Numida meleagris*), домашней курице (*Gallus gallus*), кольчатой горлице (*Streptopelia decaocto*), сизоворонке (*Coracias garrulous*), зеленом дятле (*Picus viridis*), обыкновенном скворце (*Sturnus vulgaris*), сороке (*Pica pica*), граче (*Corvus frugilegus*), серой вороне (*Corvus cornix*), галке (*Corvus monedula*). Клещи на домашнем гусе, цесарке, домашней курице, обыкновенном скворце и зеленом дятле регистрируются нами на территории Ставрополя впервые.

Наибольшее значение в качестве хозяев-прокормителей личинок и нимф *H. marginatum* имеют массовые виды птиц, кормящиеся на земле в местах выпаса скота. Индекс обилия для ювенильных стадий *H. marginatum* для птиц в июле убывал в ряду: грач (65,1) – индейка (49,3) – сорока (39,2) – серая куропатка (30,8) – серая ворона (8,1) – кольчатая горлица (0,7), а в августе – индейка – (42,9), грач – (29,9) – серая куропатка – (7,8), то есть был наивысшим у птиц, кормящихся на пастбищах. Одним из многочисленных и широко распространенных птиц этой категории является грач. Обилие *H. marginatum* на грачах бывает выше, чем на других птицах и достигает показателей, рекордных для иксодовых клещей, поражающих птиц. Исключение составляют сизый голубь и обыкновенная горлица, на которых клещей *H. marginatum* не нашли.

Большое число личинок и нимф *H. marginatum* обнаружили на зайце-русаке (*Lepus timidus*), ушастом (*Hemiechinus auritus*) и южном (*Erinaceus roumanicus*) ежах. Ежи из-за низкой способности к самоочищению от эктопаразитов являются хорошими прокормителями клещей. Индекс доминирования *H. marginatum* в сборах с этих насекомоядных составил 93%. Остальные клещи принадлежали к родам *Ixodes* и *Rhipicephalus*. Максимальное число особей *H. marginatum* на южном еже – 427 экз. (318 личинок и 109 нимф). Средний индекс обилия личинок и нимф *H. marginatum* в течение июля и августа на ушастом еже составил – 23,3, а на южном еже был в три раза выше – 67,4. Этот показатель для зайца равен 41,3.

Таблица 1. ПАРАЗИТИРОВАНИЕ ПРЕИМАГИНАЛЬНЫХ ФАЗ
HYALOMMA MARGINATUM НА ГРАЧАХ В СТАВРОПОЛЬСКОМ КРАЕ

Месяц	Число птиц	Индекс обилия	
		личинки	нимфы
Апрель	100	0	0
Май	18	0	0
Июнь I* II	52	0	0
	33	3,6	0
Июль I II	12	10,7	2,3
	110	25,8	21,9
Август I II	96	22,1	24,5
	79	7,0	10,8
Сентябрь I II	44	0,1	1,3
	112	0,7	1,4
Всего:	623		

Примечание. * I, II – первая и вторая половины месяца.

Неполовозрелые фазы клещей *H. marginatum* на грызунах отсутствовали. По-видимому, грызуны в качестве прокормителей преимагинальных фаз *H. marginatum* в Предкавказье имеют минимальное значение.

Паразитирование личинок *H. marginatum* на птицах отмечено нами со второй половины июня, а нимф – с первой половины июля. Обилие личинок было максимальным во второй половине июля – первой половине августа и снизилось к сентябрю. Нимфы наиболее многочисленны во второй половине июля и в первой половине августа, в сентябре показатели минимальные. В октябре на птицах еще могут встречаться единичные личинки и нимфы (табл. 1). Зимуют голодные имаго и пившие нимфы.

В лесостепных и предгорных ландшафтах Ставропольского края индекс обилия *H. marginatum* на скоте в среднем ниже, чем в это же время в полупустынных и степных ландшафтах.

Нападение имаго *H. marginatum* на сельскохозяйственных млекопитающих в полупустынных и степных ландшафтах Ставропольского края весной начинается в марте, достигая максимума в мае (7,6). В отдельные годы (2008) индекс обилия для *H. marginatum* на крупном рогатом скоте достигали 16,5. В период с максимальным индексом обилия *H. marginatum* на скоте индекс встречаемости этих клещей составлял 78–100%. В последующие месяцы обилие клещей постепенно уменьшается к сентябрю (табл. 2).

Таблица 2.

ОБИЛИЕ ИМАГО HYALOMMA MARGINATUM НА КРУПНОМ И МЕЛКОМ РОГАТОМ СКОТЕ В ПОЛУПУСТЫННЫХ И СТЕПНЫХ ЛАНДШАФТАХ СТАВРОПОЛЬСКОГО КРАЯ

Месяц	Индекс обилия клещей										
	По годам										Сред- ний
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	
март	–	0,8	–	–	4,3	–	–	–	–	0,4	1,8
апрель	2,4	1,4	1,3	4,0	–	–	–	6,4	16,5	14,4	6,6
май	4,5	–	3,4	–	10,6	10,4	–	9,7	6,0	8,6	7,6
июнь	–	–	2,0	1,9	–	–	6,9	–	4,2	4,1	3,8
июль	–	0,3	0,3	–	2,5	–	–	–	1,8	–	1,2
август	0,2	0,6	0,2	1,0	–	0,2	–	–	–	0,5	0,5
сентябрь	0	0,2	0	–	0,2	–	0,1	0,3	0,7	0,2	0,2

Хозяевами-прокормителями имаго иксодовых клещей рода *Hyalomma* в Центральном Предкавказье служат, главным образом, крупный и мелкий рогатый скот. Половозрелых клещей *H. marginatum* снимали также с лошадей, собак и свиней. Имаго *H. marginatum* активно нападают на людей. Они не подстерегают хозяина, а активно движутся к нему. При оценке активности нападения *H. marginatum* на наблюдателя в восточной, полупустынной части изучаемой территории в лесополосах и вблизи них за 1 чел-час мы обнаруживали на отдельных участках в среднем до 10 имаго.

Нижний порог развития *H. marginatum* равен 13,5 °С. Средняя сумма эффективных температур, необходимая самкам *H. marginatum* для того, чтобы начать откладку яиц, равна 57,1 °С. Для завершения эмбрионального развития нужна сумма эффективных температур 364,62 °С. Для полного развития одного поколения *H. marginatum*, с учетом периода питания и метаморфоза, необходима сумма эффективных температур 870,52° [14].

В условиях Ставрополя суммы эффективных температур, необходимые для развития отдельных фаз *H. marginatum* и прохождения всего цикла этого вида, значительно отличаются в ландшафтах разных зон. Так, например, в полупустынных ландшафтах начало яйцекладки *H. marginatum* должно приходиться чаще всего на 2-ю и 3-ю декады мая (табл. 3), а в степных ландшафтах – на 1-ю и 2-ю декады июня (табл. 4). Завершение эмбриогенеза возможно в ус-

ловиях полупустыни в первую половину июля, а в степи – во вторую половину этого месяца. Весь цикл развития *H. marginatum* в полупустынных ландшафтах должен завершаться во 2-ю и 3-ю декады августа, а в степных ландшафтах – в 1-ю и 2-ю, а иногда даже 3-ю декаду сентября. В лесостепных и предгорных ландшафтах развитие завершается не каждый год (табл. 5, 6).

Известно, что *H. marginatum* не выдерживает длительной и холодной зимовки и встречается в тех районах, где в январе среднемесячная температура воздуха не опускается ниже – 5 °С, а средние температуры марта не ниже – 2 °С.

Таблица 3. СУММА ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕМПЕРАТУР ВОЗДУХА ВЫШЕ 15° ПО ГИДРОМЕТЕОСТАНЦИИ ПОС. РОЩИНО (ПОЛУПУСТЫННАЯ ПРОВИНЦИЯ)

	Апрель			Май			Июнь		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1999				7			98,3	191,3	276,3
2000	29			–	–	89,5	180,5	247,5	312,5
2001				24	41	61,9	107,9	194,9	280,9
2002							36,3	74,3	126,3
2003				19	71	131,5	167,5	242,5	303,5

Примечание.

1, 2, 3 – декады. Жирным шрифтом выделены суммы температур, при которых у *H. marginatum* происходит (слева направо):
начало яйцекладки; завершение эмбриогенеза; завершение всего цикла развития.

Таблица 4. СУММА ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕМПЕРАТУР ВОЗДУХА ВЫШЕ 15 °С ПО ГИДРОМЕТЕОСТАНЦИИ Г. БЛАГОДАРНЫЙ (СТЕПНАЯ ПРОВИНЦИЯ)

Годы	Май			Июнь			Июль		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1999	18,7			85,7	180,7	254,7	317,7	476,7	583,4
2000	51,7			125,7	171,7	220,7	310,7	426,7	568,6
2001	11	16	18,2	45,2	108,2	175,2	250,2	359,2	514,2
2002	29,7			54,7	97,7	175,7	273,7	384,7	492,5
2003	17	66	125,4	150,4	214,4	275,4	263,4	447,4	524,4

Примечание.

Обозначения как в табл. 1.

Там, где живет этот клещ, весенний переход через нулевую температуру приурочен к 20–25 числам марта, а средние температуры апреля не ниже 9–10 °С. Весенний период имеет особенно большое значение в жизни клеща, так как в это время идет яйцекладка и созревание яиц, для чего требуется температура не ниже +17 – +19 °С [8]. В Ставропольском крае изотерма апреля +9° проходит по линии Изобильный – Светлоград – Ипатово – Благодарный – Минеральные Воды – Новопавловск. Таким образом, территория юго-западной и южной частей края находится в условиях +7 – +9° [1], а более благоприятны для клещей

	Июль			Август			Сентябрь		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	400,3	504,3	647,3	773,3	900,3				
	415,5	534,5	684,1	807,1	919,1				
	375,9	490,9	652,6	770,6	879,6	970,9			
	316,3	448,3	569,3	685,3	773,3	840,4	918,4		
	389,5	485,5	561,8	669,8	767,8	880,0			

	Август			Сентябрь			Окт.
	1	2	3	1	2	3	1
	680,4	784,4	860,3	905,3			
	672,6	767,6	843,5	896,5			
	629,2	734,2	818,9	854,9	902,9		
	585,5	649,5	692,4	750,4	776,4	818,4	
	619,4	698,4	799,6	844,6	854,6	863,6	877,6

Таблица 5. СУММА ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕМПЕРАТУР ВОЗДУХА ВЫШЕ 15 °С
ПО ГИДРОМЕТЕОСТАНЦИИ Г. СТАВРОПОЛЬ (ЛЕСОСТЕПНАЯ ПРОВИНЦИЯ)

	Май			Июнь			Июль			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1999				43	122	173	267	355	471,6	
2000	52,6			106,6	134,6	162,6	230,6	318,6	438,5	
2001	5			49	93	153	246	387,9		
2002	16,5			25,5	47,5	110,5	197,5	287,5	382,1	
2003	6	49	100,7	115,7	166,7	206,7	285,7	347,7	396,1	

Примечание. Обозначения как в табл. 1.

Таблица 6. СУММА ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕМПЕРАТУР ВОЗДУХА ВЫШЕ 15°С
ПО ГИДРОМЕТЕОСТАНЦИИ Г. ГЕОРГИЕВСК
(ПРОВИНЦИЯ ПРЕДГОРНЫХ ЛАНДШАФТОВ)

Годы	Май			Июнь			Июль		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1999	9,9			59,9	139,9	201,9	303,9	396,9	520,1
2000	73,8			144,8	192,8	246,8	339,8	452,8	589,2
2001	9	10		32	94	157	223	316	455,7
2002	33			60	96	170	257	371	473,3
2003	20	73	129,1	153,1	221,1	280,1	367,1	445,1	507,8

Примечание. Обозначения как в табл. 1.

северо-западный, северный и восточный районы. Согласно данным В.Ф. Кондратенко [6], промерзание почвы неблагоприятно сказывается на выживании *H. marginatum*. По всей территории Ставропольского края почва промерзает на глубине не более 40 см, причем вероятность зим с температурой

	Август			Сентябрь			Окт.
	1	2	3	1	2	3	1
	553,6	647,6	704,8	734,8	735,8	750,8	784,8
	526,5	610,5	672,1	710,1	724,1		
	493,9	587,9	657,0	686,0	723,0	724,0	
	457,1	511,1	545,2	584,2	596,2	640,2	
	470,1	534,1	623,2	642,2			

	Август			Сентябрь			Окт.
	1	2	3	1	2	3	1
	621,1	731,1	805,9	843,9	859,9	863,9	864,9
	698,2	792,2	868,1	916,1	939,1		
	561,7	662,7	737,5	771,5	812,5	824,5	
	565,3	629,3	677,7	729,7	759,7	808,7	
	600,8	638,8	787,2	837,2	843,2	844,2	856,2

почвы на глубине 20 см ниже –5 °С составляет не более 40%, а на глубине 40 см – не более 5 % [9]. Поэтому оказывается, что в условиях Ставропольского края большая часть зим благоприятна для выживания *H. marginatum*.

Выводы

На территории Ставрополя складывается благоприятная обстановка для обитания *H. marginatum*. Вместе с тем, в каждой ландшафтной провинции термические условия весьма неоднородны, что сказывается на выживаемости и сроках развития этого вида.

В лесостепных и предгорных ландшафтах Ставропольского края индекс обилия *H. marginatum* на скоте в среднем ниже, чем в это же время в полупустынных и степных ландшафтах. Повсеместно для *H. marginatum* в достаточном числе имеются подходящие хозяева. Наибольшая численность прокормителей имаго приходится на провинцию полупустынных ландшафтов.

Сопоставление годового цикла развития этого вида с метеорологическими данными районов, в которых отмечены наибольшие индексы обилия клещей показало, что окончание развития одного поколения *H. marginatum* наступает позже в степных ландшафтах, чем в полупустынных. Климатические условия весеннего и зимнего периодов не являются критическими для клещей *H. marginatum*. Наиболее благоприятны для клещей северо-западный, северный и восточные районы Ставропольского края.

