

ИЗВЕСТИЯ

Гомельского государственного университета
имени Ф. Скорины

Естественные науки

№ 6 (93)

Гомельский государственный университет
имени Ф. Скорины

ИЗВЕСТИЯ

Журнал зарегистрирован в Министерстве информа-
ции Республики Беларусь
(свидетельство о регистрации
№ 1/87 от 18.11.2013 года)

Журнал включен ВАК Республики Беларусь
в перечень научных изданий Республики Беларусь,
в которых публикуются результаты
диссертационных исследований
(приказы № 207 от 13.12.2005, № 9 от 15.01.2010,
№ 57 от 16.05.2013)

Журнал включен в библиографические базы данных
ВИНИТИ и Научную электронную библиотеку
eLIBRARY.RU

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор А.В. РОГАЧЕВ, д-р хим. наук,
профессор, член-корр. НАН Беларуси
Зам. главн. редактора О.М. ДЕМИДЕНКО,
д-р тех. наук, профессор
Зам. главн. редактора М.В. СЕЛЬКИН,
д-р физ.-мат. наук, профессор

Члены редакционной коллегии:

Г.Г. Гончаренко, д-р биол. наук, проф.,
чл.-корр. НАН Беларуси
Ф.В. Кадол, д-р пед. наук, проф.
В.Н. Калмыков, д-р филос. наук, проф.
В.И. Коваль, д-р филол. наук, проф.
Г.Г. Лазько, д-р ист. наук, проф.
И.В. Семченко, д-р физ.-мат. наук, проф.
В.С. Смородин, д-р тех. наук, проф.
Б.В. Сорвиров, д-р экон. наук, проф.
В.М. Хомич, д-р юрид. наук, проф.
О.Г. Шляхтова, ответственный секретарь

Члены редакционной коллегии по естественным наукам:

В.Ф. Багинский, д-р биол. наук, проф., член-корр.
НАН Беларуси
А. Баллистер-Болинше (Испания), д-р, проф. математики
Ван Сяо Фэн (Китай), д-р тех. наук, проф.
Го Вэньбинь (Китай), д-р физ.-мат. наук, проф.
В.В. Кириченко (Украина), д-р физ.-мат. наук, проф.
В.П. Кудин, д-р тех. наук, проф.
А.А. Махнев (Россия), д-р физ.-мат. наук, проф.,
член-корр. РАН
В.В. Можаровский, д-р тех. наук, проф.
А.Н. Сердюков, д-р физ.-мат. наук, проф., член-
корр. НАН Беларуси
А.Н. Скиба, д-р физ.-мат. наук, проф.
Шэн Рикун (Китай), д-р тех. наук, проф.
Р. Эстебан Ромеро (Испания), д-р, проф. математики

АДРЕС РЕДАКЦИИ:
246019, Беларусь, Гомель, ул. Советская, 104,
Телефоны: +375 (232) 60-73-82
E-mail: vesti@gsu.by
Интернет-адрес: <http://vesti.gsu.by>

Francisk Scorina Gomel State University

PROCEEDINGS

The Journal is registered in the Ministry of Information of
Republic of Belarus
(registration certificate
number 1/87 dated 18.11.2013)

The Journal is included in the Republic of Belarus
Higher Attestation Commission list of scientific publica-
tions of the Republic of Belarus, which publish the main
results for the degree of Doctor (Candidate) of Sciences
(order number 207 dated 13.12.2005, number 9 dated
15.01.2010, number 57 dated 16.05.2013)

The Journal is included in bibliographic databases of the
All-Russia Institute of Scientific and
Technical Information (VINITI), Scientific electronic
library eLIBRARY.RU

EDITORIAL BOARD

Editor-in-chief A.V. Rogachev, Sc. D. Professor, Cor-
responding Member NASB
Deputy editor-in-chief O.M. DEMIDENKO,
Sc. D., Professor
Deputy editor-in-chief M.V. SELKIN,
Sc. D., Professor

Members of editorial board:

G.G. Goncharenko, Sc. D., Professor, Corresponding
Member NASB
F. V. Kadol, Sc. D., Professor
V.N. Kalmykov, Sc. D., Professor
V.I. Koval, Sc. D., Professor
G.G. Lazko, Sc. D., Professor
I.V. Semchenko, Sc. D., Professor
V.S. Smorodin, Sc. D., Professor
B.V. Sorvirov, Sc. D., Professor
V.M. Homich, Sc. D., Professor
O.G. Shlyahotova, executive secretary

Members of editorial board for the natural sciences

V.F. Baginsky, Sc. D., Professor, Corresponding
Member NASB
A. Ballister-Bolinshes (Spain), Sc. D., Professor
Van Siao Fen (China), Sc. D., Professor
Go Wenbin (China), Sc. D., Professor
V.V. Kirichenko (Ukrain), Sc. D., Professor
V.P. Kudin, Sc. D., Professor
A.A. Makhnev (Russia), Sc. D., Professor, Correspond-
ing Member RAS
V.V. Mozharovsky, Sc. D., Professor
A.N. Serdukov, Sc. D., Professor, Corresponding
Member NASB
A.N. Skiba, Sc. D., Professor
Shen Riku (China), Sc. D., Professor
R. Esteban Romero (Spain), Sc. D., Professor

EDITORIAL OFFICE ADDRESS:
246019, Belarus, Gomel, Sovetskaya Str., 104,
Tel: +375 (232) 60-73-82
E-mail: vesti@gsu.by
Site: <http://vesti.gsu.by>

ИЗВЕСТИЯ

Гомельского государственного университета
имени Ф. Скорины

НАУЧНЫЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с 1999 г.
Выходит 6 раз в год

• 2015, № 6 (93) •

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ:
БИОЛОГИЯ • ТЕХНИКА (ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ;
РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ; ЭЛЕКТРОНИКА) • МАТЕМАТИКА • ФИЗИКА

СОДЕРЖАНИЕ

Биология

Абрамова И.В., Гайдук В.Е. Структура и динамика населения птиц в гнездовой период рыбхоза «Селец».....	5
Воробьев Е.А., Баранский А.Р. Синтаксономическая характеристика <i>Gagea spathacea</i> (Hayne) <i>Salisb</i> (Liliaceae) – нового вида для Украинского Полесья.....	12
Денисова Н.П., Гулаков А.В. Оценка зараженности описторхисами вида <i>Opisthorchis felineus</i> промежуточных хозяев, обитающих в водоемах различного типа на территории Гомельского района.....	19
Лазарева М.С., Каткова Е.Н. Степень зависимости сельских жителей от леса и лесных ресурсов.....	24
Саварин А.А., Молош А.Н. К экологии и видовой диагностике белозубок (<i>Crocidura, Soricidae</i>), обитающих на территории Белорусского Полесья.....	29
Соколов А.С. Ландшафтные закономерности размещения сельского населения и сельтебных ландшафтов Белорусского Полесья.....	34
Цветкова Е.А., Хрущева Л.В., Храмченкова О.М., Арастович Т.В., Дроздова Н.И. Биотехнология получения амилопектина.....	39
Чеховский А.Л. Определение критических зон радоноопасности по методу комплексного радонового показателя и картированию радонового риска.....	46

ИНФОРМАТИКА

Воруев А.В., Рагин В.И., Кучеров А.И., Левчук В.Д. Изменение подходов к безопасной загрузке операционных систем.....	53
Киргинцева С.В. Компьютерный анализ эффективности пакетного вертикального армирования грунтовых оснований плитных фундаментов.....	59
Кучеров А.И., Воруев А.В., Левчук В.Д. Инициализация начального состояния компьютера для реализации экспериментов по надежности узла локальной вычислительной сети.....	64
Хобня А.И. Архитектура инструментария имитационного моделирования сетей нового поколения.....	69

Чечет П.Л., Левчук В.Д., Воруев А.В. <i>Инициализация датчиков псевдослучайных чисел во встроенных устройствах</i>	75
МАТЕМАТИКА	
Бондарева Ю.Д. <i>Моделирование методом конечных элементов неоднородных систем деформируемых твёрдых тел</i>	80
Еремина А.Р. <i>Инвариантность стационарного распределения замкнутых сетей с многорежимными стратегиями обслуживания и разнотипными заявками</i>	87
Жогаль С.И., Жогаль С.П., Масловская М.А. <i>Исследование транспортных пассажиропотоков методами дисперсионного и регрессионного анализов</i>	92
Пыпка А.А., Турбай Н.А. <i>О GNA-подгруппах в локально конечных группах</i>	97
Селькин М.В., Бородич Р.В., Быков С.Н. <i>Об \mathfrak{S}-цокле в группах с операторами</i>	101
ФИЗИКА	
Андреев В.В., Дерюжкова О.М., Максименко Н.В. <i>Дипольные спиновые поляризуемости и гирации нуклона</i>	106
Гиргель С.С. <i>Децентрированные пучки Куммера-Гаусса</i>	112
Дей Е.А., Тюменков Г.Ю. <i>Кривые инверсии эффекта Джоуля-Томсона для обобщенного уравнения Ван-дер-Ваальса</i>	117
Кондратенко В.И. <i>Волноводная теория гирации</i>	121
Митюрин Г.С., Черненко Е.В., Машенко А.Г., Сердюков А.Н. <i>Термооптическая генерация звука в магнитоактивных сверхрешетках</i>	125
Пинчук В.Г., Короткевич С.В., Ковалев Е.А. <i>Кинетика граничного смазочного слоя и изнашивание поверхности металлов при фрикционном нагружении</i>	131
Хмыль А.А., Купо А.Н. <i>Формирование электрохимических покрытий в импульсном режиме электролиза с использованием лазерной активации</i>	137
КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ	
Каморников С.Ф. <i>О некоторых свойствах нильпотентных инъекторов</i>	144
Петренев Д.Р. <i>Реакции перитонеальных макрофагов крыс на продолжительное воздействие переменного магнитного поля низкой частоты 50 Гц</i>	147
Селькин В.М. <i>О решетке τ-замкнутых подформаций однопорозжденной формации</i> ...	150

PROCEEDINGS

of Francisk Scorina Gomel State University

SCIENTIFIC, PRODUCTION AND PRACTICAL JOURNAL

There are 6 times a year
Published since 1999

• 2015, № 6 (93) •

NATURAL SCIENCES:

BIOLOGY•TECHNIQUE (INFORMATION TECHNOLOGY;
RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATIONS; ELECTRONICS)

• MATHEMATICS • PHYSICS

CONTENTS

BIOLOGY

- I.V. Abramova, V.E. Gaiduk. *Structure and dynamics of the bird population in the nesting period of the fish farm «Selets»* 5
- E.A. Vorobiev, A.R. Baransky. *The first finds of *Gagea spathacea* (Hayne) Salisb (*Liliaceae*) in the Ukrainian Polessye and their syntaxonomical characteristics* 12
- N.P. Denisova, A.V. Gulakov. *Evaluation of the infestation of intermediate hosts, living in various types of water bodies on the territory of Gomel region, by *Opisthorchis felinus** 19
- M.S. Lazareva, E.N. Katkova. *The degree of dependence of rural population on forests and forest resources* 24
- A.A. Savarin, A.N. Molosh. *On the ecology and species diagnosis of white-toothed shrews (*Crocidura*, *Soricidae*), living on the territory of Belarusian Polessye* 29
- A.S. Sokolov. *Landscape patterns of distribution of the rural population and residential landscapes of the Belarusian Polessye* 34
- E.A. Tsvetkova, L.V. Khrushcheva, O.M. Hramchenkova, T.V. Arastovich, N.I. Drozdova. *Biotechnology of obtaining amylopectin* 39
- A.L. Chekhovsky. *Determination of critical areas of radon safety by the method of comprehensive radon index and mapping of radon risk* 46

INFORMATION TECHNOLOGY

- A.V. Voruyev, V.I. Ragin, A.I. Kucherov, V.D. Levchuk. *Changing of the approaches to safe loading of the operating systems* 53
- S.V. Kirgintseva. *Computer analysis of the efficiency of batch vertical reinforcement of soil bases for slab foundation* 59
- A.I. Kucherov, A.V. Voruyev, V.D. Levchuk. *Initialization of the initial state of the computer for the implementation of experiments on the reliability of the LAN node* 64
- A.I. Hobnya. *Architecture of tools for simulation of new generation networks* 69
- P.L. Chechet, V.D. Levchuk, A.V. Voruyev. *Initialization of pseudo-random numbers generators in embedded devices* 75

MATHEMATICS

- J.D. Bondareva. *Finite element modeling of inhomogeneous systems of deformable solids* 80
- A.R. Eryomina. *Invariance of the stationary distribution of closed queuing networks with Multimode Service Policy and heterogeneous applications* 87

S.I. Zhogal, S.P. Zhogal, M.A. Maslovskaya. <i>The investigation of transport passenger traffic by means of analysis of variance and regression analysis</i>	92
A.A. Pypka, N.A. Turbay. <i>On GNA-subgroups in locally finite groups</i>	97
M.V. Selkin, R.V. Borodich, S.N. Bykov. <i>On \mathfrak{S}-socle in groups with operators</i>	101
PHYSICS	
V.V. Andreev, O.M. Deryuzhkova, N.V. Maksimenko. <i>The dipole spin polarizability and the gyration of the nucleon</i>	106
S.S. Girgel. <i>Decentered Kummer-Gaussian beams</i>	112
E.A. Day, G.Y. Tyumenkov. <i>Curves inversions of Joule-Thomson effect for the generalized equation of Van-der-Waals</i>	117
V.I. Kondratenko. <i>The waveguide theory of gyration</i>	121
G.S. Mityurich, E.V. Chernenok, A.G. Mashchenko, A.N. Serdyukov. <i>Thermo-optical generation of sound in magnetoactive superlattices</i>	125
V.G. Pinchuk, S.V. Korotkevich, E.A. Kovalev. <i>Kinetics of the boundary lubricant layer and wear of metal surfaces in the frictional loading</i>	131
A.A. Khmyl, A.N. Kupo. <i>The formation of coatings in electrochemical pulsed mode electrolysis using laser activation</i>	137
ABSTRACTS	
S.F. Kamornikov. <i>On some properties of nilpotent injectors</i>	144
D.R. Petrenev. <i>Reactions peritoneal macrophages of rats on prolonged exposure to an alternating magnetic field of low frequency 50 Hz</i>	147
V.M. Selkin. <i>On the lattice of τ-closed subformations of one-generated formation</i>	150

БИОЛОГИЯ

УДК 598.2/9

Структура и динамика населения птиц в гнездовой период рыбхоза «Селец»

И.В. АБРАМОВА, В.Е. ГАЙДУК

Изучение водно-болотной орнитофауны рыбхоза «Селец» проводилось в апреле-августе 2004–2014 гг. Всего за период исследований выявлено 45 видов водно-болотных птиц (non Passeriformes) общей численностью более 25 тыс. особей. 40 % видов, обнаруженных в рыбхозе «Селец», внесены в Красную книгу Республики Беларусь (2015). Многие виды имеют европейский охранный статус (SPEC). В работе приводятся данные по таксономической, эколого-морфологической и трофической структуре орнитофауны. Оценена плотность отдельных видов.

Ключевые слова: рыбхоз «Селец», водоплавающие птицы, численность, Красная книга Беларуси, Европейский Статус Охраны (SPEC), таксономическая, трофическая и эколого-морфологическая структура.

Study of wetland avifauna of the fish farm «Selets» was conducted in April-August, 2004–2014. It was identified 45 species of water birds (non Passeriformes) during the period of studies, a total of more than 25 thousand species. 40 % of bird species are listed in National Red-data book (2015). Many have European protection status (SPEC). The paper contains taxonomy, the data on ecological and morphological as well as trophic structure of ornitofauna.

Keywords: fish farm Selets, waterfowls, number, Red data book of Belarus (2004), European Status of Preservation (SPEC), taxonomy, trophic, ecologo-morphological structure, ornitofauna.

Введение. Пруды рыбхозов играют большую роль для устойчивого существования популяций водно-болотных птиц в период размножения. Наличие хороших условий для гнездования, относительная безлюдность и богатая кормовая база прудов обуславливают высокую плотность и видовое разнообразие водно-болотных птиц.