Библиографический список

1. Атлас земель Ставропольского края. М.: издательство «ДИ ЭМ БИ» 2000. 118 с.
2. Беклемишев В.Н. Термины и понятия, необходимые при количественном изучении популяций эктопаразитов и нидиколов // Зоологический журнал. 1961. Т. 40, вып. 2. С. 149–158.
3. Добровольский Б.В. Фенология насекомых. М.: Высшая школа, 1969. 180 с.
4. Емельянова (Заикина) И.Н. 2006. Иксодовые клещи рода *Hyalomma* Koch, 1844 (Acari: Ixodidae) Центрального Предкавказья и сопредельных территорий (распространение, экология, роль в природном очаге Крымской геморрагической лихорадки): автореф. дис. ... канд. биол. наук. Ставрополь, 2006. 19 с.
5. Каторгин И.Ю. Распаханость территории Ставропольского края // Природные ресурсы и экологическое образование на Северном Кавказе. Ставрополь, 2002. С. 27–31.
6. Кондратенко В.Ф. Факторы определяющие численность клещей *Hyalomma plumbeum* Panz, и влияние последней на уровень заболеваемости Крымской геморрагической лихорадкой // Медицинская паразитология и паразитарные болезни. 1978. Т. 47. №1. С. 15–19.
7. Котти Б.К., Шапошникова Л.И., Евченко Ю.М., Левченко Б.И., Сурхаев Д.Б., Коржов П.Н., Тохов Ю.М. К изучению *Hyalomma marginatum* Koch в Ставропольском крае // Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии. 2001, №6. С. 105–108.

8. Резник П.А. Особенности ареалов и пути формирования фауны иксодовых клещей Советского Союза // Фауна Ставрополья. Ставрополь, 1970. С. 3–187.
9. Русеева З.М. Агроклиматические ресурсы Ставропольского края. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 238 с.
10. Тертышников М.Ф., Лиховид А.А., Горовая В.И., Харченко Л.Н. Позвоночные животные Ставрополья (история формирования и современное состояние фауны и населения). Ставрополь, 2002. 224 с.
11. Трофимова Л.С., Трофимов И.А., Яковлева Е.П. Агроландшафтно-экологическое районирование кормовых угодий Северного Кавказа // Степной бюллетень. 2013. №37. С. 21–24.
12. Хохлов А. Н. Животный мир Ставрополья. Ставрополь: Ставропольсервисшкола, 2000. 200 с.
13. Шальнев В.А. Водопьянова Д.С., Современные ландшафты Ставропольского края. Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2014. 185 с.
14. Щур Л.Е. Экспериментальное исследование гигротермических и трофических зависимостей некоторых видов иксодовых клещей: автореф. дис. ... канд. наук. Киев, 1968. 25 с.

References

1. Atlas zemel' Stavropol'skogo kraja (Atlas of the lands of the Stavropol Territory). M., izd-vo OOO «DI JeM BI» 2000. 118 s.
2. Beklemishev V.N. Terminy i ponjatija, neobhodimye pri kolichestvennom izuchenii populjacij jektoparazitov i nidikolov (Terms and concepts necessary for the quantitative study of populations of ectoparasites and nidicols) // Zoologicheskij zhurnal. 1961. T. 40, vyp. 2. S. 149-158.
3. Dobrovol'skij B.V. Fenologija nasekomyh (Phenology of insects). M.: Vysshaja shkola, 1969. 180 s.
4. Emel'janova (Zaikina) I.N. 2006. Iksodovye kleshhi roda Hyalomma Koch, 1844 (Acari: Ixodidae) Central'nogo Predkavkaz'ja i sopredel'nyh territorij (ras-prostranenie, jekologija, rol' v prirodnom ochage Krymskoj gemorragicheskoj lihoradki) (Ixodes ticks of the genus Hyalomma Koch, 1844 (Acari: Ixodidae) of the Central Caucasasia and adjacent territories (distribution, ecology, role in the natural foci of the Crimean hemorrhagic fever)): Avtoref. dis. ... kand. biol. nauk. Stavropol', 2006. 19 s.
5. Katorgin I. Ju. Raspahanost' territorii Stavropol'skogo kraja // Prirodnye resursy i jekologicheskoe obrazovanie na Severnom Kavkaze (The plowing of the territory of the Stavropol Territory // Natural Resources and Environmental Education in the North Caucasus). Stavropol', 2002. S. 27-31.
6. Kondratenko V.F. Faktory opredel'ajushhie chislennost' kleshhej Hyalomma plumbeum Panz, i vlijanie poslednej na uroven' zaboлеваемости Krymskoj gemorragicheskoj lihoradki (Factors determining the number of Hyalomma plumbeum Panz ticks, and the effect of the latter on the incidence rate of the Crimean haemorrhagic

- fever) // Medicinskaja parazitologija i parazitarnye bolezni. 1978. T. 47, №1. S. 15–19.
7. Kotti B.K., Shaposhnikova L.I., Evchenko Ju.M., Levchenko B.I., Surhaev D.B., Korzhov P.N., Tohov Ju.M. K izucheniju *Nualomma marginatum* Koch v Stavropol'skom krae (To the study of *Hyalomma marginatum* Koch in the Stavropol Territory) // Zhurnal mikrobiologii, jepidemiologii i immuno-biologii. 2001, №6. S. 105-108.
 8. Reznik P.A. Osobennosti arealov i puti formirovanija fauny iksodovyh kleshhej Sovetskogo Sojuza (Species features and ways of forming fauna of Ixodes ticks of the Soviet Union) // Fauna Stavropol'ja. – Stavropol', 1970. S. 3–187.
 9. Ruseeva Z.M. Agroklimaticheskie resursy Stavropol'skogo kraja (Agroclimatic resources of the Stavropol Territory). L.: Gidrometeoizdat, 1971. 238 s.
 10. Tertyshnikov M.F., Lihovid A.A., Gorovaja V.I., Harchenko L.N. Pozvonochnye zhivotnye Stavropol'ja (istorija formirovanija i sovremennoe sostojanie fauny i naselenija) (Vertebrate animals of the Stavropol Region (history of formation and current state of fauna and population)). Stavropol', 2002. 224 s.
 11. Trofimova L.S., Trofimov I.A., Jakovleva E.P. Agrolandshaftno-jekologicheskoe rajonirovanie kormovyh ugodij Severnogo Kavkaza (Agroland-scape-ecological zoning of fodder lands of the North Caucasus) // Stepoj bjulleten'. 2013, 37. S. 21–24.
 12. Hohlov A. N. Zhivotnyj mir Stavropol'ja. Stavropol' (Animal World of the Stavropol Territory): Stavropol' serviss hkola, 2000. 200 s.
 13. Shal'nev V.A. Vodop'janova D.S., Sovremennye landshafty Stavropol'skogo kraja (Modern landscapes of the Stavropol Territory). Stavropol': Izd-vo SKFU, 2014. 185 s.
 14. Shhur L.E. Jeksperimental'noe issledovanie gigrotermicheskikh i troficheskikh zavisimostej nekotoryh vidov iksodovyh kleshhej (Experimental study of hygrothermal and trophic dependencies of some species of ixodid ticks). Avtoref. diss. kand. Kiev, 1968. 25 s.

УДК 622.2

**Машков В.А. [Mashkov V.A.],
Верисокин А.Е. [Verisokin A.E.],
Димитриади Ю.К. [Dimitriadi U.K.],
Лукьянов В.Т. [Lukianov V.T.],
Гераськин В.Г. [Geras'kin V.G.]**

АНАЛИЗ ПРИМЕНЯЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЯКОРЯЩИХ УЗЛОВ И РАЗЛИЧНЫХ УПЛОТНИТЕЛЕЙ ПАКЕРОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА

**The analysis used designs anchoring unit
and designs of seals of packers used
in the hydraulic fracturing**

Цель применения пакеров определяется конкретными технологическими задачами. При этом конструкция пакера и принцип приведения его в действие должны обеспечивать защиту от преждевременного износа в процессе спуско-подъемных операций. Кроме того, конструкция пакера должна обеспечивать технологичность его использования и надежный контроль за работой в скважине во время проведения гидравлического разрыва пласта, независимо от глубины установки. Опыт применения пакеров при испытании пластов показал, что в большинстве случаев пакерующие элементы становятся неработоспособными из-за разрушения нижней части резинового элемента. В практике разобщения межтрубного пространства пакерами с различными способами посадки важным и необходимым является обеспечение надежной фиксации пакера на месте установки в стволе скважины. Это происходит за счет применения якорящих узлов и различных конструкций уплотнителей пакеров.

The purpose of the packers is determined by the specific technological tasks. The design of the packer and the principle of bringing it into action shall provide protection from premature wear during the tripping process. In addition, the design of the packer should ensure manufacturability of its use and reliable control over the work in the well during the hydraulic fracturing, regardless of the depth of the installation. Experience with the use of packers for the test beds showed that in most cases packerwise items become inoperative due to the destruction of the lower part of the rubber element. In practice, the isolation annulus packers with different ways of planting is important and necessary to ensure reliable fixing of the packer at the place of installation in the borehole. This happens due to the use of anchoring unit and different designs of seals of the packers.

Ключевые слова: пакер, якорящий узел, уплотнительный элемент, гидроразрыв пласта, износ, обсадная колонна, скважина, резиновый элемент, разобщение, посадка, фиксация, перекрытие, давление, плашки, напряжение, герметичность, деформация.

Key words: packer, anchoring unit, sealing element, hydraulic fracturing, wear, casing, borehole, rubber element, dividing, planting, fixing, overlap, pressure, dies, tension, tightness, deformation.

Введение

Пакеры применяют для разобщения пластов, изоляции обсадных колонн от воздействия скважинной среды в процессе эксплуатации нефтяных, газовых, газоконденсатных скважин, а также для проведения ремонтно-профилактических работ и ликвидации поглощений.

Пакеры используют для проведения технологических операций по гидроразрыву, кислотной и термической обработкам продуктивного пласта, для выполнения изоляционных работ, гидropескоструйной перфорации, установки проволочных фильтров и клапанов-отсекателей, очистки забоев скважин, газлифтной эксплуатации и т.д. Пакеры спускают в скважину на колонне НКТ. Проходное отверстие пакера должно позволять беспрепятственно спускать инструмент и оборудование для проведения необходимых операций освоения и эксплуатации скважин, для ликвидаций осложнений или выполнения необходимых технологических операций.

Пакер должен выдерживать максимально необходимый перепад давления, действующий на него в экстремальных условиях (рабочее давление). Проблема обеспечения надежности перекрытия межтрубного пространства пакером является актуальной в настоящее время, особенно в условиях проведения гидроразрыва пласта (ГРП) с применением высокого давления рабочей жидкости.

Материалы и методы исследования

В данной работе исследуются якорящие узлы и уплотнители пакеров. Герметичное разобщение пространства эксплуатационной или промежуточной обсадной колонны обеспечивается подбором диаметра пакера в соответствии с внутренним диаметром труб, создающим оптимальный зазор между пакером и стенкой колонны труб.

Для восприятия усилия от перепада давления, действующего на пакер в одном или двух направлениях, пакер должен иметь соответствующее закрывающее устройство (якорь).

Уплотняющие элементы расширяются и прижимаются к обсадной колонне при воздействии осевой нагрузки (веса НКТ или усилия от поршня гидросистемы).

Для уплотняющих элементов применяется синтетическая резина марок 4326, 4327, 3825 для пакеров с небольшой деформацией уплотняющего элемента (самоуплотняющиеся) и марок 4004, 3826-С для элементов с большой деформацией.

Все уплотняющие элементы имеют корд, для упрочнения резинового элемента, который изготавливается из хлопчатобумажной ткани, полимерной или металлической нити.

Структурная схема пакера включает следующие элементы: уплотняющие элементы, опору пакера, систему управления пакером, технологические устройства.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ конструкций якорящих узлов

Анализ применяемых конструкций якорящих узлов паке-

ров показал, что основным видом фиксации является конструкция в виде плашек, разжимаемых в радиальном направлении при введении во взаимодействие с ними разжимных конусов [1, 2, 3, 4].

Плашки на наружной стороне, обращенной к стенке труб обсадной колонны, имеют насечку, с помощью которой они сцепляются с металлом. Проблема взаимодействия плашек якорящего узла с трубой является актуальной и требует дополнительных исследований с учетом фактора износа обсадных труб и возможности их разрушения.

Анализ приведенной формулы [5] по определению силы q взаимодействия плашек труболочки с трубой показывает, что высота плашек оказывает существенное влияние на их несущую способность.

В формуле (1) максимальная несущая способность плашек труболочки зависит от живого сечения трубы, ее радиуса, высоты плашек и угла их взаимодействия:

$$\sigma_{KP2} = \frac{\sigma_T F_C Q h \varepsilon}{R^2 C K} \quad (1)$$

где: σ_T – предел текучести материала труб;
 F_C – площадь поперечного сечения изношенной трубы;
 Q – радиус трубы внутренний;
 h – высота плашек;
 ε – коэффициент охвата периметра трубы;
 R^2 – радиус трубы наружный;
 C – коэффициент, характеризующий концентрацию напряжений в опасном сечении;
 K – коэффициент охвата плашками поверхности трубы и угла наклона конической поверхности плашек к корпусу устройства;
 σ_{KP2} – определяется для взаимодействия плашек труболочки (в количестве 6-ти штук) и осуществления подвески потайной колонны.

Аналогичная задача решается для обеспечения фиксации пакера плашками при восприятии избыточного давления снизу, например, в случае проведения гидроразрыва пласта.

Анализируя формулу (1) можно сделать вывод, что при увеличении высоты плашек растет удерживающая способность пакера.

Если представить, что высота плашек стремится к нулю, то согласно этой формуле: G – усилие, воспринимаемое пакером и сообщаемое на плашки, которое стремится к бесконечности. При этом необходимо также учитывать формулу Берлоу:

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{pD}{2\delta} \quad (2)$$

где: p – давление жидкости;
 D – внутренний диаметр обсадной колонны;
 δ – толщина стенки обсадной трубы.

По данной формуле, при известном усилии, воспринимаемым пакером и сообщаемым на плашки, можно определить допустимые контактные напряжения на границе «уплотнитель» – стенка трубы обсадной колонны.

Из практики установки пакера в обсадную колонну известно, что контактные напряжения на границе должны превосходить рабочее давление на 10–15 %. Из формулы (2) можно определить предельное значение давления P :

$$P = \frac{\delta_{\text{пр}} 2\delta}{D}$$

При известных параметрах обсадной трубы и материала, из которого она изготовлена, определяется предельное значение P .

Исходные данные для определения P :

$\delta_{\text{пр}} = 5,0$ МПа для трубы из стали группы прочности D ;
 δ – толщина стенки, $\delta = 10$ мм;
 D – внутренний диаметр трубы, равный 148 мм.

Тогда предельное значение определяется:

$$P = \frac{5 \cdot 2 \cdot 0,01}{0,14} = 0,71 \text{ МПа (710 кг/см}^2\text{)}$$

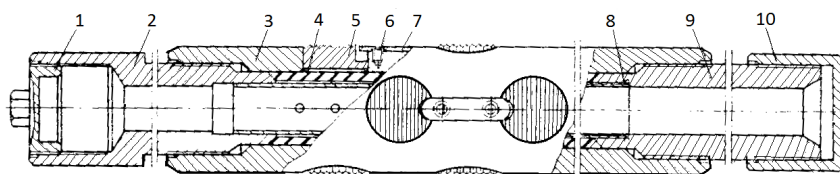
Анализ полученного результата показывает, что контактные напряжения на границе «уплотнитель – стенка трубы обсадной колонны» близки к предельным значениям, особенно это необходимо учитывать для перекрытия межтрубного пространства в старом фонде скважин с изношенной обсадной колонной.

Применение традиционного способа деформации уплотнителя в радиальном направлении за счет осевого нагружения требует приложения достаточно большого усилия. В этом случае необходимо изменить механизм посадки уплотнителя по принципу, отраженному в работе [6], где отмечается, что равномерное распределение напряжений по всей длине уплотнительного элемента можно получить, если использовать для его радиальной деформации разжимной конус.

Практика применения такого метода посадки пакера показывает, что использование разжимного конуса значительно уменьшает необходимую осевую нагрузку для деформации уплотнителя, что особенно важно для скважин старого фонда.

Контактные напряжения на границе уплотнителя с обсадной колонной определяются диаметром разжимного конуса для его деформации в данном поперечном сечении.

В работе [1] представлено несколько конструкций пакеров, оснащаемых дополнительно якорем поршенькового типа гидравлического действия в дополнение к плашкам якорящего узла (с разжимом за счет применения разжимного конуса). В работе [1] отдельно представлен якорь поршенькового типа – ЯГ1, где предусмотрена защита от попадания механических примесей в зазор сопрягаемых подвижных деталей плашки-корпус.



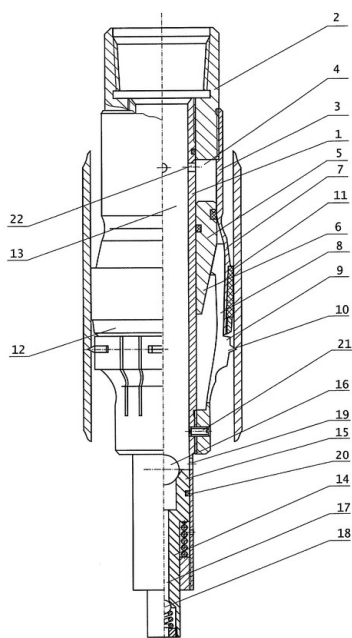
- 1 – пробка транспортировочная; 2 – головка; 3 – корпус;
4 – трубка резиновая; 5 – плашка; 6 – винт; 7 – шпонка; 8 – патрубок;
9 – хвостовик; 10 – гайка транспортировочная.

Рисунок 1. Якорь поршенькового типа – ЯГ1.

В связи с тем, что при гидравлическом разрыве пласта рабочая жидкость находится под большим давлением, воспринимаемым снизу пакером (с заклипанием выталкивающего усилия на плашки якоря), может наблюдаться потеря герметичности уплотнителя и сход пакера с места установки. Это приводит к прекращению процесса фиксации. Сохранение герметичности межтрубного пространства напрямую зависит от надежности работы якорящего узла. В работе [7] представлена новая конструкция якорящего узла для установки пакера. Фиксация происходит за счет оснащения разрывных плашек разрезными пружинными кольцами, которые внедряются в тело обсадной колонны на расчетную глубину. Для оценки возможности применения такого метода установки пакера рассмотрим конструкцию [7], представленную на рисунке 2.

Гидромеханический пакер состоит из ствола 1, жестко связанного верхним концом с переводником 2. На внешнем стволе 1 установлен корпус гидроцилиндра 3 с образованием между ними кольцевой камеры 4, в которой размещен поршень 5 с разжимным конусом 6. Корпус гидроцилиндра 3 жестко связан с металлической уплотнительной оболочкой 7. На нижнем конце ствола 1 установлена разрезная оболочка 8, входящая своим верхним концом внутрь металлической уплотнительной оболочки 7. В корпусе размещено уплотнительное кольцо 11 из упругого материала и закреплено резьбовой гайкой 12.

В канале 13 ствола 1 установлена ступенчатая пружинная втулка 14 с седлом 15 и шаровым клапаном 16. В осевом канале 17 ступенчатой подпружиненной втулки 14 установлен обратный клапан 18. В теле ствола 1 выполнены радиальные отверстия 19, изолированные телом ступенчатой подпружиненной втулки 14 и уплотнительным кольцом 20 от осевого канала 13 ствола 1.



Фиг. 3

Рисунок 2. Гидромеханический пакер.

Ступенчатая подпружиненная втулка 14 связана со стволом 1 срезным элементом 21. Кольцевая камера 4 над поршнем 6 постоянно гидравлически связана с осевым каналом 13 ствола 1 радиальными каналами 22.

Посадка устройства, спущенного на заданную глубину, осуществляется путем установки шарового клапана 18 на седло 15 и создают избыточное давление в лифтовой колонне труб, которое через радиальные отверстия 22 подается в кольцевую камеру 4 корпуса 3 гидроцилиндра и воздействует на поршень 5 с разжимным конусом 6 с их перемещением внутрь разрезной цанги 8. Цанга раздвигается в радиальном направлении с обеспечением деформации металлической уплотнительной оболочки 7 с кольцом 11 до плотного контакта с внутренней поверхностью обсадной колонны.

При дальнейшем перемещении вниз поршня 5 происходит сжатие уплотнительного кольца 11 и ввод зубцов якоря 10 во взаимодействие со стенкой обсадной колонны. Этим самым достигается перекрытие кольцевого зазора между лифтовой колонной труб и обсадной колонной.

После этого подготавливают подпакерную зону для проведения изоляционных работ.

В этой конструкции важно изучить узел якорения. Для оценки возможности осуществления такой технологии якорения дадим технологический расчет.

Технологический расчет якорения.

- диаметр внутренней обсадной колонны, мм 148;
- диаметр наружный пакера, мм 136;
- диаметр осевого канала ствола, мм 55;
- наружный диаметр ствола, мм 70;
- внутренний диаметр корпуса, мм 120;
- давление посадки пакера, МПа 25.

Определяем площадь поршня:

$$F_n = 0,785(d_{\text{вн.к}}^2 - d_{\text{нст}}^2); \quad (3)$$

$$0,785(12,0^2 - 1,0^2) = 74,5 \text{ см}^2.$$

Усилие, развиваемое поршнем, рассчитывается по формуле:

$$q_n = F_n \cdot P; \quad (4)$$

$$q_n = 74,5250 = 18625 \text{ кгс.}$$

При угле конуса $\alpha = 12^\circ$:

$$Q = q_n \cdot \tan \alpha; \quad (5)$$

$$Q = 18625 / 0,2126 = 87606 \text{ кгс.}$$

Принимаем суммарную поперечную длину зубьев равной 1/2 периметра, т.е. периметр пространства равен:

$$\Pi = 2\pi R = 2 \cdot 3,14 \cdot 6,8; \quad (6)$$

$$\Pi = 2 \cdot 3,14 \cdot 6,8 = 42 \text{ см};$$

Тогда принимаем длину зубьев, равной 21 см.

Определим усилие внедрения зубьев в стенку обсадной колонны при условии их полного взаимодействия. Принимаем глубину внедрения зубьев $\delta = 0,3$ мм. Угол наклона фаски зуба принимаем $\beta = 45^\circ$. При решении метода треугольника, где $\delta = 0,3$ мм является катетом, площадь контакта определяется по формуле:

$$L_{\text{сум}} = \Pi \cdot \frac{\delta}{\sin 45};$$

$$L_{\text{сум}} = 420 \cdot \frac{0,25}{0,7} = 150 \text{ мм} \quad (7)$$

Определим площадь пакера, воспринимающего давление разрыва снизу:

$$F_{\text{п}} = 0,785 \cdot d_{\text{вн}}^2; \quad (8)$$

$$F_{\text{п}} = 0,785 \cdot 13,6^2 = 145 \text{ см}^2;$$

С учетом веса труб лифтовой колонны $Q_{\text{тр}} = 20000$ кг получим:

$$Q_{\text{выт}} = F_{\text{п}} \cdot P - Q_{\text{тр}}$$

$$Q_{\text{выт}} = \frac{145 \cdot 200}{56000} - 20000 = 36000 \text{ кг}; \quad (9)$$

Проверим выполнение условия:

$$\sigma_{\text{т}} = \frac{Q_{\text{выт}}}{F_{\text{сум}}} \leq [\sigma_{\text{г}}];$$

$$\sigma_{\text{т}} = \frac{36000}{15} = 2235 \text{ кгс} \leq [\sigma_{\text{г}}]; \quad (10)$$

Вывод: пакер в состоянии выдержать и большой перепад давления, поскольку $[\sigma_t] = 6000 \text{ кг/см}^2$.

Передача выталкивающей силы на зубья приводит к тому, что они работают на срез. Считаем, что площадь поперечного сечения зуба равна:

$$S = 2h ; (11)$$

где $\alpha = 45^\circ$;
 $h = 0,3 \text{ мм}$;
 $S = 0,6 \text{ мм}$.

Суммарная длина зубьев – $L_{\text{сум}} = 150 \text{ мм}$;

Площадь сечения зубьев, воспринимающих $Q_{\text{выт}}$:

$$S_n = S \cdot L_{\text{сум}} = 0,06 \cdot 15 = 1 \text{ см}^2.$$

При воздействии выталкивающей силы ($Q_{\text{выт}} = 36\,000 \text{ кг}$) пакер снимается с места установки. Необходимо обеспечить дополнительное количество зубьев с увеличением глубины их внедрения. Для якорей плашечного типа необходимо иметь внедрение зубьев на заданную глубину с обеспечением наружного контакта всей площадью плашек. Такое конструктивное оформление реализовано в [8], где плашки якоря имеют два выступа, распределенных по высоте, что увеличивает силу сцепления якоря с обсадной колонной.

Оценка эффективности применения пакеров с различными конструкциями уплотнителей

Обычная схема деформации уплотнителя путем воздействия осевой силы имеет ряд существенных недостатков. В момент осевого сжатия уплотнителя происходит его перемещение при неподвижном нижнем торце. При вступлении в контакт с обсадной колонной пакера появляется и нарастает сила трения, направленная против смещения точек поверхности уплотнителя по поверхности обсадной колонны, что препятствует передачи осевой нагрузки от силы, действующей сверху, к нижнему торцу уплотнителя. Это приводит к неравномерному распределению контактных напряжений с их уменьшением к нижнему торцу уплотнителя. Контактные напряжения в нижней части по своему значению меньше, чем давление уплотняемой среды, а в верхней части эти напряжения имеют завышенное значение, превосходящее прочностные характеристики материала уплотнителя.

При такой посадке-деформации уплотнителя необходимо учитывать силу трения. Избежать негативных факторов, влияющих на надежность ра-

боты уплотнителя, можно, обеспечив изменение силового воздействия на уплотнитель с заменой действия силы в радиальном направлении.

В работе [9] подробно рассмотрен механизм деформации уплотнителя за счет ввода в его осевой канал разжимного конуса, определенной конфигурации и диаметрального размера. Для пакеров с таким механизмом деформации уплотнителя требование соотношения «длина – толщина» не предъявляют. Это позволяет делать уплотнитель более тонким, что, в свою очередь, позволяет получить увеличение внутреннего диаметра ствола пакера. Данное условие немаловажно для снижения гидравлических сопротивлений потоку рабочей жидкости, например, при проведении гидроразрыва пласта.

Известно достаточно большое количество технических решений по конструкциям уплотнителей пакеров, например [10]. В устройстве делается попытка повышения коэффициента однородности нагружения уплотнительного элемента за счет концентричной установки пакера внутри осевого канала обсадной колонны. Сам уплотнитель имеет цилиндрическую форму с размещением на его торцах экструзионных шайб. Посадка пакера производится с применением специального гидравлического посадочного инструмента. Деформация уплотнителя в радиальном направлении происходит путем воздействия сверху осевой нагрузки.

Существует уплотнительный элемент пакера [11], в котором пакерующий элемент выполнен составным, а для его защиты применяются перегородки между уплотнительными кольцами, которые выполнены фигурными и с радиальными каналами.

Замкнутое пространство между перегородками и металлической оболочкой заполнено герметизирующим составом. Каждое из тороидальных колец заключено в разрезную, по периметру замкнутую (с наружной стороны) и с зазором (с внутренней стороны) металлическую оболочку.

Посадка пакера ведется созданием осевой нагрузки, превышающей по своему значению предел текучести материала оболочки, с передачей осевого усилия на вес детали уплотнительного элемента. Металлическая оболочка деформируется со сжатием уплотнительного кольца и равномерным распределением напряжений.

В результате такого распределения усилия металлическая оболочка плотно прижимается к стенке трубы обсадной колонны с повторением ее геометрической формы. Также происходит выдавливание герметизирующего состава через радиальные колонны в межтрубное пространство. Уплотнительный элемент предназначен для разбуриваемых пакеров. Перепад давления, воспринимаемый уплотнительным элементом, имеет невысокие значения.

Аналогично по конструкции оформлено техническое решение, отраженное в [12]. Данный узел уплотнения скважинного устройства предназначен для перекрытия межтрубного пространства при проведении изоляционных работ или гидроразрыва пласта. Повышение надежности уплотнителя

обеспечивается путем нормирования нагрузки на каждом из них. Уплотнения в виде колец установлены между шайбами, образующими камеры в виде трапеций.