В последние годы на рыбхозах Беларуси (в том числе и рыбхозе «Селец») значительно интенсифицировалась хозяйственная деятельность с целью повышения рыбопродуктивности, что повлекло за собой изменения в структуре местообитаний. В рыбхозе «Селец» интенсивно проводится очистка прудов от надводных растений, что привело к снижению степени зарастания прудов, которая варьирует от 0 до 52 % площади зеркала воды. В рыбхозе «Селец» проводятся мероприятия системы охраны прудов рыбхоза: патрулирование, отстрел рыбоядных птиц и др. Это привело к снижению численности многих гнездящихся водно-болотных птиц и уменьшению видового разнообразия орнитокомплекса. Больше всего пострадали редкие и охраняемые виды, жизнь которых напрямую связана со степенью развития прибрежной растительности (большая и малая выпя, серощекая поганка и др.). Это было отмечено в рыбхозах «Новоселки» и «Локтыши».

Анализ литературных источников [1], [2] и опубликованные материалы авторов статьи [3]–[10] показали, что в связи с осушением Полесья пруды рыбхозов, являются важными воспроизводственными центрами, местами отдыха и восстановления сил во время миграций для большого числа водно-болотных птиц, среди которых зарегистрированы виды, имеющие национальный и европейский статусы охраны.

Материал и методы. Рыбхоз «Селец» расположен в Березовском районе Брестской области. Координаты: 52°58' с.ш. и 24°91' в.д. Общая площадь прудов, включая водохранилище с одноименным названием, составляет около 20 тыс. га. Собственно рыбхоз состоит из комплекса прудов (около 200 шт., 2,5 тыс. га). Водохранилище и пруды рыбхоза построены на месте болот в пойме р. Ясельда. На водохранилище имеется ряд больших островов. На прудах рыбхоза сложились благоприятные условия для гнездования водоплавающих птиц,

благодаря подкормке рыб и их высокой плотности, наличию дамб, поросших кустарниками и деревьями (береза, ольха и др.). Рыбхоз «Селец» входит в состав одноименной ТВП международного значения, которая была создана в 1998 г.

Изучение размножения птиц проводили в апреле–августе 2004–2014 гг. Всего было проведено 10 полных учетов, в некоторые годы учеты проводились нерегулярно и не на всей территории рыбхоза. В этой работе рассматриваются только птицы собственно рыбхоза, без учета птиц водохранилища и прилегающего лесного массива. Птицы, пролетающие транзитом над прудами, не учитывались. При учетах маршрут не был строго фиксирован и составлялся таким образом, чтобы охватить всю территорию рыбхоза. Птицы регистрировались на полной дальности обнаружения. Наблюдение птиц производилось с помощью бинокля (10×50), зрительной трубы (22×60), определение – с помощью определителя птиц [11], аудиозаписей голосов водно-болотных птиц.

Абсолютные учеты птиц проводились преимущественно в утренние часы комбинированным методом, сочетающим в себе маршрутные и точечные наблюдения, с использованием оптики. Маршруты располагались таким образом, что пруды осматривались по периметру. Абсолютному учету способствовало небольшое зарастание прудов надводной растительностью, наличие дамб. Во время учетов по каждому пруду в отдельности фиксировали его наполненность, численность видов и по возможности, половой и возрастной состав. Кроме типичных водно-болотных птиц, представленных отрядами *Podicipediformes*, *Ciconiiformes*, *Gaviiformes*, *Gruiformes*, *Anseriformes*, *Pelekaniformes*, *Charadriiformes*, к группе водно-болотных птиц нами были отнесены такие виды, как орлан-белохвост, скопа, болотный лунь и зимородок, по своей экологии тесно связанные с водными объектами. Не учитывались представители *Passeriformes*. Водно-болотные птицы подразделялись на эколого-морфологические группы [12], [13]: 1) водоплавающие; 2) птицы лугов; 3) птицы, охотящиеся с лету; 4) птицы прибрежных зарослей. Отметим, что нами к группе водоплавающих отнесены представители отряда гусеобразные. При распределении видов по различным трофическим группам использовалась известная классификация [14]. В дополнение к ней, основываясь на данных по питанию, мы выделили еще одну трофическую группу – гидрзоофаги. В эту группу вошли: серошекая, черношейная и малая поганки, луток.

При статистической обработке полученных данных применялись общепринятые методы. При описании численности и распределения видов по биотопам использовалась балльная шкала численностей и доминирования, предложенная А.П. Кузякиным [15]: доминантный (многочисленный) вид – составляющий более 10% от суммарного обилия, обычный – от 1 до 9 %, редкий – менее 1 %, фоновый – более 1 ос./км².

Учитывая, что за период исследований пруды имели различную степень обводненности, плотность птиц рассчитывалась на общую площадь, без учета степени заполненности прудов.

Результаты и их обсуждение. На территории рыбхоза (таблица 1) зарегистрировано 45 видов водно-болотных птиц восьми отрядов, в том числе 23 (51,1 %) вида гнездятся, для 6 видов (13,3%) гнездование вероятно в окрестностях рыбхоза, для 5 (11,1 %) видов гнездование вероятно; кочующие или мигрирующие виды составляют 8,9 %. 15,6 % видов (черношейная поганка, лебедь-кликун, серый журавль и др.) отмечены вне гнездового биотопа или находились в гнездовой период на местах кормежки.

Для некоторых видов характерно присутствие значительного количества неразмножающихся особей. Например, в 2009 и 2010 гг. к гнездованию приступили около 70 пар лысухи, неразмножающиеся особи данного вида держались в стаях от 10 до 80 птиц. Наличие холостующих птиц, по-видимому, объясняется отсутствием пригодных к гнездованию местообитаний вследствие интенсификации хозяйственной деятельности человека. Такое явление было зарегистрировано на других рыбхозах. В 2008 г. на рыбхозе «Новоселки» к гнездованию приступили лишь 27 % пар лысухи [6] по причине значительного сокращения площади надводных макрофитов, что ухудшило условия гнездования лысух. На рыбхозе «Селец» часть особей большой белой цапли, лебедя-шипуна и др. видов не участвуют в размножении, так как у них половая зрелость наступает на 2–4 году жизни, в течение лета они ведут кочевой образ жизни.

Таблица 1 – Встречаемость (F, %), участие (L, %), плотность (P, ос./км²), биомасса (B, кг/км²), характер пребывания (E) и размножение водно-болотных птиц рыбхоза «Селец»

Вид ¹	F	L	P	B	E ²	Гнездование	
						n (пар)	P (пар/км ²)
<i>Podiceps griseigena</i> *	40,0	0,2	0,28	0,17	1	6–10	0,2–0,4
<i>Tachybaptus ruficollis</i>	30,0	0,4	0,56	0,10	1	8–16	0,3–0,6
<i>Podiceps nigricollis</i>	30,0	0,2	0,32	0,08	5	–	–
<i>Podiceps cristatus</i>	100,0	2,8	4,40	4,82	1	75–110	3,0–4,4
<i>Phalacrocorax carbo</i>	80,0	3,5	5,60	12,75	5	–	–
<i>Botaurus stellaris</i> *	60,0	0,5	0,76	1,00	1	10–15	0,4–0,8
<i>Ixobrychus minutus</i> *	30,0	0,1	0,12	0,02	3	–	–
<i>Egretta alba</i> *	70,0	2,1	3,28	2,98	1	6–12	0,2–0,4
<i>Ardea cinerea</i>	100	3,3	5,20	7,39	5	–	–
<i>Ciconia nigra</i> *	50,0	0,4	0,64	1,92	2	–	–
<i>Cygnus olor</i> *	100	2,5	3,92	41,16	1	6–10	0,2–0,4
<i>Cygnus cygnus</i> *	20,0	0,1	0,08	0,57	5	–	–
<i>Anser anser</i>	40,0	1,7	2,72	9,79	1	7–14	0,3–0,6
<i>Anas strepera</i> *	80,0	1,7	2,64	2,28	1	25–40	1,0–1,6
<i>Anas crecca</i>	70,0	1,6	2,56	0,89	1	20–40	0,8–1,6
<i>Anas platyrhynchos</i>	100	17,4	27,60	35,33	1	280–520	1,2–20,8
<i>Anas querquedula</i> *	70,0	1,2	1,84	0,74	1	18–30	0,7–1,2
<i>Anas clypeata</i>	40,0	0,5	0,72	0,51	3	3–10	0,1–0,4
<i>Aythya ferina</i>	100	10,4	16,40	14,66	1	150–220	6,0–9,6
<i>Aythya nyroca</i> *	20,0	0,2	0,24	0,13	3	2–4	0,1–0,2
<i>Aythya fuligula</i>	90,0	5,3	8,40	6,13	1	80–125	3,2–5,0
<i>Bucephala clangula</i> *	60,0	0,3	0,48	0,35	2	–	–
<i>Pandion haliaetus</i> *	20,0	0,1	0,16	0,27	2	–	–
<i>Haliaetus albicilla</i> *	40,0	0,1	0,16	0,65	2	–	–
<i>Circus aeruginosus</i>	80,0	0,6	0,88	0,54	1	4–7	0,2–0,3
<i>Rallus aquaticus</i>	40,0	0,1	0,20	0,03	3	–	–
<i>Porzana porzana</i>	20,0	0,2	0,28	0,02	5	–	–
<i>Porzana parva</i> *	30,0	0,2	0,24	0,01	3	–	–
<i>Gallinula chloropus</i>	70,0	0,2	0,32	0,09	1	5–10	0,2–0,4
<i>Fulica atra</i>	100	24,3	38,40	34,56	1	215–340	8,6–13,6
<i>Grus grus</i> *	40,0	0,2	0,24	1,31	5	–	–
<i>Charadrius dubius</i>	80,0	0,4	0,56	0,02	1	8–10	0,3–0,4
<i>Gallinago gallinago</i>	50,0	0,2	0,32	0,03	1	3–8	0,1–0,3
<i>Tringa totanus</i>	40,0	0,3	0,40	0,05	2	3–6	0,12–0,24
<i>Tringa glareola</i>	40,0	0,2	0,36	0,02	4	–	–
<i>Tringa ochropus</i>	30,0	0,1	0,20	0,03	2	–	–
<i>Larus ridibundus</i>	100	9,6	15,2	4,86	1	110–250	4,4–10,0
<i>Larus canus</i> *	50,0	1,8	2,80	1,26	4	–	–
<i>Larus argentatus/cachinnans</i> *	90,0	1,1	1,72	2,41	4	–	–
<i>Sterna hirundo</i>	90,0	2,0	3,20	0,40	1	30–54	1,2–2,0
<i>Chlidonias hybridus</i>	40,0	0,6	0,88	0,07	1	4–10	0,2–0,4
<i>Chlidonias niger</i> *	60,0	0,6	1,00	0,06	5	8–16	0,3–0,6
<i>Chlidonias leucopterus</i>	70,0	1,0	1,60	0,10	1	18–30	0,7–1,2
<i>Alcedo atthis</i> *	60,0	0,3	0,40	0,01	1	3–8	0,1–0,3

Примечание: 1) * – виды, включенные в Красную книгу РБ; 2) E (характер пребывания птиц): 1 – гнездящиеся; 2 – гнездование предположительно в окрестностях рыбхоза; 3 – гнездование вероятно; 4 – кочующие или мигрирующие; 5 – вид наблюдался в гнездовой период.

При проведении учетов максимальная встречаемость (100 %) во все годы наблюдается у следующих видов: большая поганка, серая цапля, лебедь-шипун, кряква, красноголовый нырок, озерная чайка и лысуха. У 12 видов (серошекая поганка, черный аист, серый журавль и др.) встречаемость составила 40–50 %. У ряда видов (черношейная поганка, малая выпь, скопа и др.) она равнялась 30 % и менее.

Летний орнитокомплекс рыбхоза довольно разнообразен в систематическом отношении, при этом доля участия разных таксономических групп весьма неравнозначна. Доминирующими отрядами по видовому разнообразию являются гусеобразные (26,7 %) и ржанкообразные (28,9 %), на их долю приходится более половины всех видов (таблица 2). По численности особей доминируют гусеобразные (42,7 %), журавлеобразные (25,1 %), и ржанкообразные (17,8 %), по биомассе – гусеобразные (59,1 %), журавлеобразные (18,9 %). Такие же особенности таксономической структуры орнитокомплексов отмечены во всех исследованных рыбхозах [5], [6], [8], [9]: по количеству видов преобладают ржанкообразные и гусеобразные; по населению и биомассе – гусеобразные и журавлеобразные.

Таблица 2 – Таксономическая структура летнего населения водно-болотных птиц рыбхоза «Селец» (по средним данным за один учет)

Отряды	Доля видов отряда, %			Средняя биомасса на 1 км ²
	От общего кол-ва видов	От общего обилия	От общей биомассы	
<i>Podicipediformes</i>	8,9	3,5	2,7	5,0
<i>Pelicaniformes</i>	2,2	3,5	6,7	12,7
<i>Ciconiiformes</i>	11,1	6,3	7,0	9,3
<i>Anseriformes</i>	26,7	42,7	59,1	12,2
<i>Falconiformes</i>	6,7	0,8	0,8	1,5
<i>Gruiformes</i>	13,3	25,1	18,9	36,0
<i>Charadriiformes</i>	28,9	17,8	4,9	8,2
<i>Coraciiformes</i>	2,2	0,3	0,0	0,0

Наиболее многочисленными видами являются кряква (17,4 %) и лысуха (24,3 %) (таблица 1). К обычным видам относятся большая поганка, большой баклан, серая цапля, серый гусь и др. (всего пятнадцать видов). Редкими являются 26 видов: большая и малая выпь, черный аист, белоглазый нырок, скопа, серый журавль и др. Многие из них включены в Красную книгу РБ [16].

По происхождению фауна птиц рыбхоза неоднородна. В ее состав входят представители 7 типов фауны (таблица 3).

Таблица 3 – Фаунистический состав летнего орнитокомплекса рыбхоза

Отряд	Кол-во видов	Тип фауны* по:[17]						
		Е	ТМ	Н	К	Р	SS	N
<i>Podicipediformes</i>	4			1			3	
<i>Pelicaniformes</i>	1						1	
<i>Ciconiiformes</i>	5					5		
<i>Anseriformes</i>	12		1	5		6		
<i>Falconiformes</i>	3				1	2		
<i>Gruiformes</i>	6	1			1	3		
<i>Charadriiformes</i>	13			3		7	1	2
<i>Coraciiformes</i>	1						1	
Всего	45	1	1	9	2	23	6	2

Примечание: * – обозначение принадлежности к типам фауны: Е – европейский; ТМ – туркестано-средиземноморский; Н – голарктический; Р – палеарктический; SS – афро-евразийский; К – космополитный; N – неарктический.

Наибольшую долю составляют представители палеарктического типа фауны (51,1 %). Доля голарктических видов составляет 20,0 %, несколько меньше в составе фауны птиц афро-евразийского происхождения (13,5 %). 4 типа фауны представлены 1–2 видами.

На структуру населения птиц в гнездовой период оказывает влияние хозяйственная деятельность человека: колебание уровня воды в результате спуска – напуска прудов, вылов рыбы и ее подкормка, регулирование степени зарастания прудов и др. Разные виды птиц специфически реагируют на эти факторы, их реакция зависит от особенностей экологии,

морфологии и питания птиц. В связи с этим для анализа и установления общих закономерностей водно-болотные птицы были подразделены на таксономические, трофические и эколого-морфологические группы.

Наибольшая плотность населения в период гнездования характерна для водоплавающих птиц (таблица 1), среди которых доминируют кряквы (280–520 пар) и лысуха (215–340 пар). Плотность населения кряквы на гнездовании составляла 11,2–20,8 пар/км², биомасса в среднем 35,3 кг/км² (таблица 1). Несколько ниже эти показатели у лысухи (соответственно, 8,6–13,6 пар/км² и 34,5 кг/км²). Доминирование этих видов в гнездовой период установлено для рыбхоза «Локтыши». По данным пяти учетов, проведенных в 2003, 2008 и 2009 гг., плотность кряквы составила 15,2 пар/км², лысухи – 9,1 пар/км² [5]. В рыбхозе «Новоселки» численность доминирующих видов в 2002–2008 гг. была несколько выше: кряквы – 17,1–36,9 пар/км², лысухи – 18,2 пар/км² [6].