Сами шайбы выполнены и установлены с возможностью предохранения от перегрузок уплотнительных колец. Сжатие пакета уплотнительных колец и шайб осуществляется путем осевого нагружения грундбуксой, воспринимающей перепад давления рабочей среды.

Технологический зазор между шайбами и внутренней стенкой обсадной колонны находится в пределах мм. Уплотнительные кольца при сжатии шайб деформируются в радиальном направлении с перекрытием этого зазора. При восприятии перепада давления со стороны рабочей среды неизбежно произойдет выдавливание всего пакета уплотнительных колец (начиная с нижнего кольца), с нарушением их целостности.

Проблему затекания резинового уплотнителя в технологический зазор предложено решить за счет введения в элемент пакера пружинящего элемента в виде спирали. Пружина привулканизирована к резиновому массиву по всей поверхности проволоки в месте перехода цилиндрической части в коническую, со стороны приложения нагрузки. Разработка защищена патентом Российской Федерации [13].

Анализ конструкций уплотнительных элементов, представленный в материалах патента, показывает, что для обеспечения радиальной деформации уплотнителя необходимо приложить достаточно большое осевое усилие – 120–140 кН. При этом резиновая масса может затекать в кольцевой зазор между корпусом пакера и стенкой трубы обсадной колонны.

К недостаткам всех известных уплотнителей можно отнести следующее: последние выкрашиваются на торцах даже при наличии экструзионных шайб. При возврате пакера в транспортное положение иногда наблюдается разрушение резинового материала на торцах. Повысить надежность работы уплотнителя можно за счет предотвращения затекания резины в уплотняемый зазор, что исключит ее разрушение по торцевой поверхности при распакеровке.

Анализ представленных материалов патента показывает, что деформация уплотнительного элемента происходит по старой традиционной схеме – осевым нагружением от веса труб.

Повысить эффективность работы уплотнительного элемента пакера по [13] можно за счет применения другого метода деформации, отраженного в [9]. Поскольку жесткость уплотнительного элемента пакера в месте установки спиральной пружины выше, чем в другом поперечном сечении, то целесообразно размещать уплотнитель таким образом, чтобы разжимной конус входил во взаимодействие с ним в месте размещения спиральной пружины.

В этом случае распределение контактных напряжений по длине уплотнительного элемента будет более равномерным. В направлении обеспечения

надежности работы уплотнительного элемента предложена конструкция, в которой торцевые конические поверхности выполнены разновеликими [14].

Верхняя торцовая поверхность выполнена в виде внутренней конической расточки, имеющим посадочный пас, а нижняя – в виде наружной конической поверхности с углом конусности, который меньше, чем у верхней конической расточки. Разжим происходит путем ввода верхнего подвижного упора, выполненного коническим, во внутреннюю расточку с деформацией в радиальном направлении до контакта со стенкой обсадной колонны. Одновременно при большом угле конусности происходит нагружение уплотнителя осевой составляющей, т.е. имеет место комбинированный метод посадки. При этом сохраняется условие неравномерного поджима уплотнителя по его высоте.

Выводы

1. Анализ применяемых конструкций якорящих узлов пакеров показал, что основным видом фиксации является конструкция в виде плашек, разжимаемых в радиальном направлении при введении во взаимодействие с ними разжимных конусов.
2. Обычная схема деформации уплотнителя путем воздействия осевой силы имеет ряд существенных недостатков. Избежать негативных факторов, влияющих на надежность работы уплотнителя, можно, обеспечив изменение силового воздействия на уплотнитель с заменой действия силы в радиальном направлении.

Список используемой литературы

1. Справочное пособие по газлифтному способу эксплуатации скважин / Ю.В. Зайцев, Р.А. Максотов, О.В. Чурбанов и др. М.: Недра, 1984. С. 76–85.
2. Гвоздев Б.П. Эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений: Справочное пособие / Б.П. Гвоздев, А.И. Гриценко, А.Е. Корнилов. М.: Недра, 1988. С. 315–324.
3. Басарыгин Ю.М. Ремонт газовых скважин / Ю.М. Басарыгин, П.П. Макаренко, В.Д. Мавромати. М.: Недра, 1998. С. 143–151.
4. Абубакиров В.Ф. Буровое оборудование: Справочник в 2-х т. Буровой инструмент / В.Ф. Абубакиров, Ю.Г. Буримов, А.Н. Гноевых и др. М.: Недра, 2003. С. 434–475.
5. Шляховой С.Д. Аналитические и экспериментальные исследования несущей способности изношенных обсадных труб / С.Д. Шляховой, С.Б. Бекетов / Сборник научных трудов. Строительство газовых и газоконденсатных скважин» / ПАО «Газпром»/ Москва, 1997. С. 15–86.

6. Машков В.А. Повышение надежности работы пакеров за счет изменения конструкции уплотнительного элемента / В.А. Машков, Ю.А. Пуля, С.А. Литвинов, С.А. Паросоченко / Вестник СевКавГТУ, Серия: «Нефть и газ». № 1 (4). Ставрополь: СевКавГТУ. 2004. С. 40–48.
7. Пат. РФ №2.304.694. Разбуриваемый пакер. М кл. E21B33/12/ В.А. Машков, О.А. Пивень. № 2005126271/03. Заявл. 18.08.2005. Оpubл. 27.02.2007.
8. Пат. РФ № 2473781. Пакер технологический, Мкл. E21B33/12/ Бекетов С.Б., Акопов С.А., Машков В.А. Заявл. 12.10.2011, Оpubл. 27.01.2013.
9. А. с. СССР № 1832148, Разбуриваемый пакер, Мел E21B33/12/ А.А. Попов, А.А. Домальчук, В.Д. Флыс и др. 214785850/03 – Заявл. 23.01.90., Оpubл 07.08.93. Бюл. № 29.
10. Пат. РФ № 2173165, Уплотнительный элемент пакера / Н.М. Саркисов, С.В. Шишов / № 99124315/03, Заявл. 16.11.1999, Оpubл. 20.09.2001., Бюл. № 26.
11. Пат. РФ № 2105130, «Узел уплотнения скважинного устройства», Мкл. E21B33/12/ А.С. Зверев, В.В. Крупин / № 94028547/03. Заявл. 28.07.94 Оpubл. 20.02.98. Бюл. № 5.
12. Пат. РФ № 2.473780, Уплотнительный элемент пакера, КЛ. МКИ E21B 33/12. / Н.А. Шапкин, М.М. Нагуманов, И.В. Цыбеев и др. / Заявл. 07.10.2011, Оpubл. 27.01.2013).
13. А.с. СССР №1.701.891, Кл. E21B33/12 Пакер / А.А. Городнов / №4.610.104/03. Заявл. 06.12.88. Оpubл. 30.12.91. Бюл. № 48.
14. Восстановление добычных возможностей горизонтальных участков скважины путем удаления пропантовых пробок / А.Е. Верисокин, В.А. Машков, Л.М. Зиновьева // Наука. Инновации. Технологии, Вып. № 4. 2015, Ставрополь С. 81–90.

References

1. Spravochnoe posobie po gazliftnomu sposobu jekspluatacii skvazhin (The handbook on a gas-lift way of operation of wells) / Ju.V. Zajcev, R.A. Maksutov, O.V. Churbanov i dr. M.: Nedra, 1984. S. 76–85.
2. Gvozdev B.P. Jekspluatacija gazovyh i gazokondensatnyh mestorozhdenij: Spravochnoe posobie (Operation of gas and gas-condensate fields: The handbook) / B.P. Gvozdev, A.I. Gricenko, A.E. Kornilov. M.: Nedra, 1988. S. 315–324.
3. Basarygin Ju.M. Remont gazovyh skvazhin (Repair of gas wells) / Ju.M. Basarygin, P.P. Makarenko, V.D. Mavromati / Izdatel'stvo «Nedra», 1998. S. 143–51.
4. Abubakirov V.F. Burovoe oborudovanie: Spravochnik v 2-h tomah – Burovoj instrument (Drilling equipment: The reference book in 2 volumes – the Boring tool) / V.F. Abubakirov, Ju.G. Burimov, A.N. Gnoevykh i dr. M: OAO Izdatel'stvo «Nedra». 2003. S. 434–475.
5. Shljahovoj S.D. Analiticheskie i jeksperimental'nye issledovaniya nesushhej sposobnosti iznoshennykh obsadnykh trub (Analytical and

- pilot studies of the bearing ability of worn-out casing pipes) / S.D. Shljahovoj, S.B. Beketov / Sbornik nauchnyh trudov. Stroitel'stvo gazovyh i gazokondensatnyh skvazhin / PAO «Gazprom». Moskva, 1997. S. 15–86.
6. Mashkov V.A. Povyshenie nadezhnosti raboty pakerov za schet izmenenija konstrukcii uplotnitel'nogo jelementa (Increase in reliability of work of packers due to change of a design of a sealing element) / V.A. Mashkov, Ju.A. Pulja, S.A. Litvinov, S.A. Parosochenko // Vestnik SevKavGTU, Serija: «Nef't' i gaz». № 1 (4). Stavropol': SevKavGTU. 2004. S. 40–48.
 7. Pat. RF №2.304.694. Razburivaemyj paker (The package is parsed). M kl. E21V33/12/ Mashkov V.A., Piven' O.A. № 2005126271/03. Zajavl. 18.08.2005. Opubl. 27.02.2007.
 8. Pat. RF № 2473781. Paker tehnologicheskij (The packer is technological), Mkl. E21V33/12/ Beketov S.B., Akopov S.A., Mashkov V.A. Zajavl. 12.10.2011, Opubl. 27.01.2013.
 9. Mashkov V.A. Povyshenie nadezhnosti raboty pakerov za schet izmenenija konstrukcii uplotnitel'nogo jelementa (Increase in reliability of work of packers due to change of a design of a sealing element) / V.A. Mashkov, Ju.A. Pulja, S.A. Litvinov, S.A. Parosochenko / Vestnik SevKavGTU, Serija: «Nef't' i gaz». № 1(4). Stavropol': SevKavGTU. 2004. S. 40–48.
 10. A. s. SSSR № 1832148, Razburivaemyj paker (The package is parsed), Mel E21V33/12 A.A. Popov, A.A. Domal'chuk, V.D. Flys i dr. 214785850/03 – Zajavl. 23.01.90., Opubl 07.08.93. Bjul. № 29.
 11. Pat. RF № 2173165, Uplotnitel'nyj jelement pakera (Sealing element of a packer) / N.M. Sarkisov, S.V. Shishov / № 99124315/03, Zajavl. 16.11.1999, Opubl. 20.09.2001., Bjul. № 26.
 12. Pat. RF № 2105130, «Uzel uplotnenija skvazhinnogo ustrojstva» («Knot of consolidation of the borehole device»). Mkl. E21V33/12/ A.S. Zverev, V.V. Krupin / № 94028547/03. Zajavl. 28.07.94 Opubl. 20.02.98. Bjul. № 5.
 13. Pat. RF № 2.473780, Uplotnitel'nyj jelement pakera (Sealing element of a packer), KL. MKI E21V 33/12 / N.A. Shapkin, M.M. Nagumanov, I.V. Cybeev i dr. / Zajavl. 07.10.2011, Opubl. 27.01.2013)
 14. A.s. SSSR №1.701.891, Kl. E21V33/12 Paker (Packer) /A.A. Gorodnov/№4.610.104/03. Zajavl. 06.12.88. Opubl. 30.12.91. Bjul. №48.
 15. Vosstanovlenie dobyvnyh vozmozhnostej gorizontalnyh uchastkov skvazhiny putem udalenija proppantovyh probok (Restoration the dobyvnykh of opportunities of horizontal sites of the well by removal the proppantovykh of traffic jams). Verisokin A.E., Mashkov V. A., Zinov'eva L. M./Nauka. Innovacii. Tehnologii, Vypusk № 4, 2015 g., Stavropol' Str. 81–90.

УДК 911.2

Шальнев В.А. [Shalnev V.A.],
Ляшенко Е.А. [Lyashenko E.A.],
Мельничук В.В. [Melnychuk V.V.],
Токарев А.А. [Tokarev A.A.]

ГЕОХИМИЧЕСКИЙ ПОДХОД В ИЗУЧЕНИИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СВЯЗЕЙ И ТРАНСФОРМАЦИИ ЛАНДШАФТОВ (НА ПРИМЕРЕ ЗАПАДНОГО КАВКАЗА)

**Geochemical approach to the study of spatial
relations and transformation of landscapes
(the example of Western Caucasus)**

Рассматриваются межсистемные и внутрисистемные связи фаций горных ландшафтов речных долин верховий Кубани Западного Кавказа с использованием геохимических методов исследования. Изучение межсистемных латеральных связей фациальных катенных рядов во всех геоботанических высотных поясах ландшафтов позволили проследить распределение химических элементов тяжелых металлов в почвенном и растительном компонентах фаций, а также организмах беспозвоночных. Коэффициенты множественной корреляции отражают состояние внутрисистемных межкомпонентных связей фаций, их специфику (тесноту) и устойчивость. Величины коэффициентов в большинстве фаций (кроме пихтовых лесов) свидетельствуют о преобладании неустойчивых и слабоустойчивых связей, их большую зависимость от внешних факторов и предрасположенность к процессам трансформации. Полученные коэффициенты напряженности биозкосистемных связей позволили провести типологию геохимических сред для различных фаций среднегорных и высокогорных ландшафтов.

This article presents interconnection intraconnection facies of mountain landscapes of river valleys of the upper reaches of the Kuban Western Caucasus using geochemical methods. The study of the interconnection of the lateral relationships of chain of interrelated varieties of landscape series of facies in all geobotanical high-altitude zones allowed us to trace the distribution of chemical elements heavy metals in soil and vegetation components, facies and organisms invertebrates. The indices of multiple correlation reflect the state of the intrasystem interconnects links of the facies, their specificity and sustainability. The index values in most of the facies (except fir forests) testify to the predominance of unstable and weakly stable relations, they are more dependent on external factors and a predisposition to processes of transformation. The indices of tension bioecosystem ties allowed the typology of geochemical environments for the different facies of medium and high mountains landscapes.

Ключевые слова: ритмика, трансформация, геохимический подход, латеральные связи, межкомпонентные корреляционные и биозкосистемные связи.

Key words: rhythm, transformation, geochemical approach, lateral connection, cross-media correlation and bioecosystem connection.

Введение

В последнее время активно обсуждается проблема трансформации ландшафтов как актуального направления в теории и методологии ландшафтоведения [1]. Однако, данное направление не является новым. Еще С.В. Калесник вел понятие «ритмика», определяющее закономерности

функционирования ландшафтов [2]. Далее Б.Б. Сочава обосновал понятие динамики ландшафтов [3], а А.А. Крауклис дополнил эту закономерность серийными рядами состояний фаций [4]. В результате в теории ландшафтоведения определилась группа понятий, отражающих различные типы изменений в функционировании природного ландшафта: ритмика – динамика – эволюция [5].

В период динамических изменений закладываются связи будущих трансформаций ландшафта. Это тесно связано с его устойчивостью. В процессе динамической смены состояний ландшафт может оставаться «самим собой» до тех пор, пока его устойчивость не будет нарушена внешними или внутренними причинами [6]. В этом ключе, понятие «трансформация» может пониматься в качестве последовательной смены межсистемных и внутрисистемных связей ландшафта (ритмика → динамика → эволюция), которые влияют на особенности его функционирования и состояния структуры, как под влиянием природных, так и антропогенных факторов. В этой связи структура ландшафтов дополняется новыми отношениями, процессами и межкомпонентными связями. В разнообразии типов современных ландшафтов, как следствие, выстраивается определенный последовательный ряд, отражающий разную степень трансформации природных ландшафтов и их структуры: природный ландшафт истории человека → культурно-природный (частично изменений) → природно-культурный (агроландшафт) → этнокультурный → техногенный [7].

В исследованиях большинства ученых термин «трансформация» ландшафта выступает в качестве определения непосредственно антропогенных изменений. Анализ опыта публикаций о Кавказе показывает, что на протяжении долгих лет ученые исследовали трансформацию различных компонентов ландшафтов, пытаясь выявить их устойчивость к антропогенным воздействиям: почв [8, 9, 10], животного населения [11, 12, 13, 14, 15], а также биоты в целом [16]. Ряд исследователей обращались к выявлению наиболее оптимальных методик диагностики степени антропогенной трансформации ландшафтов Северного Кавказа [7, 8 и др.]. Однако в подобных работах слабо прослеживается анализ межкомпонентных связей как важной составной части структуры ландшафта.

В результате вмешательства человека происходят различного рода трансформации ландшафтов и ослаблению их устойчивости, инварианта. Усиливается данный эффект еще и тем, что ландшафт является сложным природным образованием множества компонентов и ТПК морфологических единиц разной размерности, объединенных в единое целое вещественно-энергетическими связями. В качестве системообразующих связей в ландшафте выступают корреляционные связи и зависимости, при которых взаимодействующие компоненты взаимно влияют друг на друга [17]. Применение геохимического подхода в исследовании трансформации ландшафтов может поз-

волить изучать изменения в функционировании природных комплексов, выявлять их современное состояние, устойчивость к внешним воздействиям и напряженность биоэкосистемных связей, а также прогнозировать возможные стадии трансформации структуры изучаемых геосистем [18].

Несмотря на большой интерес исследователей к геохимическим особенностям горных ландшафтов Кавказа, отмечается явное преобладание почвенно-геохимических исследований, изучения загрязнения окружающей среды регионов, а также почвенно-геохимического районирования. Поэтому комплексный подход в изучении структуры ландшафтов, позволит лучше понять особенности корреляционных зависимостей и типов связей геосистемных образований ранга фации.

Объекты и методы исследований

Изучение взаимосвязей компонентов горных ландшафтов осуществлялось на территории Карачаево-Черкесской республики. Основные ключевые участки были расположены в пределах Бокового хребта, в верховьях реки Кубани, в долинах рек Гондарай и Джалпаккол (Аксско-Джалпаккольский высокогорный и Гондарайский среднегорный ландшафты) и в долине реки Софии (Софийские высокогорный и среднегорный ландшафты) [18]. Были обследованы доминантные высотные пояса хвойных лесов, субальпийских и альпийских лугов, а также переходные высотные пояса экотона верхней границы леса и днища долин. В качестве информативных показателей выбраны концентрации свинца, кадмия, цинка и меди в почвах, растительности и беспозвоночных травяного покрова. За почвообразующую породу приняты гранитоиды и продукты их выветривания.

Образцы почв отбирались с экспериментальных площадок, имеющих размер 10×10 м из 5 точечных проб, расположенных «конвертом». Для анализа травянистой растительности производился отбор смешанного образца с экспериментальной площадки путем взятия укоса в 10-кратной повторности [19]. Контрольной группой беспозвоночных были выбраны растительноядные представители хортобионтов. Данный выбор обусловлен тем, что представители этих отрядов приурочены к тому или иному месту обитания, не мигрируют на большие расстояния и ведут более или менее оседлый образ жизни в ранге фаций и урочищ, а тип их питания позволяет проследить миграцию элементов по геохимической цепи.

Использовались также модели фациальных геосистем, позволившие изучать парные связи компонентов (коэффициенты радиальной дифференциации, биологического поглощения и дискриминации), многофакторной корреляции и устойчивости связей компонентов (Rmf), а также напряженность биоэкосистемных связей (Кнапр).

Результаты и обсуждение

Пространственные отношения в ландшафтах Западного Кавказа рассматривались, как на примере внутрисистемных межкомпонентных корреляционных зависимостей и биоэкосистемных связей, так и межсистемных латеральных связей (катенных рядов) в пределах высотных геоботанических поясов с диапазоном высот профиля рельефа 1700–2800 м над уровнем моря.

В альпийском и субальпийском поясах растительность представлена злаково-разнотравными лугами. Почвы грубоскелетные горно-луговые. Здесь постоянно в летний сезон осуществлялся выпас скота.

В переходном поясе экотона верхней границы леса (ВГЛ) растительность представлена березовыми криволесьями и субальпийскими лугами с обилием антропофитов.

Геоботанический пояс хвойных лесов получил распространение на склонах троговых долин Софии. В условиях современного тепловлагооборота на склонах западной экспозиции произрастают сосново-пихтовые леса, а на склонах восточной – пихтовые. В долине Гондарая пихтовые леса занимают небольшие площади и в настоящее время замещаются елью. Почвенный покров представлен грубоскелетными горно-лесными бурыми почвами.

Геоботанические пояса долинного экотона днища рек Софии и Гондарая являются экотонам антропогенного происхождения. Ранее здесь произрастали сосновые леса, которые были вырублены. В прирусловой части есть рощи из березы и ольхи. Видовое разнообразие травянистой растительности невысокое. Здесь преобладают злаковые, осоковые и антропофиты. Почвенный покров представлен горно-луговыми почвами. Эта территория многие века использовалась в качестве пастбища.

Уровни концентрации и степень обогащения компонентов химическими элементами возрастают в исследуемых ландшафтах вниз по склону. Это объясняется однонаправленными системообразующими потоками вещества из геоботанических поясов, расположенных выше по склону в каскадной ландшафтно-геохимической системе (рис. 1).

В компонентах нижних частей склонов речных долин наблюдаются наиболее высокие концентрации элементов, и образуется ряд, соответствующий степени подвижности этих элементов $Cd > Pb > Cu > Zn$. Данные результаты согласуются с концепцией Б.Б. Плынова [20] о структурообразующем значении потоков вещества в ландшафтах и выводами В.В. Дьяченко о степени подвижности различных элементов [8]. В Софийских ландшафтах концентрация свинца, меди и цинка в почвах долинного экотона по сравнению с экотонам ВГЛ увеличивается втрое. Содержание кадмия в почвах альпийского пояса небольшое (0,04 мг/кг), но в экотоне днища долины возрастает в 22 раза. В растительном компоненте отмечаются самые низкие концентрации элементов. Однако в поясе экотона ВГЛ они возрастают почти вдвое и продолжа-

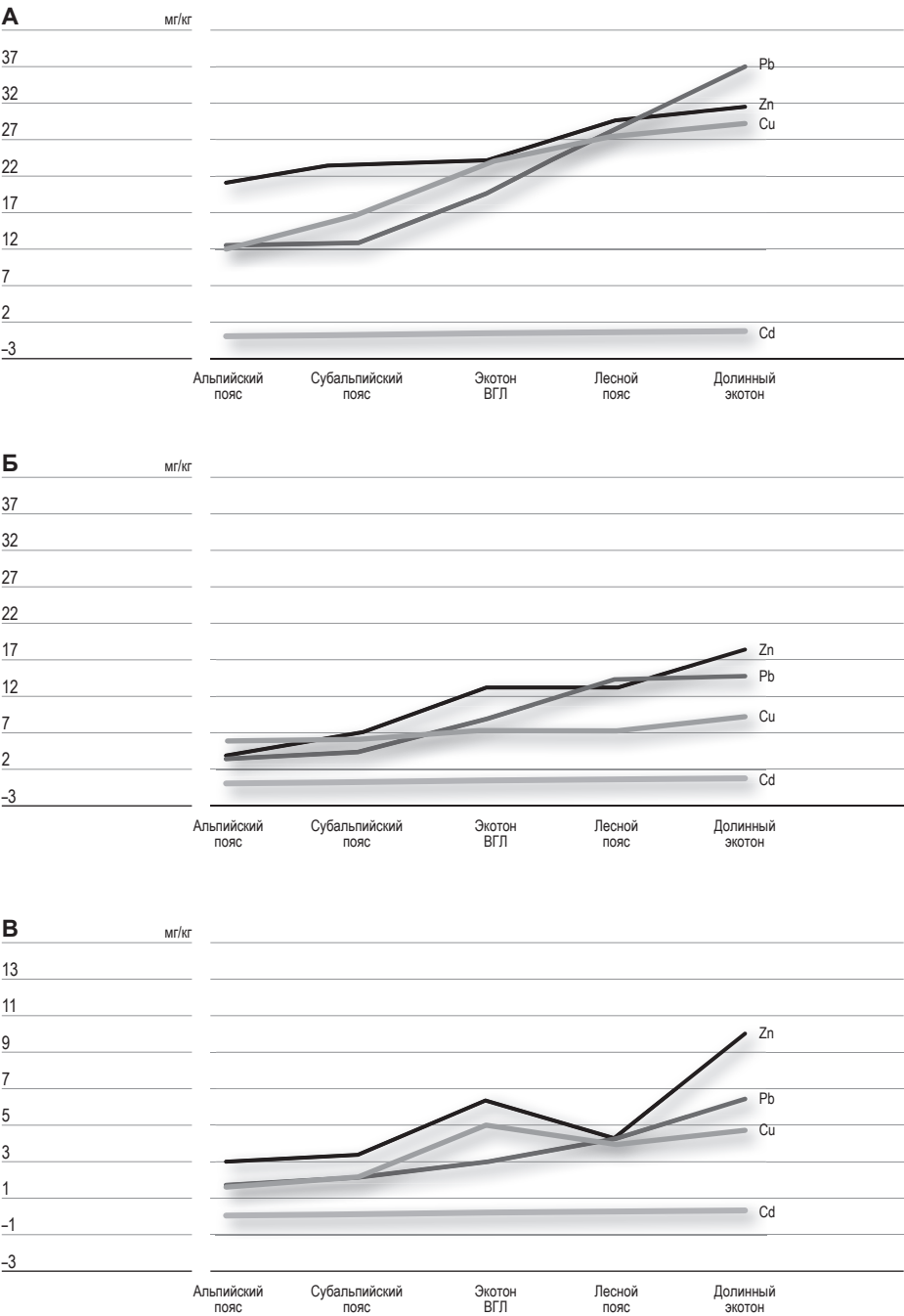


Рис. 1. Латеральное распределение элементов в почвенном (А) и растительном (Б) компонентах, организмах беспозвоночных (В) по геоботаническим высотным поясам Софийских ландшафтов, мг/кг [18].

ют увеличиваться вниз по профилю рельефа. В организмах беспозвоночных (фитофагах) концентрации свинца и кадмия увеличиваются постепенно к днищу долины, меди резко возрастают в поясе экотона ВГЛ, а цинка – в поясе хвойных лесов.

Изучались также внутрисистемные межкомпонентные связи с использованием коэффициента многофакторной корреляции. Качество этих связей позволяет понять особенности пространственной геохимической структуры

Таблица 1. КОЭФФИЦИЕНТЫ МНОЖЕСТВЕННОЙ КОРРЕЛЯЦИИ И УСТОЙЧИВОСТЬ КОМПОНЕНТНОЙ СТРУКТУРЫ СОФИЙСКИХ ЛАНДШАФТОВ

Р _{мф} менее 0,15 (очень слабая связь)	Р _{мф} от 0,15 до 0,30 (слабая связь)	Р _{мф} более 0,30 (средняя связь)	Р _{мф} более 0,50 (значимая связь)
Луговые днища долины с антропофитами (R _{мф} = 0,11)	Березовые мелколесья левого притока р. Софии (R _{мф} = 0,20)	Сосново-пихтовые леса (R _{мф} = 0,39)	Пихтовые леса (R _{мф} = 0,52)
Субальпийские луговые (R _{мф} = 0,10)	Луговая с антропофитами в экотоне ВГЛ (R _{мф} = 0,20)	–	–
Альпийские луговые (R _{мф} = 0,10)	Луговая разнотравно-злаковая в экотоне ВГЛ (R _{мф} = 0,22)	–	–
–	Березовых криволесий в экотоне ВГЛ (R _{мф} = 0,28)	–	–

не только отдельных фаций в пределах высотных геоботанических поясов, но и специфику (тесноту) взаимосвязей их компонентов. Для изучения последних использовались данные концентраций элементов в компонентах и применялся математический метод многофакторного (многофакторного) корреляционного анализа (многофакторная корреляция – R_{мф}), отражающий тесноту их связей [21]. Полученные величины могут изменяться от 0 до 1,0. Чем ближе результат к 1,0, тем теснее многофакторные корреляционные связи рассматриваемой геосистемы, тем она устойчивее к внешним воздействиям, сохранению своего инвариантного состояния и в меньшей степени подвержена процессам трансформации.