Многочисленными в рыбхозе «Селец» являются красноголовый нырок (6,0–9,6 пар/км²), озерная чайка (4,4–10,0 пар/км²), большая поганка (3,0–4,4 пар/км²) и хохлатая черныш (3,2–5,0 пар/км²). У многих видов (большая выпь, серый гусь, камышница, обыкновенный гоголь и др.) количество гнездящихся пар не превышало 15, плотность населения была равна не более 1,0 пар/км² (таблица 1).

Доминирующей эколого-морфологической группой по количеству видов (42,2 %), численности (74,2 %) и биомассе (86,6 %) являются водоплавающие птицы. Это характерно для орнитокомплексов прудов «Домачево», рыбхозов «Новоселки» и «Локтыши» [5], [6], [10]. Затем идут охотящиеся с лету птицы, доля этой группы в видовом составе 26,7 %, в населении – 17,7 %. Наименьшим количеством видов (6) представлена группа птиц тростниковых зарослей, последнюю позицию они занимают по доле в населении птиц – 1,3 % и в суммарной биомассе – 0,8 %.

В трофической структуре по видовому многообразию среди водно-болотных птиц преобладают энтомофаги (31,1 %) и ихтиофаги (22,2 %). Меньше всего хищников, на их долю приходится 4,4 %. По населению и биомассе доминируют бентофаги – 34,9 % и 31,3 % и фитофаги соответственно 17,8 и 23,2 %. Средняя биомасса этих групп равна – 31,3 и 46,5 кг/км². На долю хищников приходится 0,6 % населения и 1,2 % биомассы.

В трофической структуре летнего комплекса водно-болотных птиц (таблица 4) по количеству видов преобладают энтомофаги (28,9 % общего количества видов), ихтиофаги (22,2 %), фитофаги (17,8 %). Наименьшим количеством видов (2) представлены хищные птицы. По численности особей преобладают бентофаги (составляют 35,1 % суммарного обилия) и фитофаги (26,6 %). Участие в населении ихтиофагов (15,0 %) и полифагов (12,5 %) несколько ниже. На долю энтомофагов в среднем приходится менее 5 % от населения птиц рыбхоза, на долю хищных – менее 1 %. Таким образом, наибольшая диспропорция по соотношению числа видов к числу особей отмечена у энтомофагов и бентофагов: энтомофаги характеризуются высоким видовым разнообразием, но невысокой численностью, у бентофагов наблюдается обратное соотношение. По биомассе на рыбхозе «Селец» доминируют фитофаги (47,9 % от общей биомассы), затем идут бентофаги (26,1 %) и ихтиофаги (16,6 %). Значительно им уступают полифаги и гидрзоофаги. На долю энтомофагов и хищных птиц в сумме приходится менее 2 % от общей биомассы. На рыбхозах «Локтыши» [5] и «Новоселки» [6] в трофической структуре по биомассе также преобладают фитофаги, бентофаги и ихтиофаги.

Таблица 4 – Трофическая структура летнего орнитокомплекса рыбхоза

Группа	Кол-во видов		Плотность населения		Биомасса	
		%	ос./км ²	%	кг/км ²	%
Ихтиофаги	10	22,2	23,76	15,0	31,56	16,6
Фитофаги	8	17,8	42,08	26,6	91,27	47,9
Энтомофаги	13	28,9	6,6	4,2	1,84	1,0
Полифаги	4	8,9	19,72	12,5	8,53	4,5
Хищники	2	4,4	1,04	0,7	1,19	0,6
Гидрзоофаги	4	8,9	9,56	6,0	6,48	3,4
Бентофаги	4	8,9	55,52	35,1	49,7	26,1
Всего	45	100	158,28	100	190,57	100

На фоне роста основных производственных показателей численность гнездящихся водно-болотных птиц сокращается. Такой тренд будет сохраняться и в ближайшие годы. Этому будут способствовать мероприятия по охране прудов рыбхоза от рыбацких птиц и браконьеров (патрулирование, отпугивание, отстрел большого баклана и серой цапли и т. д.).

Выводы. В ходе проведенных исследований на рыбхозе «Селец» (2004–2014 гг.) были изучены видовой состав орнитокомплекса, биотопическое распределение, численность, биомасса, эколого-морфологическая и трофическая структура водно-болотных птиц в период гнездования.

1. За период исследований было выявлено 45 видов водно-болотных птиц восьми отрядов общей численностью более 25 000 особей.

2. Для 23 видов (51,1 % общего количества) гнездование установлено, для 6 (13,3 %) – гнездование вероятно в окрестностях рыбхоза, для 5 (11,1 %) – вероятно. Кочующие или мигрирующие птицы составляют 8,9 %, 15,6 % видов отмечены летом вне гнездового биотопа или в местах кормежки.

3. В таксономической структуре наибольший вес имеет отряд ржанкообразные (13 видов, 28,9 %), затем следует отряд гусеобразные (12 видов, 26,7 %). По численности птиц доминируют отряды гусеобразные, ржанкообразные и журавлеобразные. По биомассе абсолютно доминирует отряд гусеобразные (около 60 %).

4. В состав орнитокомплекса входят представители 7 типов фауны, более половины видов – представители палеарктического типа фауны.

5. Трофическая структура орнитокомплекса довольно стабильна. По количеству видов преобладают энтомофаги (28,9 % общего количества видов), ихтиофаги (22,2 %), фитофаги (17,8 %); по численности – бентофаги (составляют 35,1 % суммарного обилия) и фитофаги (26,6 %); по биомассе – фитофаги (47,9 % от общей биомассы), затем идут бентофаги (26,1 %) и ихтиофаги (16,6 %).

6. Доминирующей эколого-морфологической группой как по видовому составу, населению и биомассе являются водоплавающие птицы.

7. Рыбхоз имеет высокую значимость для сохранения биоразнообразия в регионе, что подтверждается количеством зарегистрированных охраняемых видов птиц. Из 45 учтенных видов 11 занесены в Красную книгу Беларуси (2015) с присвоением категории охраны (I–IV), 7 видов включены в список видов, требующих профилактической охраны.

Литература

1. Федюшин, А.В. Птицы Белоруссии / А.В. Федюшин, М.С. Долбик. – Минск : Наука и техника, 1967. – 519 с.
2. Скарбы прыроды Беларусі / А.В. Казулін [і інш.]. – Мінск : Беларусь, 2002. – 160 с.
3. Гайдук, В.Е. Биоразнообразие и мониторинг водно-болотных птиц ленточных экосистем юго-западной Беларуси / В.Е. Гайдук [и др.] // Биомониторинг природных и трансформированных экосистем : мат. Межд. научно-практ. конф. 15–16 октября 2008 г. – Брест : БрГУ, 2008. – С. 27–31.
4. Гайдук, В.Е. Экология птиц юго-запада Беларуси. Неворобьинообразные / В.Е. Гайдук, И.В. Абрамова. – Брест : БрГУ, 2009. – 300 с.
5. Абрамчук, С.В. Структура и динамика населения птиц рыбхоза «Локтыши» / С.В. Абрамчук, В.Е. Гайдук // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Сер. прыродазнучых навук. – 2010. – № 2. – С. 26–32.
6. Абрамчук, С.В. Экология водно-болотной орнитофауны рыбхоза «Новоселки» / С.В. Абрамчук, В.Е. Гайдук // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Сер. прыродазнучых навук. – 2009. – № 2 (33). – С. 68–72.
7. Гайдук, В.Е. Сезонные и годовые изменения водно-болотных птиц рыбхоза и водохранилища «Селец» / В.Е. Гайдук, И.В. Абрамова, Р.А. Ольгомец // Биологические ритмы : сб. мат. Межд. научно-практ. конф. 11–12 октября 2012 г., Брест ; редкол. : В.Е. Гайдук (гл. ред.) [и др.]. – Брест : БрГУ, 2012. – С. 60–64.
8. Абрамова, И.В. Структура и динамика населения птиц экосистем юго-запада Беларуси / И.В. Абрамова. – Брест : БрГУ, 2007. – 208 с.

9. Абрамова, И.В. Структура и динамика населения птиц в гнездовой период рыбхоза «Страдочь» / И.В. Абрамова, В.Е. Гайдук, С.И. Вальчук // Известия Гомельского госуниверситета. Естественные науки. – 2013. – № 5 (80). – С. 3–9.
10. Абрамова, И.В. Структура и динамика населения птиц прудов «Домачево» в гнездовой период / А.В. Абрамова, В.Е. Гайдук // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Сер. 5. – 2014. – № 1. – С. 10–17.
11. Птушки Еўропы / пад рэд. М.Е. Нікіфарава. – Варшава : Навук. выдавецтва ПВН, 2000. – 540 с.
12. Dobrowolski, K.A. Structure of the occurrence of waterfowl types and morpho-ecological forms / K.A. Dobrowolski // Ekol. Pol. – 1969. – A 17. – S. 29–72.
13. Jakubiec, Z. Zroznicowanie morfologiczno-ekologiczne ptakow wodno-blotnych / Z. Jakubiec // Wiad. Ekol. – 1978. – 24. – S. 99–107.
14. Dombrowski, A. Zgrupowania ptakow wodno-blotnych na stawach rybnych niziny Mazowieckiej w okresie polegowych koczowan / A. Dombrowski [i in.] // Kulon 8. – 2003. – 1. – S. 47–62.
15. Кузякин, А.П. Зоогеография СССР / А.П. Кузякин // Учен. зап. Моск. обл. пед. ин-та им. Н.К. Крупской. – М., 1962. – Т. 109. – С. 3–182.
16. Красная книга Республики Беларусь. Животные / ред. кол. И.М. Качановский [и др.]. – Минск : Беларуская Энцыклапедыя імя Петруся Броўкі, 2015. – 320 с.
17. Voous, K.H. Die Vogelwelt Europas und ihre Verbreitung : ein tiergeographischer Atlas über die Lebensweise aller in Europa brütenden Vögel / K.H. Voous. – Hamburg, 1962. – 284 s.

Брестский государственный
университет им. А.С. Пушкина

Поступила в редакцию 22.09.2015

УДК 582.572.8: 581.95(477.82)

Синтаксономическая характеристика *Gagea spathacea* (Hayne) Salisb (Liliaceae) – нового вида для Украинского Полесья

Е.А. ВОРОБЬЕВ, А.Р. БАРАНСКИЙ

Впервые для Украинского Полесья приводится субатлантико-центральноевропейский весенний эфемероид *Gagea spathacea*. Вид произрастает в гигрофильных лесах союза Alno-Ulmion преимущественно в поймах малых рек. Сообщества с его участием отнесены к ассоциациям Fraxino-Alnetum и Impatienti noli-tangeri-Quercetum roboris ass. nova.

Ключевые слова: *Gagea spathacea*, Украинское Полесье, первые находки, синтаксономия, Alno-Ulmion, новая ассоциация.

For the first time the rare Subatlantic-Central European spring ephemeroïd species *Gagea spathacea* for the territory of Ukrainian Polessye are given. Species grows in the forests of hygrophilous alliance Alno-Ulmion mostly in the floodplains of small rivers. Communities with its participation are allocated to associations Fraxino-Alnetum and Impatienti noli-tangeri-Quercetum roboris ass. nova.

Keywords: *Gagea spathacea*, Ukrainian Polessye, new location, syntaxonomy, Alno-Ulmion, new association.

Введение. Гусиный лук покрывальцевый – *Gagea spathacea* (Hayne) Salisb. (Liliaceae) – реликтовый весенний эфемероид, находящийся на территории Беларуси и Украины в удаленных островных локалитетах далеко за пределами восточной границы сплошного распространения. Вид внесен в Красную книгу Беларуси, как находящийся на грани исчезновения [1]; Польши, где входит в Красный список растений и грибов [2], и безусловно, заслуживает внесения в новое издание Красной книги Украины.

Весенний эфемероид, широколиственно-лесной гигрофит *Gagea spathacea* распространён в северной и средней части Германии, южной части Швеции и Дании, северо-восточной части Нидерландов, средней части Бельгии. В островной части ареала вид очень редко встречается в других странах Центральной и частично, Восточной Европы [3]. На восточной границе ареала единичные местонахождения вида известны в Латвии и в Российской Федерации (последнее местонахождение сомнительно) [4]. В Беларуси вид известен на территории Гомельского Полесья в окрестности с. Грабовка (Гомельский район) и Мозырского Полесья в окрестностях сс. Скрыгалово и Борисковичи (Мозырский р-н Гомельской области) [1]. В Украине ранее были известны местонахождения вида только в Карпатах и прилегающих областях [5]. Во время полевых исследований в 2014–2015 гг. нами обнаружены новые местонахождения *Gagea spathacea* в Житомирском и Киевском Полесье, которые расположены на значительном расстоянии от известных западноукраинских и белорусских местонахождений вида.

Материалы и методика исследований. В работе было использовано 5 геоботанических описаний с участием *Gagea spathacea*, а также 10 геоботанических описаний гигрофильных лесов Житомирского Полесья. Кроме того, 45 описаний использованы для подсчёта классов постоянства видов.

Описания проводились согласно методики школы Браун-Бланке [6]. Размер площадок составлял около 25×25 м или в природных границах фитоценозов. Описания обрабатывались с помощью пакета программ «FICEN 2» [7] с последующей ручной доработкой на компьютере методом фитоценологических таблиц. Баллы обилия видов в таблицах отвечают следующим значениям проективного покрытия: + – < 1 %, 1 – 1–5 %, 2 – 6–15 %, 3 – 16–25 %, 4 – 26–50 %, 5 – 51–100 %. Баллы постоянства обозначают: + – < 10 %, I – 10–20 %, II – 21–40 %, III – 41–60 %, IV – 61–80 %, V – 81–100 %. После названий видов деревьев и кустарников показана ярусность: а – верхний древесный подъярус; b – нижний древесный подъярус; с – ярус кустарников и подроста; d – древесные растения в пределах травяного яруса.

Результаты и обсуждение. Впервые *Gagea spathacea* на территории Украинского Полесья был обнаружен 8 апреля 2014 г. в западных окрестностях г. Житомир в квартале 62 Богдановского л-ва (Житомирский ГЛХ) на 200 м на запад от села Довжик севернее автотрассы Житомир – Новоград-Волинский, на окраине значительного лесного массива.

Ценопопуляция вида найдена среди старого дубово-ольхово-осинового леса (диаметр дуба до 0,7 м, осины и ольхи – 0,3–0,35 м) в несколько вытянутом неглубоком понижении – вымочке со сглаженными краями размером около 1 × 3 м, которое, вероятно, образовалось несколько десятилетий назад вследствие ветровала старого дерева (на участке имеется и свежий вывал осины). Понижение было переувлажнено, но без выхода воды на поверхность. Из вегетирующих растений в вымочке в то время отмечена только *G. spathacea* с проективным покрытием около 5 %. Преобладающая часть растений вида не достигала генеративного возраста (их количество составляло более сотни), в цветущем состоянии было всего 4 особи. Из других ранневесенних видов в лесном сообществе довольно обильно цвела *Anemone nemorosa*.

Адекватная синтаксономическая интерпретация этого описания по данным литературы неоднозначна, однако имеющиеся у нас 30 описаний подобных лесов из Житомирского Полесья позволяют описать новую ассоциацию (таблица 1).

Таблица 1 – Описания лесных сообществ с участием *Gagea spathacea* в Украинском Полесье и тип новой ассоциации *Impatienti noli-tangeri-Quercetum roboris*

Номер описания	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Высота древостоя, м	27	19	23	25	23	17	22	22	18	23	20
Сомкнутость древостоя	07	09	08	08	08	09	06	07	09	09	09
Высота кустарникового яруса и подроста, м	5	7	7	4	7	7	7	6	7	5	3
Сомкнутость кустарникового яруса и подроста	06	07	07	04	08	05	07	08	03	03	03
Проективное покрытие травянистого яруса, %	50	80	75	60	30	30	80	80	40	35	90
Проективное покрытие мохового яруса, %	–	–	–	5	–	+	–	–	–	–	2

D.s. Var. *Alnus glutinosa*

<i>Alnus glutinosa</i> ab	3	5	3	.	.	.	.	1	.	.	.
<i>Alnus glutinosa</i> c	.	2	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Betula pendula</i> a	.	1	2	.	.	.	.	1	.	.	.
<i>Carex brizoides</i>	4	5	5	.	.	1	.	.	1	+	.