Показатели множественной корреляции в фациях среднегорных и высотных ландшафтов в долине Софии позволяют проследить некоторые закономерности устойчивости межкомпонентных связей и их роль в трансформации природных геосистем. Очень слабые компонентные связи наблюдаются во всех луговых фациях, от альпийских лугов до луговых образований троговых долин. Коэффициент R_{mf} здесь колеблется от 0,10 до 0,22. Низкие показатели объясняются жесткой доминантой природных условий высокогорных ландшафтов, а, следовательно, большой уязвимостью воздействия внешних факторов, стимулирующих процессы трансформации в фациальных структурах. К числу таких внешних воздействий следует отнести также и выпас скота в летний сезон. Более высокий коэффициент корреляции характерен для лесных фаций. Несколько ниже он в сосново-пихтовых лесах (0,39), так как здесь последние 15 лет идет вырубка лесов. При этом вырубается в основном сосна (табл. 1).

Полученные результаты коэффициентов многофактерных корреляций в фациальных катенных рядах высотных геоботанических поясов высокогорных и среднегорных ландшафтов в долине реки Гондарай имеют много общего с ландшафтами долины Софии. В целом эти данные позволили провести их ранжирование по степени устойчивости к внешним, в том числе и антропогенным воздействиям:

- неустойчивые (0,10–0,20) в альпийском и субальпийском высотных геоботанических поясах и на лугах днища долины;
- слабоустойчивые (0,20–0,35) в поясе экотона ВГЛ;
- относительно устойчивые (0,36–0,65) в геоботаническом поясе хвойных лесов.

Показатели особенностей среды жизни фитофагов показаны на примере фаций Гондарайского ландшафта хвойных лесов и Джалпаккольского ландшафта высокогорных лугов. Определение напряженности биоэкосистемных связей (Кнапр) проводилось с учетом усредненных коэффициентов, отражающих субъект – объектные отношения на примере парных связей субъекта (фитофаги) с другими природными компонентами фаций (табл. 2).

По величинам коэффициента напряженности биоэкосистемных связей выделены виды состояний геохимической среды для различных фаций горных ландшафтов:

- критическая (более 5,0);
- напряженная (4,01–5,00);
- удовлетворительная (3,01–4,00);
- близкая к нормальной (менее 3,0).

Критическое состояние среды наблюдалось в субальпийских и альпийских лугах. Напряженное состояние типично для фациальных геосистем пояса экотона ВГЛ. Близкое к нормальному состоянию отмечено у фаций хвойных лесных. Коэффициент напряженности отражает не только

Таблица 2.

КОЭФФИЦИЕНТЫ НАПРЯЖЕННОСТИ БИОЭКОСИСТЕМНЫХ СВЯЗЕЙ
ФАЦИЙ ГОНДАРАЙСКОГО И АКСКО-ДЖАЛПАККОЛЬСКОГО ЛАНДШАФТОВ

№ пло- щад- ки	Геоботанический высотный пояс	Фация	Коэффициент напряженности биозкосистемных связей ($K_{напр.}$)
1	Альпий- ские луга	Альпийские луга боковой морены днища цирка	6,58
2		Альпийские луга конечной морены в древнем цирке	5,64
3	Субаль- пийские луга	Субальпийские луга коллювиального склона цирка	5,04
4		Субальпийские луга конуса выноса в районе цирка	4,54
5	Долинный экотон верхней границы леса	Субальпийские луга конуса выноса	3,94
6		Субальпийские луга конуса выноса с антропофитами	4,71
7		Березовые криволесья	4,74
8		Сосновые редколесья	4,25
9	Хвойных лесов	Сосновый лес в верхней части склона долины реки Гондарай	1,43
10		Сосновый лес нижней части склона долины р. Гондарай	2,37
11		Еловый лес днища долины реки Гондарай	1,88

особенности состояния геохимической среды биозкосисте-
мы, но и коррелируется с данными коэффициента множес-
твенной корреляции устойчивости связей компонентов фа-
ций. При этом следует учитывать, что его величины обрат-
но пропорциональны показателям коэффициента $R_{мф}$. Чем
выше показатели коэффициента напряженности биозкосис-
темных связей, тем слабее связи между компонентами фа-
ций. И наоборот, чем больше $R_{мф}$, тем ниже коэффициент
напряженности [18].

ВЫВОДЫ

Полученные коэффициенты межкомпонентной корреляции и напряженности биоэкосистемных связей, отражающие особенности множественных связей в фациях высотных геоботанических поясов исследуемых ландшафтов, невелики и относятся при ранжировании к неустойчивым или слабоустойчивым.

Это объясняется тем, что высокогорные и среднегорные ландшафты имеют достаточно низкую степень самоорганизации, они весьма уязвимы и чутко реагируют на любые изменения. Для горных геосистем, в отличие от равнинных, характерна высокая напряженность геохимических взаимосвязей между растительностью и почвой. В связи с этим растительность горных геосистем является важным компонентом, способствующим сохранению устойчивости их состояния. Применение геохимических методов исследования позволяет проводить не только ранжирование внутрисистемных связей по степени их множественной корреляции и состоянию напряженности геохимической среды в биокосистемах, но и прогнозировать возможную степень трансформации природных геосистем ранга фаций горных ландшафтов под влиянием ведущих на данный момент внешних факторов, как природных, так и антропогенных.

Библиографический список

1. Исаченко А.Г. Ландшафтоведение на переходе ко 2-му столетию своей истории // Ландшафтоведение: теория, методы, региональные исследования, практика: материалы XI Междунар. ландшафтной конф. М., 2006.
2. Калесник С.В. Общие географические закономерности Земли. М.: Изд-во Мысль, 1970. 283 с.
3. Сочава Б.Б. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Изд-во Наука, 1978. 320 с.
4. Крауклис А.А. Проблемы экспериментального ландшафтоведения. А.А. Крауклис. Новосибирск: Изд-во Наука, 1979. 232 с.
5. Охрана ландшафтов. Толковый словарь / под ред. В.С. Преображенского. М.: Изд-во Прогресс, 1982. 272 с.
6. Соболева Н.П., Язиков Е.Г. Ландшафтоведение. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. 175 с.

7. Шальнев В.А. Эволюция ландшафтов Северного Кавказа. Ставрополь: Изд-во СГУ, 2007. 126 с.
8. Дьяченко В.В. Геохимия и оценка состояния ландшафтов Северного Кавказа: автореф. дис. ... д-ра геогр. наук / Дьяченко Владимир Викторович. Новосибирск, 2004. 36 с.
9. Кутровский М.А. Эколого-генетические особенности и антропогенная трансформация рендзин Черноморского побережья Кавказа: автореф. дис. ... канд. биол. наук / Кутровский Михаил Алексеевич. Ростов н/Д., 2006. 23 с.
10. Ляшенко Е.А. Подвижные формы тяжелых металлов (Cu, Zn, Pb, Cd) в почвах геохимических ландшафтов Краснодарского края: автореф. дис. ... канд. геогр. наук / Е.А. Ляшенко. Новосибирск, 2009. 24 с.
11. Хохлов А.Н. Антропогенная трансформация и тенденции развития фауны и населения птиц Центрального Предкавказья: автореф. дис. ... д-ра биол. наук / А.Н. Хохлов. М., 1994. 40 с.
12. Лиховид А.А. Развитие научных представлений о животном населении и его изменении под влиянием антропогенных факторов: автореф. дис. ... д-ра. геогр. наук / А.А. Лиховид. М., 2002. 61 с.
13. Юрин Д.В. Формирование животного населения в процессе конструирования региональных агроландшафтных систем: на материалах Центрального Предкавказья: автореф. дис. ... канд. геогр. наук / Д.В. Юрин. Ставрополь, 2006. 21 с.
14. Харин К.В., Шкарлет К.Ю., Роман А.Н. Пространственная организация животного населения высокогорных ландшафтов Западного кавказа // Проблемы региональной экологии. №5. 2008.
15. Дзуев Р.И., Сухомесова М.В., Канукова В.Н. Экологические особенности пространственной структуры видового населения млекопитающих Кавказа // Юг России: экология, развитие. 2010. №5(1). 104–108 с.
16. Сангаджиева Л.Х. Факторы и механизмы антропогенной трансформации ландшафтов республики Калмыкия на основе биогеохимического анализа их устойчивости: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Саратов, 2006. 42 с.
17. Лямин В.С. Теоретико-познавательная роль категории «географическая картина мира» // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5. География. 2001. №3. С. 3–7.
18. Сивоконь Ю.В., Шальнев В.А. Системнообразующие связи ландшафтов Западного и Центрального Кавказа: геохимический подход. Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2016. 126 с.
19. Авессаломова И.А. Биогеохимия ландшафтов. М.: Изд-во МГУ, 2006. 120 с.
20. Полынов Б.Б. Избранные труды. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1956. 752 с.
21. Елисеева И.И. Общая теория статистики: учебник (текст) / И.И. Елисеева, М.М. Юзбашев. М.: Изд-во Финансы и статистика, 2002. 480 с.

References

1. Isachenko A.G. Landshaftovedenie na perehode ko 2-mu stoletiju svoej istorii (Landscape studies on the transition to the 2nd century of its history) // Landshaftovedenie: teorija, metody, regional'nye issledovanija, praktika: materialy XI Mezhdunar. landshaftnoj konf. M., 2006.
2. Kalesnik S.V. Obshhie geograficheskie zakonomernosti Zemli (General geographic regularities of the Earth). M.: Izd-vo Mysl', 1970. 283 s.
3. Sochava B.B. Vvedenie v uchenie o geosistemah (Introduction to the doctrine of geosystems). Novosibirsk: Izd-vo Nauka, 1978. 320 s.
4. Krauklis A.A. Problemy jeksperimental'nogo landshaftovedenija (Problems of experimental landscape science). A.A. Krauklis. Novosibirsk: Izd-vo Nauka, 1979. – 232 s.
5. Ohrana landshaftov. Tolkovyj slovar' (The protection of landscapes. Explanatory dictionary) / Pod red. V.S. Preobrazhenskogo. M.: Izd-vo Progress, 1982. 272 s.
6. Soboleva N.P., Jazikov E.G. Landshaftovedenie (Landscape Studies). Tomsk: Izd-vo Tomskogo politehnicheskogo universiteta, 2010. 175 s.
7. Shal'nev V.A. Jevoljucija landshaftov Severnogo Kavkaza (Evolution of landscapes of the North Caucasus). Stavropol': Izd-vo SGU, 2007. 126 s.
8. D'jachenko V.V. Geohimija i ocenka sostojanija landshaftov Severnogo Kavkaza (Geochemistry and assessment of landscapes of the North Caucasus): avtoref. dis. ... d-ra geogr. nauk / D'jachenko Vladimir Viktorovich. Novosibirsk, 2004. – 36 s.
9. Kutrovskij M.A. Jekologo-geneticheskie osobennosti i antropogennaja transformacija rendzin Chernomorskogo poberezh'ja Kavkaza (Ecological and genetic features and anthropogenic transformation of renjin black sea coast of the Caucasus): avtoref. dis. ... kand. biol. nauk / Kutrovskij Mihail Alekseevich. Rostov-na-Donu, 2006. – 23 s.
10. Ljashenko E.A. Podvizhnye formy tjazhelyh metallov (Cu, Zn, Pb, Cd) v pochvah geohimicheskikh landshaftov Krasnodarskogo kraja (Mobile forms of heavy metals (Cu, Zn, Pb, Cd) in soils of geochemical landscapes of the Krasnodar territory): avtoref. dis. ... kand. geogr. nauk / Ljashenko Elena Aleksandrovna. Novosibirsk, 2009. 24 s.
11. Hohlov A.N. Antropogennaja transformacija i tendencii razvitija fauny i naselenija ptic Central'nogo Predkavkaz'ja (Anthropogenic transformation and tendencies of development of fauna and bird population of the Central Caucasus): avtoref. dis. ... d-ra biol. nauk / Hohlov Aleksandr Nikolaevich. Moskva, 1994. 40 s.
12. Lihovid A.A. Razvitie nauchnyh predstavitelej o zhivotnom naseleonii i ego izmenenii pod vlijaniem antropogennyh faktorov (Development of scientific representatives of the animal population and

its change under the influence of anthropogenic factors): avtoref. dis. ... d-ra. geogr. nauk / Lihovid Andrej Aleksandrovich. Moskva, 2002. 61 s.

13. Jurin D.V. Formirovanie zhivotnogo naselenija v processe konstruirovaniya regional'nyh agrolandshaftnyh system (The Formation of the animal population in the process of designing regional agro-landscape systems: on materials of the Central Caucasus): na materialah Central'nogo Predkavkaz'ja: avtoref. dis. ... kand. geogr. nauk / Jurin Dmirij Viktorovich. Stavropol', 2006. 21 s.
14. Harin K.V., Shkarlet K.Ju., Roman A.N. Prostranstvennaja organizacija zhivotnogo naselenija vysokogornyh landshaftov Zapadnogo Kavkaza (Spatial organization of animal populations in the mountainous landscapes of the Western Caucasus) // Problemy regional'noj jekologii. M. №5. 2008.
15. Dzuev R.I., Suhomesova M.V., Kanukova V.N. Jekologicheskie osobennosti prostranstvennoj struktury vidovogo naselenija mleko-pitajushih Kavkaza (Environmental features of the spatial structure of the species population of mammals of the Caucasus) // Jug Ros-sii: jekologija, razvitie. 2010. №5(1). 104–108 s.
16. Sangadzhieva L.H. Faktory i mehanizmy antrogeennoj transformacii landshaftov respubliki Kalmykija na osnove biogeohimicheskogo analiza ih ustojchivosti (Factors and mechanisms androgennoe transformation of landscapes of the Republic of Kalmykia on the basis of the biogeochemical analysis of their sustainability): avtoref. dis. ... d-ra biol. nauk / Sangadzhieva Ljudmila Halgaevna. Saratov, 2006. 42 s.
17. Ljamin V.S. Teoretiko-poznavatel'naja rol' kategorii «geograficheskaja kartina mira» (Epistemological role of the category «geographical picture of the world») // Vestn. Mosk. un-ta. Serija 5. Geografija. 2001. №3. S. 3-7.
18. Sivokon' Ju.V., Shal'nev V.A. Sistemnoobrazujushhie svjazi landshaftov Zapadnogo i Central'nogo Kavkaza: geohimicheskij podhod (Sistemnoobrazuyushchie communication landscapes of the West and Central Caucasus: the geochemical approach). Stavropol': Izd-vo SKFU, 2016. 126 s.
19. Avessalomova I.A. Biogeohimija landshaftov (The biogeochemistry of landscapes). M.: Izd-vo MGU, 2006. – 120 s.
20. Polynov B.B. Izbrannye Trudy (Selected papers. Moscow). M.; L.: Izd-vo AN SSSR, 1956. 752 s.
21. Eliseeva I.I. Obshhaja teorija statistiki: uchebnik (tekst) (General statistics theory: the textbook (text)). I.I. Eliseeva, M.M. Juzbashev. M.: Izd-vo Finansy i statistika, 2002. 480 s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

«Наука. Инновации. Технологии», №3, 2017

- АВДЕЕВ** Андрей Валерьевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей и теоретической физики Северо-Кавказского Федерального Университета. Телефон: 8-928-010-97-55. E-mail: amedeo82@yandex.ru
- АЛЕКСЕЕВ** Александр Викторович, аспирант кафедры цифровых технологий, Воронежский государственный университет (г. Воронеж). Телефон: 8 9515560420. E-mail: a_v_alekseev@bk.ru
- БАДОВ** Александр Даурбекович, доктор географических наук, профессор, профессор кафедры физической и социально-экономической географии Северо-Осетинского государственного университета им. К.Л. Хетагурова (г. Владикавказ). Телефон: +78672530904. E-mail: badov@list.ru
- БЕКЕТОВ** Сергей Борисович, доктор технических наук, профессор кафедры геофизических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: (8652) 94-01-56, вн. (52-25). E-mail: gmpr-skfu@yandex.ru
- БЕЛОЗЕРОВ** Виталий Семенович, доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой социально-экономической географии, геоинформатики и туризма Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: (8652) 95-68-00, (доб. 49-91). E-mail: seg_ncfu@mail.ru
- БОЛДЫРЕВ** Сергей Владимирович студент 5 курса кафедры цифровых технологий, Воронежский государственный университет (г. Воронеж). Телефон: +7 (473) 220-75-21. E-mail: office@main.vsu.ru
- БОРЗУНОВ** Сергей Викторович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры цифровых технологий Воронежского государственного университета (г. Воронеж). Телефон: 8 4732 208384. E-mail: sborzunov@gmail.com
- ВАСЬКИНА** Ангелина Владимировна, магистрант кафедры высшей алгебры и геометрии Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: (988)-095-71-05. E-mail: lina.vaskina.94@mail.ru

- ВЕРИСОКИН Александр Евгеньевич, аспирант, ассистент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: (8)–962-015-41-66. E-mail: verisokin.aleksandr@mail.ru
- ГАЛАЙ Борис Федорович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, профессор кафедры «Строительство» Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: (8652) 95-68-44. E-mail: galaybf@mail.ru
- ГАСУМОВ Рамиз Алиевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительства нефтяных и газовых скважин Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: 88652563026. E-mail: Priemnaya@scnipigaz.ru
- ГАСУМОВ Рустам Рамизович, кандидат технических наук, директор научного центра по строительству, эксплуатации и ремонту скважин АО «СевКавНИПИгаз». Телефон: 88652358077. E-mail: GasumovRR@scnipigaz.ru
- ГЕРАСЬКИН Вадим Георгиевич, доктор технических наук, начальник управления Инженерно-технический центр филиала ООО «Газпром трансгаз Кубань». Телефон: (861) 262-56-84. E-mail: ms.sngs@mail.ru/
- ГЛАДКОВ Андрей Владимирович, старший преподаватель кафедры прикладной математики и математического моделирования Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: (905) 497-53-38. E-mail: gavandrew@mail.ru
- ГРИДИН Владимир Алексеевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой геологии нефти и газа института нефти и газа Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: (8652) 94-72-38, 95-68-00, (52-10). E-mail: gng@ncstu.ru
- ГРИШАНИНА Ольга Алексеевна, кандидат физико-математических наук, заведующая кафедрой дизайна и рекламы, Ставропольский филиал Московского педагогического государственного университета. Телефон: +7-918-741-08-06. E-mail: grishanina_o_a@mail.ru
- ДЕРЯБИН Михаил Иванович, доктор физико-математических наук, профессор Северо-Кавказского Федерального Университета. Телефон: 8(8652) 753-570. E-mail: m.i.deryabin@rambler.ru
- ДИМИТРИАДИ Юлианна Константиновна, кандидат технических наук, заведующий кафедрой Строительства нефтяных и газовых скважин Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: 8-918-759-15-91. E-mail: ms.sngs@mail.ru

- ДУДАЕВ Сайпи Амиранович, доктор технических наук, генеральный директор ООО «Севкавнефтегазгеофизика-Новые технологии». Телефон: 8(865)2723398. E-mail: skgeofiznt@mail.ru
- ЖДАНОВА Наталья Владимировна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики, электротехники и электроники Северо-Кавказского Федерального Университета. Телефон: 8-928-308-47-03. E-mail: zhdanova_n@rambler.ru
- ЖИЛЬЦОВА Мария Владимировна, аспирант кафедры ботаники, зоологии и общей биологии Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: 8-928-983-84-38.
- ЖУРАВЛЕВА Ирина Александровна, кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики и математического моделирования Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: (8652) 33-02-82, доб. 49-32. E-mail: irinapolina@yandex.ru
- ЗАИКИНА Ирина Николаевна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории подготовки специалистов Ставропольского противочумного института Роспотребнадзора. Телефон: 8-962-411-11-90. E-mail: z_i_n09@mail.ru
- КАЛИТА Диана Ивановна, аспирант, ассистент кафедры информационных систем и технологий Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: (962)-007-90-24. E-mail: diana.kalita@mail.ru
- КЕРИМОВ Абдул-Гапур Гусейнович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой геофизических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: (8652) 94-01-56, вн. (52-25). E-mail: gmpr-skfu@yandex.ru
- КОНОВАЛОВ Дмитрий Альбертович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая и промышленная теплоэнергетика» Воронежского государственного технического университета (г. Воронеж). Телефон: +7 (903) 650-54-78. E-mail: dmikonovalov@yandex.ru
- КОПЧЕНКОВ Вячеслав Григорьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технической эксплуатации автомобилей машиностроения Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: 88652956739. E-mail: Kopchenkov2@rambler.ru
- КОРНЕВА Лилия Игоревна, аспирант кафедры социально-экономической географии, геоинформатики и туризма Северо-Кав-

- казского федерального университета. Телефон: (8652) 95-68-00, (доб. 49-81). E-mail: liliya.cstp@gmail.com
- КОРНЕЕВ** Петр Кириллович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института повышения квалификации научно-педагогических кадров Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: (8652) 35-34-50. E-mail: k-fmf-primath@stavsu.ru
- КОСТЮКОВ** Сергей Владимирович, аспирант, научный сотрудник лаборатории технологических жидкостей АО «СевКавНИПИгаз». Телефон 8-919-740-52-26. E-mail: kostyukovsv@scnipigaz.ru
- КОТТИ** Борис Константинович, доктор биологических наук, профессор кафедры ботаники, зоологии и общей биологии Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: 8-961-460-51-36. E-mail: boris_kotti@mail.ru
- ЛУКЬЯНОВ** Владимир Тимофеевич, доктор технических наук, профессор кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: 88652940096. E-mail: RANGM26@yandex.ru
- ЛЯГИН** Алексей Михайлович, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Института повышения квалификации научно-педагогических кадров СКФУ. Телефон (8652) 33-02-82 доб. 49-32. E-mail: k-fmf-primath@stavsu.ru
- ЛЯХОВ** Павел Алексеевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики и математического моделирования Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: (962)-028-72-14. E-mail: ljahov@mail.ru
- ЛЯШЕНКО** Екатерина Александровна, кандидат географических наук, доцент кафедры физической географии и кадастра Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: 8 (8652) 33-02-84 (доб. 4950). E-mail: Ljashenko_Ekaterina@mail.ru
- МАШКОВ** Виктор Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: (8)-929-842-25-77. E-mail: ya.natali1579@yandex.ru
- МЕЛЬНИЧУК** Виктория Викторовна, кандидат географических наук, доцент кафедры физической географии и кадастра Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: 8 (8652) 33-02-84 (доб. 4950). E-mail: Vita2783@mail.ru

- МОЧАЛОВ Валерий Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры инфокоммуникаций Института информационных технологий телекоммуникаций Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: (8652) 95-69-97. E-mail: valery2015@yandex.ru
- НААЦ Виктория Игоревна, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры прикладной математики и математического моделирования Северо-Кавказского федерального университета. Телефон 8-918-744-82-89. E-mail: VINAac@yandex.ru
- НААЦ Игорь Эдуардович, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник института повышения квалификации и научно-педагогических кадров Северо-Кавказского федерального университета. Телефон (8-652) 35-21-10 (1154). E-mail: naatsie@yandex.ru
- НЕПРЕТИМОВА Елена Владимировна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики и математического моделирования Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: (8652) 33-02-82, доб. 49-32. E-mail: nev1973@mail.ru
- НИФАНТОВ Виктор Иванович, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник Центра подземного хранения газа ООО «Газпром ВНИИГАЗ» (Московская обл.). Телефон: (498) 657-44-95. E-mail: V_Nifantov@vniigaz.gazprom.ru
- ОВЧАРОВ Сергей Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии переработки нефти и промышленной экологии Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: 88652940297. E-mail: oos@stv.runnet.ru
- ОСАДЧАЯ Ирина Леонидовна, кандидат технических наук, ученый секретарь аппарата при руководстве АО «СевКавНИПИгаз». Телефон: 88652355641. E-mail: OsadchayaIL@scnipigaz.ru
- ПИГУЛЕВ Роман Витальевич, кандидат технических наук, и.о. зав. кафедрой физики, электротехники и электроники Северо-Кавказского Федерального Университета. Телефон: 8(8652) 944-071. E-mail: pigulev_r.v@mail.ru
- РЫСКАЛЕНКО Роман Андреевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей алгебры и геометрии Северо-Кавказского федерального университета. Телефон 8-918-751-92-82. E-mail: azerton@yandex.ru

- СИМОНОВСКИЙ Александр Яковлевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики, Северо-Кавказский федеральный университет. Телефон: +7-918-747-06-01. E-mail: simonovchki@mail.ru
- ТОКАРЕВ Александр Александрович, аспирант кафедры физической географии и кадастра Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: 8 (8652) 33-02-84 (доб. 4950). E-mail: Sanchezst@mail.ru
- ТУРОВСКИЙ Ярослав Александрович, кандидат медицинских наук, доцент кафедры цифровых технологий, заведующий лабораторией медицинской кибернетики Воронежского государственного университета (г. Воронеж). Телефон: 8 9042138295. E-mail: yaroslav_turovsk@mail.ru
- ФЁДОРОВА Наталья Григорьевна, доктор технических наук, профессор кафедры строительства нефтяных и газовых скважин Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: 88652956800. E-mail: fng8@mail.ru
- ЧЕРВЯКОВ Николай Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики и математического моделирования Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: (905)-469-34-12. E-mail: k-fmf-primath@stavs.ru
- ЧЕРКАСОВ Александр Александрович, кандидат географических наук, доцент кафедры социально-экономической географии, геоинформатики и туризма Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: (8652) 95-68-00, (доб. 49-81). E-mail: cherkasov_stav@mail.ru
- ШАЛЬНЕВ Виктор Александрович, доктор географических наук, профессор кафедры физической географии и кадастра Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: 8 (8652) 33-02-84 (доб. 4950). E-mail: Phisgeo@yandex.ru
- ЯНОВСКИЙ Александр Александрович, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры математики Ставропольского государственного аграрного университета. Телефон: +7-918-866-96-64. E-mail: aa.yanovskiy@yandex.ru
- ЯРЦЕВА Елена Павловна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики и математического моделирования Северо-Кавказского федерального университета. Телефон 8-918-759-23-15. E-mail: yartseva_elena@mail.ru

ABOUT THE AUTHORS

«Наука. Инновации. Технологии», №3, 2017

- ALEKSEEV Alexander Viktorovich, post-graduate student of the Department of Digital Technologies Voronezh State University. Phone: 8 9515560420. E-mail: a_v_alekseev@bk.ru
- AVDEEV Andrey Valer'yevich, Candidate of Physics and Mathematical Sciences, Associate professor of the Department of General and Theoretical Physics in the North-Caucasus Federal University. Phone: 8-928-010-97-55. E-mail: amedeo82@yandex.ru
- BADOV Alexander Daurbekovich, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Professor of the Department of Physical and Socio-Economic Geography, North Ossetian State University named K.L. Khetagurov (Vladikavkaz). Phone: +78672530904. E-mail: badov@list.ru
Beketov Sergey Borisovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Geophysical Methods of Prospecting and Exploration of Mineral Deposits of the North Caucasus Federal University. Phone: (8652) 94-01-56, ext. (52-25). E-mail: gmpr-skfu@yandex.ru
- BELOZEROV Vitaly Semenovich, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Head of the Department of Social and Economic Geography, Geoinformatics and Tourism of the North Caucasus Federal University. Phone: (8652) 95-68-00, (ext. 49-91). E-mail: seg_ncfu@mail.ru
- BOLDYREV Sergey Vladimirovich, student, Voronezh State University. Phone: +7 (473) 220-87-55. E-mail: office@main.vsu.ru
- BORZUNOV Sergey Victorovich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Digital Technologies, Voronezh State University. Phone: 8 4732 208384. E-mail: sborzunov@gmail.com
- CHERKASOV Alexander Aleksandrovich, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor of the Department of Socio-Economic Geography, Geoinformatics and Tourism of the North Caucasus Federal University. Phone: (8652) 95-68-00, (ext. 49-81). E-mail: cherkasov_stav@mail.ru
- CHERVYAKOV Nikolay Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of Department Applied Mathematics and Mathematical Modeling of the North-Caucasus Federal University. Phone: (905)-469-34-12. E-mail: k-fmf-primath@stavsu.ru