D.s. Var. *Ajuga reptans*

<i>Ajuga reptans</i>	1	.	.	1	+	+	+	+	.	.	.
<i>Adoxa moschatellina</i>	.	.	+	1	+	1	1	+	.	.	.
<i>Viola canina</i>	+	.	.	.	+	1	1	+	.	.	.
<i>Sanicula europaea</i>	.	.	.	.	+	.	1	.	.	.	.
<i>Crataegus</i> sp.	.	.	.	.	+	.	.	1	.	.	.

D.s. Var. *Pinus sylvestris*

<i>Pinus sylvestris</i> a	.	.	.	1	.	.	.	.	5	4	4
<i>Oxalis acetosella</i>	1	.	.	.	.	.	.	.	.	3	3
<i>Rubus saxatilis</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+	+

D.s. Subass. I-Q. *typicum*

<i>Viburnum opulus</i> cd	+	.	+	+	+	.	.	.	+	.	.
<i>Euonimus verrucosa</i> cd	+	.	.	.	.	1	.	.	.	+	+
<i>Majanthemum bifolium</i>	+	1	+	1	1	.	+	+	1	2	1
<i>Galeopsis speciosa</i>	.	+	.	.	1	+	+	.	1	1	1
<i>Polygonatum multiflorum</i>	+	+	+	.	1	.	1	1	+	+	.
<i>Moechringia trinervia</i>	.	.	+	.	.	+	.	+	.	+	+
<i>Lysimachia vulgaris</i>	+	+	+	.	.	+	.	.	1	+	.
<i>Deschampsia caespitosa</i>	1	+	.	1	.	.	.	.	1	+	.
<i>Lathyrus vernus</i>	.	.	.	+	+	.	.	+	1	.	.
<i>Convallaria majalis</i>	.	.	.	1	1	+	.	.	1	.	1
<i>Geranium robertianum</i>	+	.	.	.	+	.	1	+	1	+	.
<i>Lilium martagon</i>	.	.	.	.	1	.	.	.	+	.	.

Окончание таблицы 1

<i>Galeobdolon luteum</i>	+	.	.	.	.	.	.	.	+	.
<i>Pulmonaria obscura</i>	.	.	+	.	.	.	+	.	.	.
<i>Dryopteris filix-mas</i>	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.
<i>Polygonatum odoratum</i>	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Ranunculus cassubicus</i>	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Cruciata glabra</i>	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.
<i>Galium intermedium</i>	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.
<i>Gymnocarpium dryopteris</i>	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.
<i>Brachipodium sylvaticum</i>	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.
<i>Fragaria vesca</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.
<i>Melica nutans</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1
<i>Pteridium aquilinum</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1
<i>Mycelis muralis</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1

D.s. Cl. Vaccinio-Piceetea

<i>Picea abies b</i>	.	.	.	3	.	5	.	.	.	.
<i>Picea abies cd</i>	.	1	.	.	.	3	.	.	+	.
<i>Betula pubescens</i>	.	.	.	4	.	.	.	.	.	.
<i>Sorbus aucuparia c</i>	+	.	+	1	.	.	.	.	1	2
<i>Sorbus aucuparia d</i>	+	.	.	.	.	.	.	1	.	+
<i>Frangula alnus cd</i>	+	.	.	1	.	.	.	.	.	2
<i>Rubus nessensis</i>	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.
<i>Veronica officinalis</i>	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.
<i>Luzula pilosa</i>	+	.	.	.	.	.	.	.	+	.
<i>Trientalis europaea</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1
<i>Vaccinium myrtillus</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+

Другие виды

<i>Impatiens parviflora</i>	+	.	.	.	+	.	.	.	.	2
<i>Vicia sepium</i>	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.
<i>Epilobium palustre</i>	.	.	.	2	.	.	.	.	.	.
<i>Lycopus europaeus</i>	+	.	.	1	.	.	.	.	.	.
<i>Solanum dulcamara</i>	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.
<i>Sambucus racemosa</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1

Виды, которые встречаются изредка в следующих описаниях: *Acer negundo* с (+: 11), *Agrostis capillaris* (+: 9); *A. stolonifera* (+: 7), *Alisma plantago-aquatica* (+: 15), *Betula pubescens d* (+: 13), *Bistorta officinalis* (+: 5, 6), *Brachipodium sylvaticum* (+: 7), *Carex acutiformis* (2: 13), *C. digitata* (+: 15), *C. elongata* (+: 1), *C. pilosa* (+: 14), *C. sylvatica* (+: 5, 7), *Chamaerion angustifolium* (+: 11), *Cnidium dubium* (+: 1), *Coccyganthe flos-cuculi* (+: 2), *Corydalis solyda* (+: 12, 15), *Cruciata glabra* (+: 4), *Dryopteris filix-mas* (+: 6), *Epilobium palustre* (2: 4), *Fragaria vesca* (+: 9), *Gagea lutea* (+: 15), *G. minima* (+: 15), *Galium intermedium* (+: 4), *G. palustre* (+: 15), *Glechoma hederacea* (1: 13, 14), *Gymnocarpium dryopteris* (1: 5), *Hylebia nemorum* (+: 10), *Iris pseudacorus* (+: 15), *Juncus effusus* (+: 13), *Lolium multiflorum* (+: 7), *Luzula pilosa* (+: 1, 10, 12), *Lythrum salicaria* (+: 13), *Melica nutans* (1: 11; +: 12), *Mycelis muralis* (1: 11), *Padus avium b* (1: 13, 14), *P. serotina c* (+: 11), *Polygonatum odoratum* (+: 1), *Pteridium aquilinum* (1: 11), *Pulmonaria obscura* (+: 3, 7), *Pyrus communis c* (+: 1, 11), *Ranunculus cassubicus* (1: 2), *R. flammula* (+: 4), *Ribes spicatum c* (+: 1), *Rubus nessensis c* (+: 4; 1: 12), *Rumex obtusifolius ssp. sylvestris* (+: 9, 13), *Salix cinerea c* (+: 12), *Sambucus racemosa c* (1: 11), *Scrophularia nodosa* (+: 2), *Solanum dulcamara* (1: 4), *Solydago canadensis* (+: 13), *Stellaria alsine* (+: 15), *Thalictrum aquilegifolium* (+: 8), *Trientalis europaea* (1: 11), *Ulmus glabra cd* (1: 4; +: 10), *Urtica dioica* (+: 1, 12), *Vaccinium myrtillus* (+: 11), *Veronica beccabunga* (+: 14), *V. officinalis* (+: 4), *Vicia sepium* (1: 3), *Viola reichenbachiana* (+: 1), *V. uliginosa* (+: 4).

Место, дата и авторство описаний:

1. Житомирский ГЛХ, Богдановское л-во, на 200 м на запад от села Довжик близ авто-трассы Житомир – Новоград-Волынский, 08.04.-20.09.2014; Е.А. Воробьев, А.Р. Баранский.

- 2, 3. Житомирский ГЛХ, Пилиповское л-во, 64 кв., 5 выд., старые дубы спилены, ольха восстанавливается (диаметром 20 см), присутствует 10-15-летний подрост дуба; весной в вичках стоит вода; 18.06.1999 г.; Е.А. Воробьев.
4. Житомирский ГЛХ, Пилиповское л-во, 47 кв., 3 выд., культуры ясеня и ели 25 л.; 21.07.1999 г.; Е.А. Воробьев.
5. Житомирский ГЛХ, Пилиповское л-во, 64 кв., 12 выд., старый дубово-липовый лес; 18.06.1999 г.; Е.А. Воробьев.
6. Житомирский ГЛХ, Пилиповское л-во, 64 кв., 6 выд., культуры ели диаметром 20 см, дуб имеет такой же диаметр; лещина имеет форму дерева; 18.06.1999 г.; Е.А. Воробьев.
7. Житомирский ГЛХ, Пилиповское л-во, 64 кв., 12 выд., несколько старых дубов спилены, подрост граба отсутствует, кабаны роют клубни чистяка; 18.06.1999 г.; Е.А. Воробьев.
8. Житомирский ГЛХ, Пилиповское л-во, 64 кв., 12 выд., старая дубрава, немногочисленными группами присутствует подрост граба высотой 1 м; 18.06.1999 г.; Е.А. Воробьев.
9. Житомирский ГЛХ, Пилиповское л-во, 64 кв., 6 выд., культуры сосны, изреженные буреломом; старые дубы спилены; 18.06.1999 г.; Е.А. Воробьев.
10. Житомирский ГЛХ, Пилиповское л-во, 64 кв., 24 выд., культуры сосны на месте дубравы; 18.06.1999 г.; Е.А. Воробьев.
11. Житомирский ГЛХ, Пилиповское л-во, 66 кв., 18 выд., старые культуры сосны на месте дубравы, проведена санитарная рубка; 28.06.1999 г.; Е.А. Воробьев.
12. Между ст. Писки и ст. Спартак, 98 квартал на границе с 99 кварталом, 50 м на северо-восток от железной дороги, площадь 20x45 м. 18.04.2015; Е.А. Воробьев, А.Р. Баранский.
13. Северо-восточная окрестность с. Поташня (близ конторы лесничества, 100 м от села) просвет на месте перекрестка очень малонаезженных лесных дорог, вода выдавливается, пойма на левом берегу левого истока р. Таль. 09.05.2015; А.Р. Баранский, Е.А. Воробьев.
14. На 1,5 км к северо-западу от конторы лесничества с. Поташня. По западную сторону затопленной лесной дороги (и по обочинам), под прямым углом пересекающей пойму р. Таль. 09.05.2015; Е.А. Воробьев, А.Р. Баранский.
15. Рядом с оп. № 4, условия несколько богаче и суше. 09.05.2015; Е.А. Воробьев, А.Р. Баранский.

Ассоциация **Impatienti noli-tangeri-Quercetum roboris** ass. nov. hoc loco

Номенклатурный тип ассоциации (holotypus): Описание № 8 таблицы.

Диагностические виды: *Alnus glutinosa*, *Quercus robur*, *Carpinus betulus*, *Rubus idaeus*, *Athyrium filix-femina*, *Stellaria holostea*, *Pulmonaria obscura*, *Impatiens noli-tangere*, *Equisetum sylvaticum*, *Oxalis acetosella*, *Adoxa moschatellina*, *Galium odoratum*.

Ассоциация принадлежит к союзу **Alno-Ulmion** Br.-Bl. et R. Tx. 1943 и представляет его более сухие сообщества (более сухие подтипы типов лесорастительных условий С₄-Д₄). Её сообщества достаточно распространены на Центральном (Житомирском) Полесье в понижениях среди (сосново)-дубово-грабовых и сосново-дубовых лесов. Необходимо отметить, что союз **Alno-Ulmion** мы рассматриваем отдельно от союза **Alnion incanae**, учитывая отличия в составе эдификаторов, флористические и хорологические особенности – если первый приурочен преимущественно к широколиственно-лесной зоне и лесостепи, то второй – к бореальной зоне и поясу темнохвойных лесов в горах. Ассоциация **Impatienti noli-tangeri-Quercetum roboris** (в первую очередь её типовая субассоциация) является викарирующей к ассоциации **Ficario-Ulmetum minoris** Knapp 1942 em. J. Mat. 1976, описанной из Польши [8], отличаясь от неё отсутствием или относительной редкостью *Fraxinus excelsior*, *Ulmus carpinifolia*, *Alnus incana*, *Humulus lupulus*, *Rubus caesius*, *Ficaria verna*, *Anemone ranunculoides*, *Schedonorus giganteus*, *Filipendula ulmaria*, *Poa nemoralis*, *Scrophularia nodosa*, *Viola reichenbachiana*. В свою очередь, новая ассоциация отличается от **Ficario-Ulmetum minoris** наличием и значительным участием *Carpinus betulus*, *Rubus idaeus*, *Athyrium filix-femina*, *Impatiens noli-tangere*, *Lysimachia vulgaris*, *Stellaria holostea*, *Equisetum sylvaticum*. В составе новой ассоциации, кроме типовой субассоциации (**Диагностические виды:** *Impatiens noli-tangere*, *Lysimachia vulgaris*, *Adoxa moschatellina*, *Geranium robertianum*), выявлена субассоциация **Impatienti noli-**

tangeri-Quercetum roboris alnetosum glutinosae subass. nova prov. (Диагностические виды: *Alnus glutinosa*, *Fraxinus excelsior*, *Schedonorus giganteus*, *Oxalis acetosella*, *Pulmonaria obscura*, *Dryopteris filix-mas*, *Chrisosplenium alternifolium*), но мы ограничимся здесь описанием лишь типовой субассоциации, ввиду нахождения *Gagea spathacea* именно в ней.

Второй раз *G. spathacea* в Украинском Полесье был обнаружен 12 и 13 апреля 2015 г. в Бородянском районе Киевской области (Киевское Полесье). Первая ценопопуляция находилась в 1,5 км на северо-запад от конторы лесничества в с. Поташня. Она располагается во влажном грабово-ольховом лесу (в прошлом с участием дуба, впоследствии вырубленного – сохранились его толстые трухлявые пни) по обе стороны затопленной давно не использованной лесной дороги и по её обочинам, под прямым углом пересекающей пойму р. Таль. Это наиболее многочисленная из найденных нами ценопопуляций – она занимает площадь около 2 га, причём местами проективное покрытие *G. spathacea* достигает 0,5–1 %. Численность особей вида в ценопопуляции достигает несколько тысяч особей, из них цветущих порядка 100.

Второй локалитет в Бородянском районе находится в 4 км на юго-запад от первого, между ст. Писки и ст. Спартак, 98 квартал на границе с 99 кварталом, 50 м на северо-восток от железной дороги Киев – Коростень. Лес старый, полидоминантный (ольха высотой 25 м имеет диаметр 0,7 м, береза – 0,3–0,4 м, дуб – 0,1–0,4 м, граб диаметром 0,05–0,3 м образует второй подъярус высотой 10 м). Площадь описания 20 × 45 м, особи *G. spathacea* сосредоточены преимущественно в вымочках 5–10 см глубиной, эпизодически служащим грязевыми ваннами диким кабанам (площадь этой части ценопопуляции 15 м², 10 цветущих особей, 100 вегетативных), а также на просеке, по которой изредка движется транспорт, и рядом с ней. Площадь этой части ценопопуляции с более мезотрофными условиями 20 м², имеется около 25 цветущих особей, 50 вегетативных. Несколько особей вида, в том числе цветущих, отмечены вместе с *Ficaria verna* и *Caltha palustris* в 15 м от локализации описания на кабаньей тропе, проходящей по кустарниковому болоту с доминированием *Salix cinerea*.

Третий локалитет в Бородянском районе был обнаружен 9 мая 2015 г. на северо-восточной окраине с. Поташня (100 м от села) в просвете на месте редко используемых лесовозных дорог в пойме на левом берегу левого истока р. Таль, на границе ясеневое (выше по профилю) и ольховое (ниже) леса. Вода местами выдавливается, ольха и ясень имеют диаметр 0,4 м. Эта ценопопуляция представляет наиболее эдафически богатое и влажное местообитание из отмеченных нами. За 50 м от описания в колее затенённой лесной дороги также отмечена группа особей *G. spathacea* небольшой численностью, занимающая площадь 4 м². Несколько вегетирующих особей вида были обнаружены также на краю лесной дороги, проходящей по подкормочной площадке кабанов. Во время беглых маршрутных исследований этого лесного массива других находок вида обнаружено не было. Однако небольшой процент пройденных нами потенциальных экотопов вида, в особенности в пойме р. Таль, и невзрачность вида в вегетативном состоянии дают возможность предполагать, что ценопопуляции *Gagea spathacea* занимают в обследованном лесном массиве общую площадь в десятки гектар. Наиболее крупные местонахождения для их охраны требуют организации ботанических заказников.

Новые локалитеты в Бородянском районе Киевской области находятся на расстоянии около 100 км на северо-восток от местонахождения в окрестностях г. Житомира, а от ближайших находок в Белорусском Полесье в Мозырском и Гомельском районах они располагаются на 150–200 км южнее. Все местонахождения вида из Киевского Полесья, несмотря на некоторые различия в увлажнении и трофности, принадлежат к более гигрофильной ассоциации **Fraxino-Alnetum**. От типичных сообществ из Польши описания из Украинского Полесья отличаются меньшим постоянством или почти полным отсутствием *Picea abies*, *Geranium robertianum*, *Cirsium oleraceum*, *Carex remota*, *Scutellaria galericulata*, *Iris pseudacorus*, *Circaea alpina*, что объясняется их более южным и восточным местоположением и, как следствие, несколько более бедными и сухими экотопами. Однако эти различия намного меньше, чем у ассоциаций **Ficario-Ulmetum** и **Impatienti-Quercetum**. Это хорошо согласуется с более сухими экотопами последних, несколько приближёнными к плакорным (зональным) сообществам дубово-грабовых лесов, которые достаточно чувствительны к

климатическим различиям различных регионов и, как правило, образуют на них викарирующие ассоциации. Более влажные экотопы **Fraxino-Alnetum** приводят к сглаживанию климатических различий, что и обуславливает более широкий ареал последней ассоциации.

Продромус сообществ с участием *Gagea spathacea* в Украинском Полесье.

Cl. **Quercu-Fagetea** Br.-Bl. et Vlieger in Vlieger 1937

Ord. **Fraxinetalia** Scam. et Prsg. 1959

All. **Alno-Ulmion** Br.-Bl. et R.Tx. ex Tschou 1948

Ass. **Impatienti noli-tangeri-Quercetum roboris** ass. nova hoc. loco

Ass. **Fraxino-Alnetum** W. Matuszkiewicz 1976

Заключение. С новыми находками *Gagea spathacea* на юге Житомирского и в центре Киевского Полесья расширен известный ареал островного распространения этого вида.

Подтверждено, что ценоотические особенности *G. spathacea* сохраняются и на крайнем юго-востоке её ареала – широколиственно-ольховые гигрофильные леса союза **Alno-Ulmion** и изредка – заросли болотных кустарников союза **Salicion cinereae**. Нахождение вида преимущественно в старых лесах говорит в пользу автохтонности ее популяций. У *G. spathacea* преобладает вегетативное возобновление, чему весьма способствует жизнедеятельность кабана (*Sus scrofa*), а также прокладка просек и редко используемых дорог. Кроме возможности расселения вида на копытах и шерсти кабанов и колёсах автотранспорта, положительную роль для вида имеет снижение конкуренции в свободных от других растений вымочках – купальнях кабанов, их тропах (и тропах лося – *Alces alces*), а также на редко используемых лесных дорогах.

Отличие мезогигрофильных сообществ широколиственно-ольховых лесов Житомирского Полесья от описанной из Польши ассоциации **Ficario-Ulmetum** привели нас к описанию новой ассоциации **Impatienti noli-tangeri-Quercetum roboris** ass. nova hoc. loco, тогда как гигрофильные сообщества Польши и Украинского Полесья отнесены к одной ассоциации **Fraxino-Alnetum**. Считаем, что *Gagea spathacea* (Hayne) Salisb необходимо внести в новое издание Красной книги Украины. Для охраны вида необходим запрет каких-либо рубок и осушительных мелиораций в местах его произрастания, но весьма желательно развитие охотничьего хозяйства по крупным копытным.

Литература

1. Красная книга Республики Беларусь. Растения / гл. ред. кол. Л.И. Хоружик, Л.М. Сушня, В.И. Парфенов. – Мн. : Беларус. энцыкл. им. П. Бровки, 2005. – 455 с.
2. Czerwona lista roslin i grzbow w Polsce / red. : Z. Mirek, K. Zarzycki, W. Wojewoda, Z. Szlag. – Krakow : Inst. Bot. im. W. Szafera PAN, 2006. – 99 s.
3. Meusel, H. Vergleichende Chorologie der Zentraleuropäischen Flora / H. Meusel, E. Jäger, E. Weinert. – Jena : Fischer Verl. – 1965. – Bd. 1. – 583 s.
4. Флора Европейской части СССР: в 11 т. – Л. : Наука, 1974–1981. – Т. 4 / отв. ред. А.А. Фёдоров. – 1979. – 355 с.
5. Флора УРСР: в 12 т. – К. : Вид-во АН УРСР, Наукова думка, 1938–1965. – Т. 3 / під ред. М.І. Котова, А.І. Барбарича. – 1950. – 428 с.
6. Миркин, Б.М., Наумова, Л.Г., Соломещ, А.И. Современная наука о растительности / Б.М. Миркин, Л.Г. Наумова, А.И. Соломещ. – М. : Логос, 2001. – 264 с.
7. Sirenko, I.P. Creation a Databases for Floristic and Phytocenologic Researches. / I.P. Sirenko // Ukr. Phytosoc. Coll. – 1996. – Ser. A. – S. 9–11.
8. Matuszkiewicz, W., Matuszkiewicz, J. Przegląd fitosociologiczny zbiorowisk lesnych Polski / W. Matuszkiewicz, J. Matuszkiewicz // Phytocenosis. Warszawa: Białowiesia, Seminarium Geobotanicum 3. – 1996. – Vol. 8. – S. 38–53.

УДК 576.89(28)(476.2-37Гомель)

Оценка зараженности описторхисами вида *Opisthorchis felineus* промежуточных хозяев, обитающих в водоемах различного типа на территории Гомельского района

Н.П. ДЕНИСОВА, А.В. ГУЛАКОВ

Описывается биология развития паразита *Opisthorchis felineus* – кошачьей двуустки, одного из самых распространенных гельминтов, пути передачи инвазии с основами патогенеза. Авторы сравнивают результаты исследования промежуточных хозяев паразита за период 2012–2014 гг.

Ключевые слова: описторхис, гельминт, паразит, инвазия, моллюск, рыба, описторхоз.

The biology of development of the *Opisthorchis felineus* – a cat liver fluke – one of the most widespread helminthiases and a way of transfer of an invasion with pathogenesis bases is described. The results of investigation of intermediate hosts for the period of 2012–2014 are compared.

Keywords: *Opisthorchis felineus*, helminth, parasite, invasion, mollusk, fish, opisthorchiasis.

Введение. Описторхоз – один из наиболее распространенных антропозоонозных гельминтозов человека, плотоядных животных и рыб, приобретших в некоторых регионах характер краевой патологии. Заболевание обусловлено паразитированием трематоды *Opisthorchis felineus* (кошачья, или сибирская двуустка), относящейся к семейству *Opisthorchiidae* и являющейся биогельминтом [1, с. 847], [2, с. 293], [3, с. 332].

Описторхисы развиваются с участием промежуточного хозяина – пресноводного моллюска вида *Bithynia leachi* и дополнительного хозяина – рыб семейства карповых (плотва, линь, язь, красноперка, елец, сазан, лещ, вобла, карась и другие). Дифинитивные хозяева – плотоядные животные (дикие и домашние), свинья, человек [3, с. 334].

Основная часть. Половозрелые описторхи паразитируют в желчных протоках печени (100 %), желчном пузыре (60 %) и протоках поджелудочной железы (36 %), где питаются выделениями слизистых оболочек, эпителиальными клетками, кровью и различными секретами. Яйца, содержащие реснитчатую личинку – мирацидий, выделяются половозрелыми описторхами во внешнюю среду. Наиболее благоприятной средой для переживания яиц описторхов является вода – срок выживаемости яиц в водоемах достигает 15 месяцев, в фекалиях 6–7,5 месяцев, в почве от 11 до 34 суток, на снегу (при температуре воздуха от минус 6 до плюс 8 градусов) – до 72 часов.

Мирацидий в естественных условиях не выходит в окружающую среду, его развитие происходит в кишечнике промежуточного хозяина – пресноводного моллюска. В кишечнике моллюска мирацидий покидает яйцевые оболочки, проникнув в полость тела, превращается в спороцисту, которая размножается сначала прямым делением, а затем партеногенетическим путем – в результате образуются сотни редий, которые размножаясь партеногенетически, дают десятки тысяч церкариев. Срок развития от мирацидия до церкария составляет от 2 до 2,5 месяца. В течение 1 месяца церкарии созревают в ткани печени и, достигнув зрелости, покидают тело моллюска и выходят в воду. Продолжительность жизни свободно плавающих церкариев не превышает 55–60 часов, а через 24 часа после выхода активными остаются не более 10–15 %. При встрече со вторым промежуточным хозяином – рыбами семейства карповых, церкарии проникают в подкожную жировую клетчатку и в мышцы, где превращаются в метацеркариев. Продолжительность жизни метацеркариев примерно 2 года. Заражение рыб начинается в раннем возрасте и постепенно интенсивность и экстенсивность инвазии нарастает: если в мальках обнаруживаются единичные метацеркарии, то в 2–4 года – десятки и сотни, а 5–9 лет до 1500 (язь). До одного года рыба поражена в среднем в 1,8 %, 2–4 года – 15,1 % (язь – до 47,6 %), 5–9 лет – 89,3 %. Во время внедрения в ткани рыбы церкарий теряет хвост, в течение первых суток достигает места локализации и создает вокруг себя гиалиновую оболочку.

Затем образовавшаяся циста окружается слабо выраженной фиброзной оболочкой, которая является биологической полупроницаемой мембраной, обеспечивающей питание паразита и его защиту от иммунных реакций хозяина. Развитие метацеркариев до зрелой инвазионной стадии происходит в течение 6–8 недель. В организм окончательного (дефинитивного) хозяина, метацеркарии поступают с необезвреженной рыбой, содержащей инвазионные личинки. В желудке переваривается наружная соединительнотканная капсула, а внутренняя тонкая гиалиновая оболочка разрывается самой личинкой под действием дуоденального содержимого. Через 3–5 часов личинки достигают желчного пузыря и желчных протоков печени (положительный хемотаксис к желчи. Половой зрелости метацеркарии достигают через 3–4 недели, с этого времени начинается яйцепродукция и яйца описторхов можно обнаружить в дуоденальном содержимом и кале. Таким образом, полный цикл развития возбудителя от яйца до половозрелого паразита длится 4–4,5 месяцев (рисунок 1).

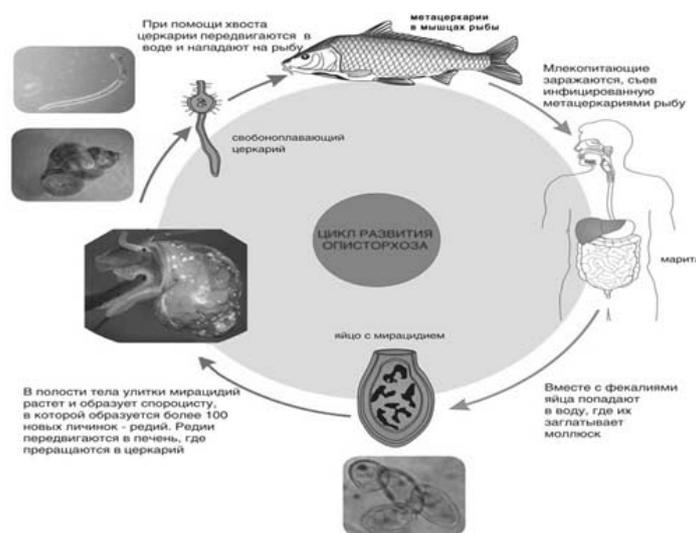


Рисунок 1 – Биология развития *O. felineus* [5, с. 32]

Продолжительность жизни описторхов достигает от 15–25 до 40 лет. В организме окончательного хозяина нарастание инвазии происходит только при повторных заражениях, при этом с каждой суперинвазией уменьшается число развивающихся описторхов. Максимальное количество паразитов в печени обнаружено в 1949 г. – 38432, в желчном пузыре – 128, в поджелудочной железе – 78 [4, с. 4–7].

Заболевание у рыб протекает в субклинической форме, но они являются основным источником заражения описторхозом человека и плотоядных животных [5, с. 332]. В основе патогенеза у человека лежит сенсibilизация с развитием аллергического состояния, особенно в ранней фазе болезни, рефлекторное влияние на функции желудочно-кишечного тракта, а также механическое поражение желчных ходов, застой желчи в связи с закупоркой сосудов паразитами, вторичное ее инфицирование. В ранней фазе описторхоза, наступающей через 2–4 недели после употребления зараженной рыбы, отмечается общая аллергическая реакция (острый аллергоз): повышение температуры тела, головная и мышечная боль, зудящая кожная сыпь, астматический бронхит, увеличение лимфатических узлов, болезненность суставов. В последующем (хроническая фаза) беспокоят боли в правом подреберье и эпигастральной области с различной иррадиацией, увеличения печени, желчных путей и поджелудочной железы, желудка, отмечается функциональные нарушения нервной системы [6, с. 63–64]. Больной человек при непосредственном контакте со здоровыми людьми опасности для них не представляет. Однако, если его фекалии, содержащие яйца гельминта, попадают в водоем, где обитает моллюск, создаются условия для продолжения биологического цикла, совершаемого паразитом. Не случайно зоны распространения описторхоза тесно связаны с местами обитания этого моллюска. Рыба (в основном виды семейства карповых) в таких водоемах заражена трематодами *Opisthorchis felineus*.

Таким образом, формируются эндемичные очаги описторхоза с высоким уровнем пораженности местного населения, а также кошек и собак. Заражение происходит при употреблении в пищу термически плохо обработанной рыбы, в мышцах которой сохраняются живые метацеркарии. Кошки и собаки заражаются, поедая сырую рыбу. К описторхозу восприимчивы люди любого возраста. Среди рыбаков, работников рыбной промышленности заболевание регистрируются чаще [1, с. 849].

Материал и методика исследований. Поиск и сбор моллюсков осуществлялся в период их массовой активности на трех участках: участок № 1 – старица реки Сож (окрестности УНБ «Ченки»); участок № 2 – набережная реки Сож (район центрального парка культуры и отдыха имени Луначарского); участок № 3 – прибрежная зона залива и залив реки Сож (микрорайон «Мельников луг» г. Гомель).

При поиске осматривались крупные, погруженные в воду предметы, с которых аккуратно собирались моллюски при помощи бентосного сачка. Транспортировка моллюсков в лабораторию проводилась в термосах с предварительно охлажденной водой. При этом рацион кормления состоял из сухого корма для рыб [7, с. 142].

Паразитологическое исследование проводилось стандартным компрессионным методом. Интенсивность инвазии моллюска определялась по числу сформированных партенит.

На изучаемых участках также осуществлялся лов рыбы семейства карповых. Водная среда в местах обитания рыбы характеризуется умеренным течением, берега пологие, но местами есть и обрывистые. Дно на данных участках песчаное, изредка илистое. Глубина в местах отбора достигала нескольких метров, имелись ямы и омуты. Участки характеризовались широким разнообразием растительности. Широко были представлены водные растения: осоки, рдест, кувшинка белая, кубышка желтая, камыш. Температура воды в реке и водоёмах в период исследования колебалась от 22 °С до 28 °С. Ловля рыбы производилась с помощью удочки. Для отлова использовались следующие приманки – земляные черви, хлеб, тесто, мотыль.

Исследование рыбы проводилось методом компрессирования с последующим просмотром и просчетом личинок паразита в 1 г мышц под бинокулярным микроскопом. Видовая принадлежность паразитов определялась по морфометрическим признакам и специфичности паразито-хозяйственных отношений.

Для анализа материалов, полученных в результате исследований, были применены следующие показатели: экстенсивность инвазии (Е), интенсивность инвазии (I), индекс обилия (М). При учете гельминтов первой естественной единицей учета служит особь хозяина, и в этом случае индекс обилия выражает среднее число особей гельминтов на одну особь хозяина [8, сс. 10, 16–17].

Результаты исследований и их обсуждение. В течение летнего периода 2014 г. нами было исследовано 340 экземпляров *Bithynia leachi* и 36 особей рыб семейства карповые (красноперка, карась, густера, чехонь, уклейка, плотва, язь).

В результате проведенных исследований было выявлено, что партенидами описторхид в разной степени поражены моллюски из всех трех точек отбора (таблица 1).

Согласно проведенным расчетам, установлено, что партенидами *O. felineus* заражены 94 особи моллюска, что составило 27,64 % от общего числа обследованных на трех участках. Наибольшие показатели зараженности партенидами установлены на участке № 1 – 28,09 % (34 зараженных особи) и № 2 – 29,92 % (41 зараженная особь). Наименьший показатель зараженности нами был отмечен на участке № 3 – 23,17 % (19 инфицированных особей моллюска).