- DERYABIN Mihail Ivanovich, Doctor of Physics and Mathematical Sciences, Professor of the Department of General and Theoretical Physics North-Caucasus Federal University. Phone: 8(8652) 753-570. E-mail: m.i.deryabin@rambler.ru
- DIMITRIADI Julianna Konstantinovna, candidate of engineering sciences, head of department «Design of oil and gas wells» in the North Caucasus Federal University. Phone: 8-918-759-15-91. E-mail: ms.sngs@mail.ru
- DUDAYEV Saipi Amiranovich, Doctor of Technical Sciences, General Director of Sevkavneftegazgeofizika-New Technologies. Phone: 8 (865) 2723398. E-mail: skgeofiznt@mail.ru
- FEDOROVA Natalya Grigoryevna, doctor of Technical Sciences, professor of Oil and Gas Wells Construction Department in the North Caucasus Federal University. Phone: 88652956800. E-mail: fng8@mail.ru
- GALAJ Boris Fyodorovich, doctor of geological and mineralogical Sciences, Professor, Professor of construction engineering of the North Caucasus Federal University. Phone: (8652) 95-68-44. E-mail: galaybf@mail.ru
- GASUMOV Ramiz Aliyevich, doctor of Technical Sciences, professor, professor of Oil and Gas Wells Construction Department in the North Caucasus Federal University. Phone: 88652563026. E-mail: Priemnaya@scnipigaz.ru
- GASUMOV Rustam Ramizovich, Candidate of Technical Sciences, Head of Scientific Center of Wells Construction, Operation and Work-over, JSC SevKavNIPgaz. Phone: 88652358077. E-mail: GasumovRR@scnipigaz.ru
- GERASKIN Vadim Georgievich, doctor of technical sciences, head of the engineering and technical center branch of OOO Gazprom transgaz Kuban. Phone: (861) 262-56-84. E-mail: ms.sngs@mail.ru.
- GLADKOV Andrey Vladimirovich, a senior lecturer in Department of Applied Mathematics and Mathematical Modeling North-Caucasian Federal University. Phone: (905) 497-53-38. E-mail: gavandrew@mail.ru
- GRIDIN Vladimir Alekseevich, doctor of geological and mineralogical Sciences, Professor, head of oil and gas geology Institute of oil and gas of the North Caucasus Federal University. Phone: (8652) 94-72-38, 95-68-00, (52-10). E-mail: gng@ncstu.ru
- GRISHANINA Olga Alekseevna, Ph.D., Head of the Department of Design and Advertising, Stavropol Branch of the Moscow Pedagogical State

- University. 355042 Stavropol, ul. Dovatorsev, 66G. Phone: +7-918-741-08-06 e-mail: grishanina_o_a@mail.ru
- KALITA** Diana Ivanovna, PhD Student, Assistant of Department of Information Systems and Technology of the North-Caucasus Federal University. Phone: (962) 007-90-24. E-mail: diana.kalita@mail.ru
- KERIMOV** Abdul-Gapur Guseinovich, doctor of technical sciences, docent, head of department of geophysical methods of prospecting and exploration of mineral deposits of the North Caucasus Federal University. Phone: (8652) 94-01-56, in. (52-25). E-mail: gmp-rskfu@yandex.ru
- KONOVALOV** Dmitry Albertovich, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of The Department "Theoretical and industrial heat power engineering", Voronezh state technical University. Phone +7 (903) 650-54-78. E-mail: dmikonovalov@yandex.ru
- KOPCHENKOV** Vyacheslav Grigoryevich, doctor of Technical Sciences, professor, professor of the Department Technical Maintenance of Vehicles in the North Caucasus Federal University. Phone: 88652956739. E-mail: Kopchenkov2@rambler.ru
- KORNEEV** Petr Kirillovich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, a leading scientific worker of the Institute of advanced training of the teaching staff of the North Caucasus Federal University. Phone: (8652) 35-34-50. E-mail: k-fmf-primath@stavs.ru
- KORNEVA** Lilia Igorevna, postgraduate student of the Department of Socio-Economic Geography, Geoinformatics and Tourism of the North Caucasus Federal University. Phone: (8652) 95-68-00, (ext. 49-81). E-mail: liliya.cstp@gmail.com
- KOSTYUKOV** Sergey Vladimirovich, post-graduate student, scientific employee of the laboratory of technological fluids of SevKavNIPigaz JSC. Phone 8-919-740-52-26. E-mail: kostyukovsv@scnipgaz.ru
- KOTTI** Boris Konstantinovich, Doctor of biological Science, professor of the Department of botany, zoology and general biology of North Caucasus Federal University. Phone: 8-961-460-51-36, E-mail: boris_kotti@mail.ru
- LUKYANOV** Vladimir Timofeyevich, doctor of Technical Sciences, professor of the Department of Development and Operation of Oil and Gas fields in the North Caucasus Federal University. Phone: 88652940096. E-mail: RANGM26@yandex.ru
- LYAGIN** Alexei Mikhailovich, PhD, associate professor, leading researcher of the Institute of advanced training of the teaching staff North-

Caucasian Federal University. Phone: (8652) 33-02-82 (49-32).
E-mail: k-fmf-primath@stavs.ru

LYAKHOV Pavel Alekseyevich, Assistant Professor, Department of Applied Mathematics and Mathematical Modeling of the North-Caucasus Federal University. Phone: (962) 028-72-14.
E-mail: ljahov@mail.ru

LYASHENKO Ekaterina Aleksandrovna, candidate of geographical sciences, associate professor of the Physical Geography and Cadastre Department of the North Caucasus Federal University. Phone: 8 (8652) 33-02-84 (additional 4950).
E-mail: Ljashenko_Ekaterina@mail.ru

MASHKOV Viktor Alekseevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Development and Operation of Oil and Gas Fields of the North Caucasus Federal University. Phone: (8) -929-842-25-77. E-mail: ya.natali1579@yandex.ru

MELNYCHUK Viktoria Viktorovna, Candidate of Geographical Sciences, associate professor of the Department of Physical Geography and Cadastre of the North Caucasus Federal University. Phone: 8 (8652) 33-02-84 (additional 4950). E-mail: Vita2783@mail.ru

MOCHALOV Valery Petrovich, doctor of technical sciences, professor of the infocommunications department of the Institute of Information Technologies of Telecommunications of the North Caucasus Federal University. Phone: (8652) 95-69-97. E-mail: valery2015@yandex.ru

NAATS Igor Eduardovich, doctor of physical and mathematical Sciences, Professor, leading researcher of the Institute of training and scientific-pedagogical personnel of the North-Caucasus Federal University. Phone (8-652) 35-21-10 (1154). E-mail: naatsie@yandex.ru

NAATS Victoria Igorevna, doctor of physico-mathematical Sciences, associate Professor, Professor, Department of applied mathematics and mathematical modeling of the North-Caucasus Federal University. Phone 8-918-744-82-89. E-mail: VINaac@yandex.ru

NEPRETIMOVA Elena Vladimirovna, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Applied Mathematics and Mathematical Modeling North-Caucasian Federal University. Phone: (8652) 33-02-82 (49-32). E-mail: nev1973@mail.ru

NIFANTOV Victor Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Chief Researcher of Underground Gas Storage Center, Gazprom VNIIGAZ (Moscow region). Phone: (498) 657-44-95. E-mail: V_Nifantov@vniigaz.gazprom.ru

- OSADCHAYA Irina Leonidovna, Candidate of Technical Sciences, Scientific Secretary of the staff under the management of JSC "SevKavNIPgaz". Phone: 88652355641. E-mail: OsadchayaIL@scnipgaz.ru
- OVCHAROV Sergey Nikolayevich, doctor of Technical Sciences, professor, professor of the Department Technology of Oil Refining and Industrial Ecology in the North Caucasus Federal University. Phone: 8865294-02-97. E-mail: oos@stv.runnet.ru
- PIGULEV Roman Vital'yevich, Candidate of Engineering Sciences, Head of the Department of Physics, Electrical Engineering and Electronics in the North-Caucasus Federal University. Телефон: 8(8652) 944-071. E-mail: pigulev_r.v@mail.ru
- RISKALENKO Roman Andreevich, candidate of physico-mathematical Sciences, to the center of the Department of higher algebra and geometry of the North-Caucasus Federal University. Phone 8-918-751-92-82. E-mail: azerton@yandex.ru
- SHALNEV Viktor Aleksandrovich, Doctor of Geographical Sciences, Professor of the Department of Physical Geography and Cadastre of the North Caucasus Federal University. Phone: 8 (8652) 33-02-84 (ext. 4950). E-mail: Phisgeo@yandex.ru
- SIMONOVSKY Alexander Yakovlevich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Physics, North-Caucasian Federal University, Phone: + 7-918-747-06-01, e-mail: simonovchkij@mail.ru
- TOKAREV Alexander Aleksandrovich, postgraduate student of the Department of Physical Geography and Cadastre of the North Caucasus Federal University. Phone: 8 (8652) 33-02-84 (ext. 4950). E-mail: Sanchezst@mail.ru
- TUROVSKY Yaroslav Aleksandrovich, Candidate of Medical Sciences, Associate Professor of the Department of Digital Technologies, Head of the Laboratory of Medical Cybernetics, Voronezh State University. Phone: 8 9042138295. E-mail: yaroslav_turovsk@mail.ru
- VASKINA Angelina Vladimirovna, Undergraduate student of Department of Higher Algebra and Geometry of the North-Caucasus Federal University. Phone: (988)-095-71-05. E-mail: lina.vaskina.94@mail.ru
- VERISOKIN Alexander Evgenievich, graduate student, assistant of the department of development and operation of oil and gas fields of the North Caucasus Federal University. Phone: (8) -962-015-41-66. E-mail: verisokin.aleksandr@mail.ru

- YANOVSKY Alexander Aleksandrovich, Ph.D., senior lecturer of the Department of Mathematics of the Stavropol State Agrarian University, 355029 Stavropol. Lenina 417i, apt. 99, Phone: + 7-918-866-96-64, e-mail: aa.yanovskiy@yandex.ru
- YARTSEVA Elena Pavlovna, candidate of physico-mathematical Sciences, associate Professor of applied mathematics and mathematical modeling of the North-Caucasus Federal University. Phone 8-918-759-23-15. E-mail: yartseva_elena@mail.ru
- ZAIKINA Irina Nikolaevna, Candidate of biological Science, senior scientist of Stavropol antiplague Institute. Phone: 8-962-411-11-90. E-mail: z_i_n09@mail.ru
- ZHDANOVA Natal'ya Vladimirovna, Candidate of Physics and Mathematical Sciences, Associate professor of the Department of Physics, Electrical Engineering and Electronics in the North-Caucasus Federal University. Phone: 8-928-308-47-03. E-mail: zhdanova_n@rambler.ru
- ZHILTSOVA Maria Vladimirovna, postgraduate student of the Department of botany, zoology and general biology of North Caucasus Federal University. Phone: 8-928-983-84-38. E-mail: maruuusia@yandex.ru
- ZHURAVLEVA Irina Alexandrovna, Ph.D., Associate Professor, Department of Applied Mathematics and Mathematical Modeling North-Caucasian Federal University. Phone: (8652) 33-02-82 (49-32). E-mail: irinapolina@yandex.ru

CONTENTS

«Наука. Инновации. Технологии», №3, 2017

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

Avdeev A.V., Zhdanova N.V.,

Deryabin M.I., Pigulev R.V.

Features of molecules accumulation in the triplet state at excitation of the organic compounds by rectangular pulses 7

Grishanina O.A., Simonovskii A.Ya.,

Yanovskii A.A. Hydrodynamics and heat exchange in processes of cooling of a magnetic plate in a magnetic liquid in the magnetic field 15

Konovalov D.A. Modeling of heat-hydraulic characteristics of microchannel heat transfer elements based on the matrix of silicon monocrystals 29

Korneev P.K., Juravleva I.A.,

Nepretimova E.V.,

Gladkov A.V.,

Lyagin A.M. Prefractal as the source of new rational approximations of functions with a fractal representation. 41

Naats I., Naats V.I., Riskalenko R.A.

Yartseva E.P. Operators of potential type in problems of applied analysis 51

Turovsky Ya.A., Borzunov S.V.,**Alekseev A.V., S.V. Boldyrev**Modeling of the additional channel of feed-
back in eye-tracking and neuro-computer in-
terfaces 69**Chervyakov N.I., Lyakhov P.A.,****Kalita D.I., Vaskina A.V.**Numerical implementation of the image fil-
tering method with computations in Residue
Number System 81**EARTH SCIENCES****Badov A.D.**Features of geography of crime in the North
Caucasus in the modern period 95**Belozеров V.S., Cherkasov A.A.**Regional Features of Shaping the Ethnic Struc-
ture in the Russian Population 105**Gasumov R.A., Kostyukov S.V.,****Ovcharov S.N.,****Mochalov V.P.,****Fedorova N.G., Nifantov V.I.**Fluids for killing gas and gas condensate
wells with high formation temperatures 117**Gasumov R.R., Osadchaya I.L.,****Kopchenkov V.G., Beketov S.B**Fillers of plant origin to blocking compositions
for well killing 127**Dudaev S.A.,****Kerimov A-G.G.,****Gridin V.A. Galay B.F.**Optimization of the complex of geophysi-
cal well investigations in argillite-like paleo-
gene deposits by the example of oil fields of
Eastern Ciscaucasia 141

Korneva L.I.	Features of the territorial structure of investment projects in the Stavropol Territory	149
Kotti B.K., Zaikina I.N., Zhiltsova M.V.	Distribution of the ixodid tick <i>Hyalomma marginatum</i> Koch (Acari: Ixodidae) in the Stavropol region	161
Mashkov V.A., Verisokin A.E., Dimitriadi U.K., Lukianov V.T., Geras'kin V.G.	The analysis used designs anchoring unit and designs of seals of packers used in the hydraulic fracturing	175
Shalnev V.A., Lyashenko E.A., Melnychuk V.V., Tokarev A.A.	Geochemical approach to the study of spatial relations and transformation of landscapes (the example of Western Caucasus)	189
ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ		201
ABOUT THE AUTHORS		207

Научное издание

НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ

2017

Выпуск 3

Корректор — М.И. Толмачев.

Компьютерная версия — О.Г. Полевич.

Подписано в печать 29.09.2017. Формат 70 × 108 1/16.
Гарнитура Times New Roman. Бумага офсетная. Усл. печ. л.
18,73. Тираж 1 000 экз.

Отпечатано в Издательско-полиграфическом комплексе
ФГАОУ ВПО «Северо-Кавказский федеральный университет».
355029, г. Ставрополь, пр-т Кулакова, 2.