Таблица 1 – Сравнительные данные по трем биотопам, полученные за летний период 2014 г. для моллюска вида *B. leachi*

Наименование участка	Количество исследованного материала, особей	из них заражено, особей	ЭИ Е, %	ИИ I, особи	ИО М, особи
Участок № 1	121	34	28,09	5,76	1,61
Участок № 2	137	41	29,92	3,46	1,03
Участок № 3	82	19	23,17	4,89	1,13
Всего	340	94	27,64	4,58	1,26

Интенсивность инвазии отражает среднее число гельминтов, рассчитанное на одну особь зараженного хозяина – моллюска, и составляла 4,58 особи от общего числа обследованных. Наивысший показатель интенсивности инвазии установлен на первом участке 5,76 особи. Наименьшее значение интенсивности инвазии было отмечено на втором участке – 3,46 особи. Интенсивность инвазии за исследуемый период на третьем участке составила 4,89 особи.

Индекс обилия инвазии показывает среднее число особей данного вида, приходящихся на единицу учета, и составлял 1,26 особи в среднем по трем участкам. Наивысший показатель индекса обилия инвазии моллюска установлен на первом участке (1,61 особь). Наименьшее значение по данному показателю получено на втором и третьем участках – 1,03 особь и 1,13 особь соответственно.

Всего в течение 2012–2014 гг. была исследована 951 особь моллюсков, из которых поражены партенидами *O. felineus* оказались 334 особи, что составляло 35,12 % от общего числа.

Анализируя данные полученные в результате исследований за период 2012–2014 гг., установлено, что инвазийность моллюсков за последние два года снизилась в среднем на 24 %, но значительно выросла интенсивность инвазии (на 57,5 %), что говорит о малом количестве зараженных особей моллюска, но высокой их обсемененности партенидами паразита. Индекс обилия инвазии остался без изменений.

В результате проведенных исследований было выявлено, что личинками описторхид в большей степени поражены рыбы семейства карповые, выловленные на первом и третьем участке (таблица 2).

Таблица 2 – Данные зараженности рыб семейства карповых на изучаемых участках за летний период 2014 г.

Наименование участка	Количество исследованного материала, особей		из них заражено, особей		ЭИ Е, %	ИИ I, особи	ИО М, особи	
Участок № 1	Красноперка	5	15	1	2	13,33	1	0,13
	Карась	3		0				
	Густера	1		0				
	Чехонь	1		0				
	Уклейка	2		0				
	Плотва	2		1				
	Язь	1		0				
Участок № 2	Красноперка	3	10	0	0	0	0	0
	Густера	1		0				
	Уклейка	2		0				
	Плотва	4		0				
Участок № 3	Красноперка	2	11	0	1	9,09	1	0,09
	Карась	2		0				
	Чехонь	4		0				
	Плотва	3		1				
Всего:	36			3		8,33	1	0,08

Проведенные расчеты относительно рыбы семейства карповые, показали, что личинками *O. felineus* заражены 3 особи, что составило 8,33 % от общего числа обследованных по трем участкам. Наибольший показатель зараженности личинками установлен на участке № 1 – 13,33 % (1 особь красноперки, 1 особь плотвы). Наименьший показатель зараженности установлен на третьем участке – 9,09 % (1 особь плотвы). На втором участке пораженность рыбы личинками описторхисов не установлена.

Наивысшие показатели интенсивности инвазии определены на первом и втором участке – по 1 особи соответственно.

Индекс обилия инвазии для исследуемых образцов семейства карповые, составлял 0,08 особи в среднем по трем участкам. Наивысший показатель индекса обилия инвазии установлен на первом участке – 0,13 особей. Наименьшее значение по данному показателю получено на третьем участке – 0,09 особи.

В течение 2012–2014 гг. было исследовано 83 особи рыбы семейства карповые, из которых поражены личинками *O. felineus* оказались 12 экземпляров, что составляло 14,45 % от общего числа. Анализируя данные полученные за весь период исследований, установлено, что инвазийность рыбы за последний год года снизилась в среднем на 13,5 %, и на 5 % в сравнении с 2012 г. Интенсивность инвазии была без значительных колебаний, однако индекс обилия инвазии в сравнении с предыдущим годом снизился на 68 %.

Заключение. Полученные данные позволяют сделать вывод о неблагополучном эпидемиологическом состоянии обследованных водоемов в отношении описторхоза. Индикатором неблагополучия служат показатели зараженности моллюска *Bithinia leachi* и рыбы семейства карповые личинками кошачьей двуустки, являющиеся источником инвазии во всех пунктах исследования.

Пресноводные моллюски обладают большой экологической пластичностью, вследствие чего они заселяют биотопы с различным уровнем растительности, которые и определяют структуру популяций пресноводных моллюсков.

Заражение значительной массы их популяции происходит весной, что обуславливает возможность завершения партеногенетического цикла и массовое заражение дополнительного хозяина в начале или середине лета. Из изложенного выше в то же время ясно, что сама возможность массового инвазирования дополнительного хозяина в период пика выхода церкариев из зараженных моллюсков не однозначна и подвержена значительным годичным колебаниям. Бывают годы «благоприятные по описторхозу» и «менее благоприятные» для эпидпроцесса, и особенно благоприятными следует считать годы с затяжными паводками.

Пресноводные моллюски являются повсеместными обитателями рек и озер Беларуси и служат первыми промежуточными хозяевами для трематод многих видов. В частности, битинииды являются промежуточными хозяевами для описторхид и для многих других видов трематод других семейств, являющимися источником инфекции для человека, встает проблема изучения зараженности пресноводных моллюсков на территории Гомельской области, в частности обитателей реки Сож и ее притоков.

Литература

1. Возианова, Ж. И. Инфекционные и паразитарные болезни / Ж.И. Возианова. – К. : Здоровье, 2002. – Т. 1. – 904 с.
2. Акбаев, М.Ш. Паразитология и инвазионные болезни животных: учебник / М.Ш. Акбаев [и др.] ; под ред. М.Ш. Акбаева. – М. : Колос, 1998. – 743 с.
3. Грищенко, Л.И. Болезни рыб и основы рыбоводства / Л.И. Грищенко, М.Ш. Акбаев, Г.В. Васильков. – М. : Колос, 1999. – 456 с.
4. Шонин, А.Л. Описторхоз. Конспект врача / А.Л. Шонин // Медицинская газета. – 2012. – № 68. – С. 8–9.
5. Колчанов, Н.А. Описторхоз через призму генома / Н.А. Колчанов, В.А. Мордвинов // Наука из первых рук. – 2008. – № 2 (20). – С. 27–37.
6. Генис, Д.Е. Медицинская паразитология: учебник / Д.Е. Генис. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Медицина, 1991. – 240 с.
7. Кураченко, И.В. Выявление степени зараженности промежуточных хозяев возбудителями описторхоза на территории ПГРЭЗ / И.В. Кураченко, И.С. Юрченко, А.Н. Лысенко // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. Естественные науки. – 2011. – № 4 (68). – С. 141–146.
8. Ромашов, Б.В. Методика гельминтологических исследований позвоночных животных: учебное пособие / Б.В. Ромашов, Л.Н. Хицова, Е.И. Труфанова, Н.В. Ромашова. – Воронеж, 2003. – 35 с.

УДК 581.5

Степень зависимости сельских жителей от леса и лесных ресурсов

М.С. ЛАЗАРЕВА, Е.Н. КАТКОВА

Представлены результаты исследований функциональности леса для сельских жителей на примере наиболее лесистого региона Беларуси. Для различных регионов Гомельской области установлены ассортимент и количество собираемой сельскими жителями продукции леса, установлена степень зависимости сельских жителей от леса.

Ключевые слова: лес, лесистость, недревесные ресурсы леса, ягоды, грибы, сельское население.

The results of studies of the forest utility for the rural population on the example of the most thickly wooded region of Belarus are presented. The range and amount of forest products collected by villagers are established for various regions of Gomel Region along with the extent of dependence of the rural population on forest.

Keywords: interspecific competition, derivatives forests, small-leaved forests, broadleaf species.

Введение. Вопросам лесопользования, экономической оценке лесов и лесных ресурсов Беларуси посвящены многие публикации [1]–[6] и др. Однако, тематика социального аспекта устойчивого лесопользования практически выпала из поля зрения научного обеспечения отрасли, не считая экотуризма и культурного наследия.

В настоящее время вопросы, в какой степени население, особенно сельские жители, зависят от лесных ресурсов, каковы особенности ассортимента собираемых населением продуктов леса в различных регионах Беларуси, какое количество лесной продукции местное население собирает и использует для собственных нужд и для продажи и др. не исследованы. Знания социальных аспектов функциональности лесов позволят установить степень зависимости сельских жителей от леса и выявить региональные особенности использования лесных продуктов и обозначить пути повышения уровня многоцелевого лесопользования.

Цель исследований – определить ассортимент и количество недревесных ресурсов леса, собираемых местным населением, с целью установления степени зависимости сельских жителей от леса.

Объекты и методика исследований. В настоящее время лесистость Республики Беларусь составляет 39,1 %. Из 6 областей республики наибольшим процентом лесистости характеризуется Гомельская область – 45,8 % (рисунок 1), на основании чего этот регион выбран в качестве модельного.

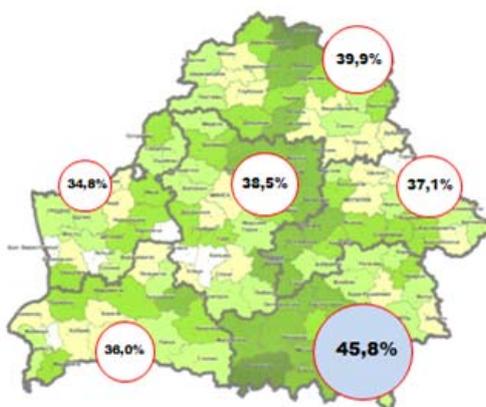


Рисунок 1 – Лесистость (%) в разрезе областей и районов Беларуси

В пределах Гомельской области распространение лесов по ее территории также неравномерно. Лесистость района расположения Милашевичей составляет 66,7 % – одна из самых высоких в Беларуси, лесистость Буда-Кошелевского района одна из наиболее низких показателей области – 22,5 % и Гомельского – 44,0 % (рисунок 2).



Рисунок 2 – Лесистость территории Гомельской области (показана интенсивностью цвета) с обозначением расположения исследуемых сообществ

Методом случайной выборки на расстоянии 10–30 км от указанных пунктов (Милашевичи, Гомель и Буда-Кошелево) отобраны деревни, в наибольшей степени отвечающие цели исследований. Далее по тексту название сообществ даются по населенным пунктам, относительно которых выбраны деревни (Буда-Кошелево, Гомель и Милашевичи).

В Буда-Кошелевском районе исследования проведены, как на чистой территории, так и на загрязненной радионуклидами (сообщество 4).

В ходе исследований проведено анкетирование сельских жителей в соответствии с образцами анкет и методикой, предложенной МСОП в рамках программы ФЛЕГ II ЕСИП/ВОСТОК. Опрошены жители 188 домохозяйств, что составило от 34 до 40% от имеющихся в данных населенных пунктах жилых домохозяйств и 12 домохозяйств на загрязненной радионуклидами территории (57 %).

Результаты исследований и их обсуждение. Доля лесного дохода от общей суммы доходов – наиболее важный вопрос при изучении значимости леса для жизни сельских жителей. В сообществе «Милашевичи» заработная плата составляет 34 % от общего дохода. Это в 1,5 и 1,3 раза ниже, чем в сообществах «Буда-Кошелево» и «Гомель». После зарплат и пенсий важным источником доходов в сообществе «Милашевичи» является лесной доход, составляющий 16 %. Он обеспечивается благодаря сбору грибов, ягод и другой недревесной лесной продукции, включая лекарственные растения, мед и т. д. Доля лесного дохода в сообществе «Милашевичи» в 5 раз выше, чем в сообществе «Гомель», в 4 раза выше, чем в сообществе «Буда-Кошелево».

По функциональности лесов для сельских жителей сообществ «Буда-Кошелево» и «Гомель» существенных отличий не установлено, поэтому далее по тексту рассматриваем их как одно, сравнивая с сообществом «Милашевичи». Близость к таким городам, как Буда-Кошелево и Гомель, позволяет сельским жителям находить более высокооплачиваемые рабочие места. Основной статьей дохода является заработная плата, которая составляет 51 % в сообществе «Буда-Кошелево» и 45 % в сообществе «Гомель».

После заработной платы и пенсий важным источником доходов в сообществах «Буда-Кошелево» и «Гомель» являются доходы от продукции животного происхождения (доходы от животноводства) – 17 % и 6 %, соответственно. Доходы от леса в этих сообществах составляют 3–4 %.

Анализ доходов в сообществе 4 – Рудне Викторинской, которая расположена на территории, загрязненной радионуклидами показывает, что наиболее важным источником дохода являются пенсии – 67 %. Некоторые жители или их родственники в прошлом были ликвидаторами аварии на ЧАЭС.

Лесной доход в этом сообществе составляет менее 2 % и включает периодический (не постоянный) сбор, в основном, грибов. Следует отметить, что в лесах, окружающих этот населенный пункт, сбор ягод и грибов запрещен.

В связи с особыми условиями проживания на загрязненной радионуклидами территории, практически не прослеживается связь членов сообщества Рудня Викторинская с лесом. Поэтому, далее по тексту представление результатов исследований построено без учета сообщества Рудня Викторинская, на сравнении двух сообществ: Милашевичи и Буда-Кошелево/Гомель.

Местные жители сообщества «Милашевичи» собирают в лесу широкий спектр недревесной продукции, представленной 13 видами (рисунок 1). По сравнению с другими сообществами, в Милашевичах жители концентрируют свое внимание на тех продуктах, которые дают более высокий доход.

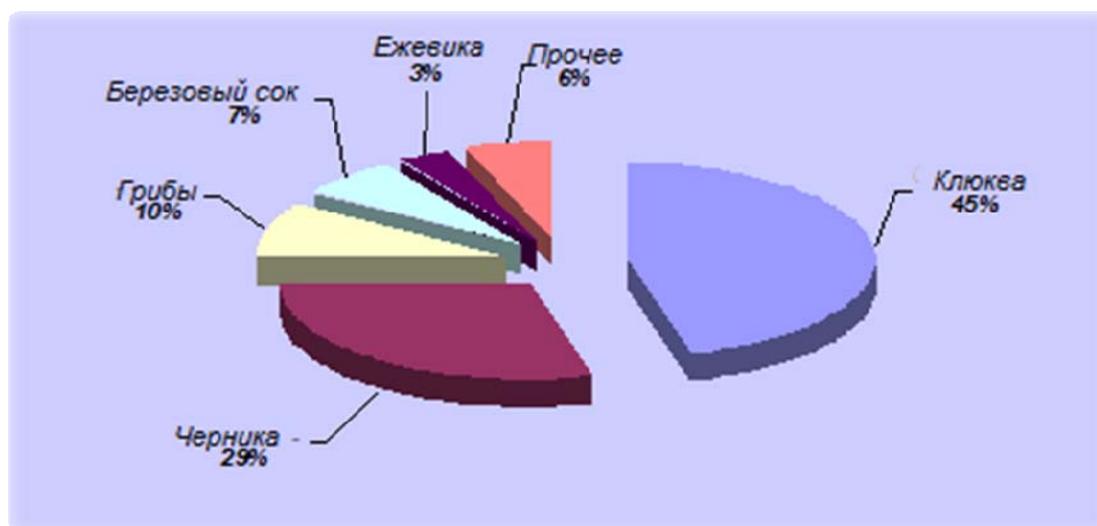


Рисунок 3 – Собираемая лесная продукция (Милашевичи)

Прочее – 6 %: Дрова–1,7 %, березовые веники – 1,5 %, крапива– 1,0 %, брусника – 0,7 % и др.

Наиболее популярными лесными ресурсами в сообществе «Милашевичи» являются: грибы, которые в 2013 г. собирало 67 % опрошенных респондентов, черника – 64 % и клюква – 57 %. В меньшей степени пользовались спросом березовый сок, который заготавливало 36 % домохозяйств и березовые веники – 14 % соответственно. Остальные виды недревесных лесных ресурсов, такие как рыба (6 %), лекарственные растения (4,5 %), шкуры животных (4,5 %), мед (3 %), земляника (3 %) и ветви деревьев (1,5 %), собирало не более 6 % домохозяйств.

Члены других сообществ (Буда-Кошелево-Гомель) собирают в лесу 17 различных видов недревесной продукции леса (рисунок 4).

Наиболее популярными лесными ресурсами являются: грибы, которые в 2013 г. собирало 76 % опрошенных респондентов, и черника – 74 % соответственно. В меньшей степени пользовались спросом березовый сок (29 % домохозяйств); земляника (22 %), лекарственные растения (21 %); березовые веники (14 %) и орехи (7 %).

Остальные виды второстепенных лесных ресурсов, такие как ивовые прутья, рыба, мясо дичи и плоды рябины собирались не более 6 % домохозяйств или в единичных случаях.

У 1/3 жителей Милашевичей имеются разрешения от лесхоза на самостоятельную заготовку дров, в основном сухостоя. В других сообществах это не практикуется (имел место один случай, что соответствовало – 0,8 %), т. к. жители покупают топливную древесину в основном в лесничествах – дрова с доставкой, а также у частных лиц – пиленные и колотые дрова.



Рисунок 4 – Собираемая лесная продукция (Буда-Кошелево-Гомель)
Прочее: малина – 1,2 %, земляника – 0,8 % и др.

Собираемую лесную продукцию местное население использует для собственных нужд, а часть продает заготовителям с целью получения денежных средств. Соотношение этих двух составляющих в сравниваемых регионах отличается. Так, отдаленность Милашевичей от крупных населенных пунктов, окружение деревни со всех сторон лесом с большими запасами разнообразных дикоросов способствуют тому, что сбор продуктов леса становится одним из важнейших источников дохода для этих людей.

По соотношению денежных средств от продажи дикоросов (на рисунке 5 – Деньги) и средств к существованию, т. е. выраженные в денежном эквиваленте продукты леса, используемые в пищу (С-сущ.), видно, что большую часть собранных дикорастущих ягод население продает заготовителям, в то время, как около половины объема собранных грибов сельские жители употребляют в пищу.

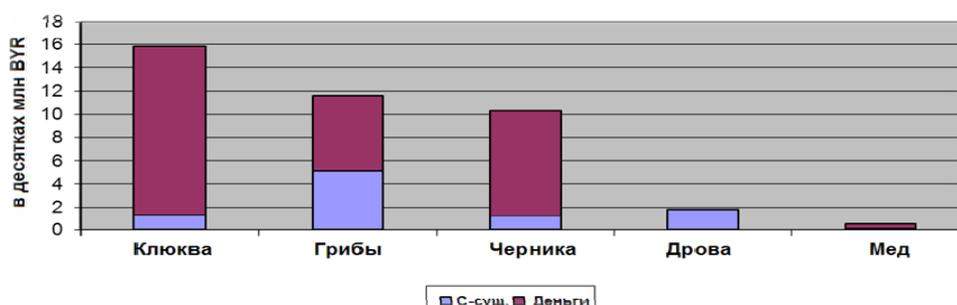


Рисунок 5 – Денежные средства и средства к существованию (Милашевичи)

В других сообществах (Буда-Кошелево-Гомель) из всего разнообразия лесной продукции продается лишь часть черники (рисунок 6).

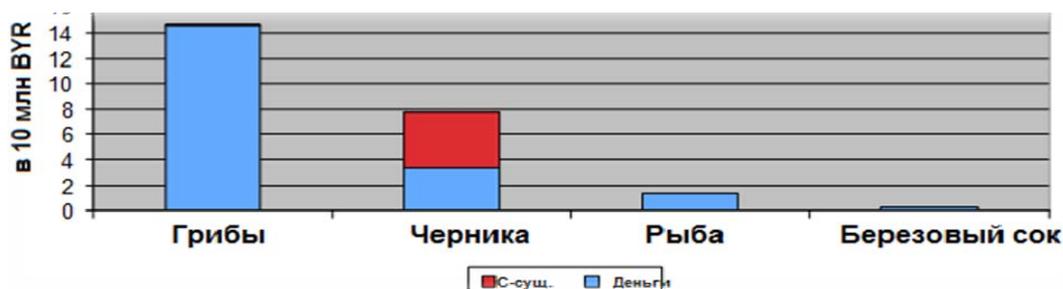


Рисунок 6 – Денежные средства и средства к существованию (Буда-Кошелево-Гомель)

Несмотря на большие объемы сбора недревесной продукции леса, сельские жители сообществ «Буда-Кошелево» и «Гомель» оставляют ее для собственных нужд. Объяснить это можно близостью городов, в которых живут и работают дети, внуки и другие родственники, которым и отдается большая часть продукции в сыром, консервированном или засушенном виде.

Для установления степени зависимости населения от леса, мы дифференцировали его по уровню доходов и определили средний доход (в разрезе денежных средств и средств к существованию) и относительный лесной доход (как отношение лесного дохода к общему доходу).

В Милашевичах все категории населения собирают дары леса как для собственных нужд, так и с целью получения денежных средств. Средний доход от лесной продукции (как денежных средств, так и для собственных нужд) имеет тенденцию к увеличению по мере роста общих доходов.

В других сообществах (Буда-Кошелево-Гомель) во всех категориях по уровню доходов имелось незначительное количество сельских жителей, которые продавали лесную продукцию – чернику, с целью получения денежных средств.

Зависимость местного населения от леса (по данным относительного лесного дохода) варьирует от 0,04 до 0,22 в исследованных сообществах Гомельской области. При этом, в сообществе Милашевичи зависимость от леса в среднем в три раза выше (ОЛД – 0,16), чем в других сообществах (ОЛД – 0,05).

Заключение. Впервые проведенные исследования зависимости сельских жителей Беларуси от леса показали, что использование недревесной продукции леса в различных населенных пунктах имеет отличия.

Зависимость местного населения от леса более чем в четыре раза выше в населенных пунктах, расположенных вдали от больших городов, на территории с высокой лесистостью. В этих регионах массовый сбор лесного урожая (клюква, черника и грибы) наблюдается в основном в целях продажи. Собранный урожай сдается частным заготовителям по низким ценам и в дальнейшем перепродается как сырье, в том числе за границу. Так как закупочные цены низкие, местные жители стараются собрать как можно больше дикоросов, зачастую используя запрещенные методы сбора, таким образом, нанося ущерб ягодникам, что необходимо учитывать при планировании и ведении лесного хозяйства.

Выявление всех лесозависимых сообществ и организация рационального комплексного использования лесных ресурсов на этих территориях будет способствовать сохранению биоразнообразия лесных экосистем и в лучшей степени обеспечит выполнение ими средообразующих, водоохраных и прочих экологических и социальных функций леса.

Литература

1. Атрощенко, Н.О. Экономическая оценка лесов и лесных ресурсов в системе устойчивого лесопользования / Н.О. Атрощенко // Труды Белорусского государственного технологического университета. Серия I. Лесное хозяйство. – 2006. – Вып. XIV. – С. 12–15.
2. Багинский, В.Ф. Лесопользование в Беларуси / В.Ф. Багинский, Л.Д. Есимчик. – Минск : Беларуская навука, 1996. – 367 с.
3. Багинский, В.Ф. Рациональное использование лесных ресурсов в Республике Беларусь и их экологического потенциала в системе национальной стратегии устойчивого развития: реализация и пути совершенствования / В.Ф. Багинский // Природные ресурсы. – 2002. – № 3. – С. 25–35.
4. Гримашевич, В.В. Рациональное использование пищевых ресурсов леса Беларуси / В.В. Гримашевич. – Гомель : ИЛ НАНБ, 2002. – 261 с.
5. Гримашевич, В.В. Рациональное использование ресурсов дикорастущих ягодных растений и съедобных грибов Беларуси в условиях рыночной экономики / В.В. Гримашевич // Проблемы лесоведения и лесоводства: Сборник научных трудов. – 2005. – Вып. 64. – С. 421–430.
6. Гримашевич, В.В. Ресурсы основных видов лесных ягодных растений и съедобных грибов Беларуси / В.В. Гримашевич, И.В. Маховик, Е.М. Бабич // Природные ресурсы. – 2005. – № 3. – С. 85–95.

УДК 591.5: 599.363

К экологии и видовой диагностике белозубок (*Crocidura*, *Soricidae*), обитающих на территории Белорусского Полесья

А.А. САВАРИН, А.Н. МОЛОШ

Анализируются данные по распространению и диагностическим характеристикам белозубок (*Crocidura*), обитающих на территории Белорусского Полесья. Особое внимание уделяется наличию особей с промежуточными экстерьерными признаками и статусу белобрюхой белозубки (*Cr. leucodon*).

Ключевые слова: *Crocidura*, распространение, диагностика, изменчивость, череп.

Data on distribution and diagnostic features of a white-toothed shrew (*Crocidura*) inhabiting the territory of Belorussian Polesse. Special attention is given to the presence of individuals with transitional exterior features and status of bicolored white-toothed shrew (*Cr. leucodon*).

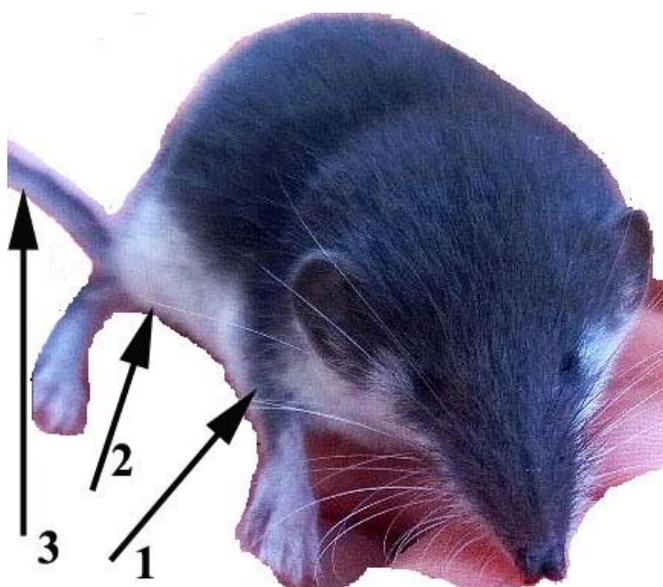
Keywords: *Crocidura*, distribution, diagnostics, variability, skull.

Введение. Обитающие на территории Белорусского Полесья два вида белозубок (белобрюхая, *Crocidura leucodon* и малая, *Cr. suaveolens*) остаются одними из наименее изученных видов териофауны страны. Причины этого – комплексные: отсутствие должных исследовательских программ, острый дефицит специалистов-териологов (обладающих практическими навыками диагностики видов-двойников), методические ошибки при проведении полевых работ и др. К тому же в последние десятилетия наметилась опасная тенденция: список видов млекопитающих, обитающих на той или иной территории, нередко основывается не на полевых исследованиях последних лет, а на общетеоретических представлениях о распространении видов в Беларуси, сформированных еще в середине прошлого столетия. Это является серьезной методической ошибкой, так как природные комплексы постоянно трансформируются, что, в свою очередь, сказывается на видовом разнообразии млекопитающих и динамике их численности. Кроме того, в Беларуси стало «традицией» публиковать сводки (и даже монографии) по мелким млекопитающим без анализа диагностических признаков отловленных особей. Указанные обстоятельства не только снижают ценность териологических публикаций, но и вызывают к ним недоверие у специалистов из других стран. Показательный пример: неверные сведения по экологии двух видов белозубок, размещенные в Приложении Красной книги Беларуси последней IV редакции [1] и являющиеся, по сути, перепиской аналогичных сведений из Приложения Красной книги предыдущей III редакции [2]. Причем, авторы-составители Приложения 2015 г. ошибочно утверждают, что данные по биологии и динамике численности указанных видов в пределах Беларуси отсутствуют. Так, например, только по белозубке малой, обитающей на юго-востоке страны, за последние 7 лет было опубликовано в научных журналах, определенных перечнем ВАК, 3 статьи [3]–[5] (не говоря уже о многочисленных публикациях в материалах республиканских и международных конференций, в сборниках научных трудов).

Оба вида белозубок обитают и на западе [6]–[8], и на востоке Белорусского Полесья [9], [10], а в Центральном Полесье (Национальный парк «Припятский») – только белозубка малая [11]. Однако, в работах других авторов краниологические характеристики (метрические и фенетические) отловленных особей не анализируются. Приведенный факт свидетельствует об актуальности обсуждаемых вопросов. Цель данной работы – указать дифференцирующие признаки двух видов белозубок.

Результаты и их обсуждение. В западной части Белорусского Полесья у особей белобрюхой белозубки выявлено два варианта окраски тела:

– *контрастная*, при которой темно-серая окраска спины резко ограничена от ярко-белой окраски брюха, боков и нижней поверхности хвоста. Такие экстерьерные признаки имела особь *Cr. leucodon*, отловленная летом 2014 г. на картофельном поле близ д. Перевись Малоритского района Брестской области (сообщение о поимке – А.Н. Молош), (рисунок 1);



- 1 – темно-серая продольная полоса на лапах,
 2 – длинные вибриссы (указано окончание);
 3 – белая окраска нижней части хвоста

Рисунок 1 – Белобрюхая белозубка с контрастной окраской

– *неконтрастная*, при которой серо-коричневая окраска спины слабо ограничена от серо-белой окраски брюха (локально с рыжими тонами), боков и светло-серой нижней поверхностью хвоста. Мертвая особь с такими экстерьерными характеристиками 02.09.2015 найдена зоологом Д.А. Кителем также в Малоритском районе (рисунок 2).



а)



б)

Рисунок 2 – Белобрюхая белозубка с неконтрастной окраской и пятнистостью
 а) вентральная сторона (указано расположение серо-рыжих пятен); б) серая окраска хвоста (указана длина)

Неконтрастную окраску (с доминированием серых тонов на брюшной стороне) имеют и две особи белобрюхой белозубки (рисунок 3), пойманные А.Н. Молошем в г. Береза Брестской области (02.09.2014 г., находка мертвой особи во дворе жилого дома на ул. Кирова, недалеко от центра города; 02.06.2015 г., поимка вблизи очистных сооружений в модифицированную ловушку Барбера).



Рисунок 3 – Белобрюхая белозубка с неконтрастной окраской

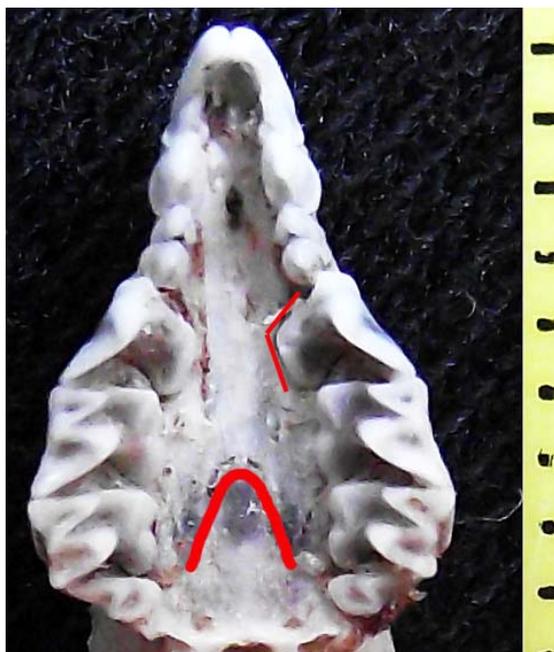
На востоке Беларуси поймана только одна особь белобрюхой белозубки с целым рядом промежуточных признаков (рисунок 4): окраска горла и брюха – грязно-белая (или бело-серая), спины – рыже-коричневая (рыже-бурая). Брюхо ниже передних лапок имеет рыжие пятна. Передние лапки – снежно-белые. Окраска спины (в отличие от *Cr. suaveolens*) резко очерчена от окраски брюха; граница окрасок узкая, не размытая. Хвост – толстый, без видимых мелких чешуек (характерных для белозубки малой), почти не сужающийся к концу.



Рисунок 4 – Пропорции и окраска тела белобрюхой и малой белозубок на востоке Беларуси

Такая же, рыже-коричневая окраска спины наблюдается и у *Cr. leucodon* с территории Германии [12]. Масса и промеры тела анализируемой особи: М = 8,3 г; L = 64; Са = 28; РI = 11; А = 5,5 мм. Соотношение длины хвоста к длине тела – 44 %. Наиболее диагностически значимы кондилобазальная длина (17,8 мм) и ширина мозговой капсулы (8,9 мм). Передний край премоляра образует четкий тупой угол с внутренним боковым краем.

Просмотренные нами особи белобрюхой белозубки имели одинаковые краниологические характеристики: четкий тупой угол премоляра, шов на небе – в виде арки (рисунок 5а), ширина моста у предглазничного отверстия больше высоты, типичная форма и размеры промежуточных зубов (рисунок 5б). По этим характеристикам белобрюхие белозубки, обитающие на территории Белорусского Полесья и Украины сходны [13].



а)



б)

Рисунок 5 – Фенетические характеристики черепа *Cr. leucodon* с территории Белорусского Полесья (обозначения в тексте)

Заключение. Особи белобрюхой белозубки, обитающие на территории Белорусского Полесья, характеризуются значительной изменчивостью окраски тела: она может быть как контрастной, так и с неярко выраженной границей смены тонов. Эта особенность проявляется и в окраске хвоста *Cr. leucodon*. Указанное обстоятельство необходимо учитывать при дифференциации двух видов белозубок. Стабильными оказались фенетические характеристики черепа, традиционно используемые в видовой диагностике видов р. *Crocidura*.

В дальнейших исследованиях необходимо выявить биотопические особенности двух видов белозубок. Полагаем, что на западе Белорусского Полесья белобрюхая белозубка является достаточно обычным видом, а на востоке – редким. Так, особи малой белозубки нами в юго-восточной части Беларуси отлавливаются ежегодно (начиная с осени 2004 г.), а взрослая особь белобрюхой белозубки отловлена единично в 2007 г.

Для системного изучения экологии белозубок чрезвычайно важно иметь специалистов-териологов (отсутствующих, как правило, в университетах Беларуси) в биологических музеях. Это позволит не только правильно осуществлять этикетирование собранного материала, но и публиковать каталог коллекций.

Авторы благодарят зоолога Д.А. Кителя (г. Малорита) за любезно предоставленную тушку белобрюхой белозубки (особь отловлена в западной части Беларуси).

Литература

1. Красная книга Республики Беларусь : редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды диких животных. – Минск : Беларуская Энцыклапедыя імя П. Броўкі, 2015. – С. 315.
2. Красная книга Республики Беларусь : редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды диких животных. – Минск : Беларуская Энцыклапедыя імя П. Броўкі, 2004. – С. 317.
3. Саварин, А.А. О статусе белозубки малой (*Crocidura suaveolens* Pallas, 1811) на юго-востоке Беларуси / А.А. Саварин // Веснік Магілёўскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.А. Куляшова. – 2008. – № 1 (29). – С. 182–186.
4. Саварин, А.А. Морфометрические и краниологические особенности белозубки малой (*Crocidura suaveolens*) юго-востока Беларуси / А.А. Саварин // Весці БДПУ. Сер. 3. – 2009. – № 2. – С. 50–54.
5. Саварин, А.А. Об экологии и морфологической изменчивости *Crocidura suaveolens* (Pallas, 1811) на юго-востоке Беларуси / А.А. Саварин // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2013. – № 5 (80). – С. 143–149.
6. Гричик, В.В. Новые данные о белобрюхой белозубке (*Crocidura leucodon* Herm.) в Беларуси / В.В. Гричик, Е.Е. Гаевский // Вестн. Белорусского гос. ун-та. Сер. 2. Химия. Биология. География. – 2003. – № 1. – С. 107.
7. Домбровский, В.Ч. Видовой состав и численность мелких млекопитающих в естественных и трансформированных местообитаниях Припятского Полесья / В.Ч. Домбровский, Н.Н. Яковец // Проблемы сохранения биологического разнообразия и использования биологических ресурсов: материалы науч.-практич. конф., Минск, 2009 г.: в 2 ч. / ГНПО «Научно-практический центр НАНБ по биоресурсам»; редкол.: М.Е. Никифоров [и др.]. – Минск, 2009. – Ч. 1. – С. 102–105.
8. Шималов, В.В. Распространение и гельминтофауна белозубки белобрюхой (*Crocidura leucodon* Hermann, 1780) в Беларуси / В.В. Шималов // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. біял. навук. – 2010. – № 1. – С. 117–119.
9. Саварин, А.А. О поимке белозубки малой в городской черте Гомеля / А.А. Саварин // Фауна в антропогенному середовищі / За редакцією І. Загороднюка. – Луганськ, 2006. – С. 133–135. (Серія: Праці Теріологічної Школи, випуск 8).
10. Саварин, А.А. О поимке белозубки белобрюхой (*Crocidura leucodon*) в юго-восточной части Беларуси / А.А. Саварин // Весн. Белорусского гос. ун-та. Сер. 2, Химия. Биология. География. – 2008. – № 2. – С. 112.
11. Зенина, И. Мелкие млекопитающие трансформированных территорий Центрального Полесья / И. Зенина // Фауна в антропогенному середовищі / За редакцією І. Загороднюка. – Луганськ, 2006. – С. 165–174. (Серія: Праці Теріологічної Школи, випуск 8).
12. The Bicolored White-Toothed Shrew *Crocidura leucodon* (Hermann 1780) Is an Indigenous Host of Mammalian Bornavirus / R. Dürrwald [et al.] // PLoS Biology. – 2014. – Vol. 9, Is. 4. – P. 4.
13. Товпинец, Н. Теріологіческие коллекции и вопросы морфологической диагностики белозубок рода *Crocidura* / Н. Товпинец // Мінлівіць та екалогія / За редакцією І. Загороднюка. – Київ, 2012. – С. 77–88. (Серія: Праці Теріологічної Школи, Том 11).

УДК 911.5:711.136 (476)

Ландшафтные закономерности размещения сельского населения и селитебных ландшафтов Белорусского Полесья

А.С. СОКОЛОВ

Анализируются закономерности размещения сельского населения в Полесской ландшафтной провинции. Устанавливается связь между природными свойствами ландшафтов, лежащие в основе их классификации, и показателями заселённости ландшафтов – плотностью сельского населения, долей селитебных ландшафтов, людностью и размером населённых пунктов и т. д.

Ключевые слова: плотность сельского населения, ландшафтная структура, селитебные ландшафты, людность населённых пунктов, роды и подроды ландшафтов, Белорусское Полесье.

The regularities of distribution of the rural population in the Polesye landscape province are analyzed in the paper. A connection between the natural properties of the landscape and populations indices of landscapes – the density of the rural population, residential landscapes shares, etc. is established.

Keywords: rural population density, landscape structure, residential landscapes, population size of settlements, landscape genera and subgenera; Belorussian Polesye.

При изучении процессов антропогенного преобразования природной среды может применяться большое количество существующих показателей, отражающих различные аспекты трансформации и геоэкологического состояния геосистем различных иерархических уровней. К их числу относят биоиндикационные критерии, применимые главным образом для оценки состояния геосистем топологического уровня, коэффициенты, основывающиеся на структуре землепользования и степени сохранности коренных (зональных) геосистем, натуральные показатели, отражающие количественные меры воздействия конкретных антропогенных факторов, интегральные показатели, интегральные оценки, определяемые по совокупности разнокачественных показателей и т. д.

Одним из наиболее универсальных критериев, применимым для геоэкологической оценки геосистем регионального уровня, является плотность населения. Различные авторы указывают на взаимосвязь плотности населения с уровнем антропогенного воздействия и преобразованности природной среды. Так, в работе [1] именно плотность населения была использована для установления ландшафтов Грузии, которое испытывают наибольшее воздействие. К числу наиболее существенных показателей степени влияния хозяйственной деятельности на природную среду, которые должны учитываться при характеристике геосистем, относит плотность сельского населения Р.Ш. Кашапов [2], поскольку высокая плотность сельского населения, определяет высокие значения биологического потребления первичной продукции растительности и энергопотребления. А.Г. Исаченко [3] указывает, что изменением плотности населения, как правило, согласуются уровень освоенности территории, интенсивность хозяйственной деятельности и антропогенного воздействия на ландшафты. Увеличение населенности влечет за собой рост потребления различных природных ресурсов (в том числе водных, рекреационных, местных пищевых), увеличение автомобильного парка, количества коммунально-бытовых отходов, не говоря уже об отходах производств, в которых занята активная часть населения. Б.И. Кочуров [4] также придаёт данному показателю особое значение для определения уровня освоенности (и соответственно, уровня антропогенной нарушенности) территорий. Показатель плотности населения применяется также для оценки потенциально возможного антропогенного загрязнения поверхностных вод [5] и для целого ряда других геоэкологических оценок.

Целью настоящей работы является анализ ландшафтных закономерностей размещения населения Белорусского Полесья как основа оценки геоэкологического состояния ландшафтов данного региона. Рассматривается размещение сельского населения, так как именно оно может обнаруживать связи со свойствами геосистем выбранного ранга (отдельных ландшаф-

тов и ландшафтных районов). Закономерности же размещения городского населения проявляются на значительно более высоком иерархическом уровне геосистем – ландшафтных зон и подзон, ландшафтных макрорегионов и т. п. [3].

Объектом исследования являлась ландшафтная провинция Белорусское Полесье. Провинция расположена на юге республики и занимает 28 % ее площади. Полесская провинция озёрно-аллювиальных, болотных и вторичных водно-ледниковых ландшафтов – обширный природный регион, который отличается высокой заболоченностью и лесистостью, особыми климатическими, гидрологическими, геоморфологическими, почвенными, флористическими, фаунистическими и ландшафтными особенностями, что в совокупности предопределяет природную уникальность территории, играющей большую роль в обеспечении экологической устойчивости как прилегающих государств, так и всей Европы [6].

Источником данных о населении в пределах изучаемой территории являлся справочник «Гарады і вёскі Беларусі» [7], о ландшафтной дифференциации территории – ландшафтная карта Беларуси [8] с последующими уточнениями [6], о местоположении и площади населённых пунктов – слой «Полигоны населённых пунктов» (settlement-polygon) в формате shape-файла из набора слоёв проекта OpenStreetMap для Беларуси [9]. Были использованы данные о площади, населении и ландшафтной приуроченности сельских населённых пунктов провинции.

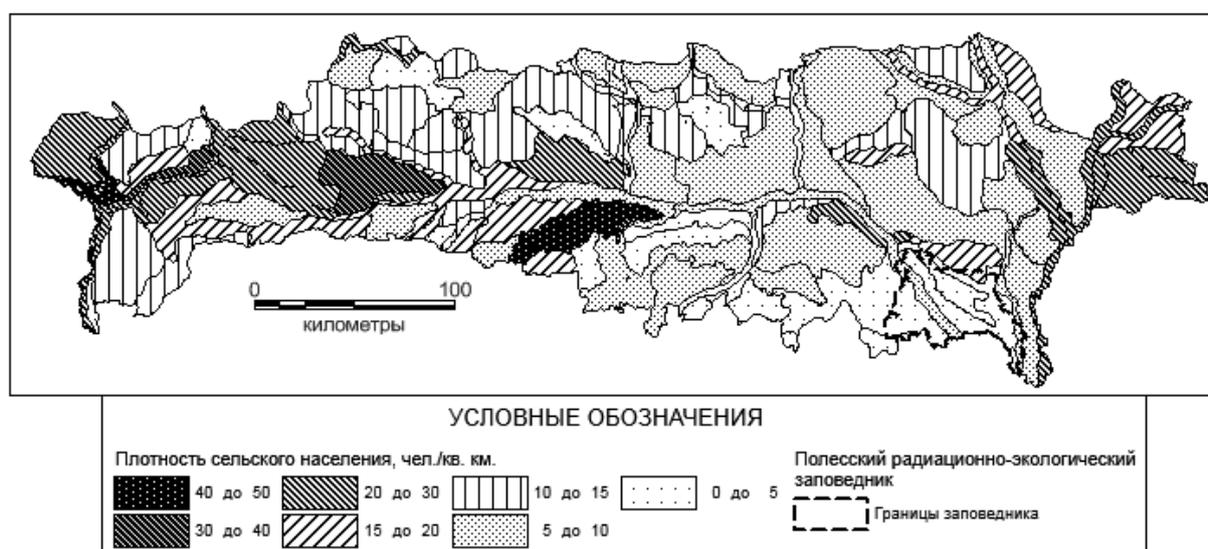


Рисунок 1 – Плотность сельского населения по ландшафтам Белорусского Полесья

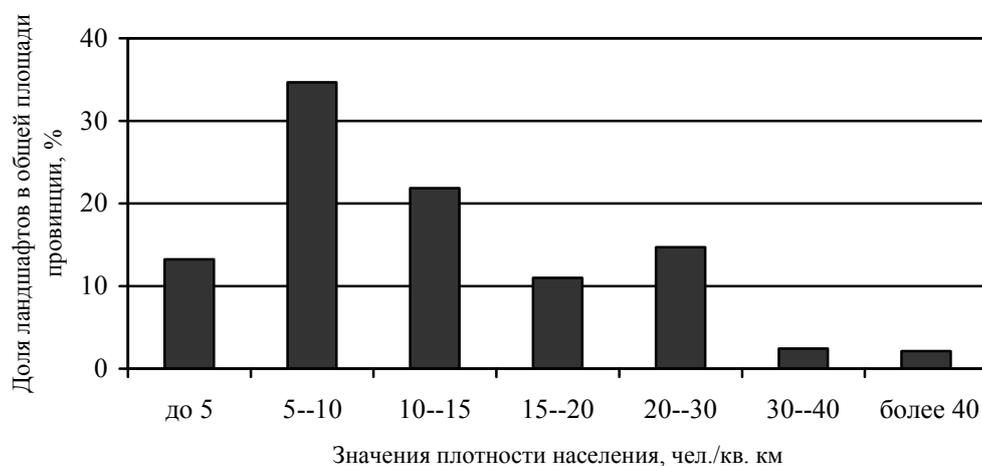


Рисунок 2 – Соотношение площадей ландшафтов с различной плотностью населения

Расчёт плотности сельского населения в пределах каждого ландшафта провинции позволил составить карту плотности сельского населения Белорусского Полесья (рисунок 1). Её анализ показывает, что сельское население размещено по территории неравномерно – если в западной части района преобладают ландшафты с плотностью населения выше 10 чел./км² и расположены все ландшафты с плотностью более 30 чел./км², то в восточной части преобладают ландшафты с плотностью до 10 чел./км² за исключением восточной окраины, где присутствуют ландшафты площадью 20–30 чел./км². Крупнейший массив наименее заселённых ландшафтов (плотностью менее 5 чел./км²) приурочен к юго-восточной части провинции, к территориям с высоким радиационным загрязнением и, в частности, к территориям зоны отселения Полесского государственного радиационно-экологического заповедника.

В целом по провинции преобладают ландшафты с плотностью населения 5–10 чел./км² (35 % её площади), а больше половины площади занимают ландшафты с плотностью сельского населения 5–15 чел./км² (рисунок 2).

Анализ ландшафтных закономерностей территориальной дифференциации плотности сельского населения был выполнен в двух аспектах: типологическом – по единицам классификации ландшафтов (родам и подродам) и региональном (индивидуальном) – по единицам ландшафтного районирования (ландшафтным районам).

Для выявления связи между природными свойствами ландшафта и особенностями размещения в его пределах сельского населения и селитебных ландшафтов нами были рассчитаны ряд показателей этого размещения для всей провинции в целом и отдельно для каждого рода и подрода ландшафта.

В среднем по провинции плотность сельского населения составляет 12,9 чел./км² (в целом по Беларуси 10,8 чел./км²), доля селитебных ландшафтов 6,1 % (по Беларуси 7,6), плотность сельских населённых пунктов 5,9 шт./100 км² (по Беларуси 13,2), средняя людность 219 человек, средний размер сельского населённого пункта 1,08 км², среднее расстояние между ближайшими населёнными пунктами 1,1 км.

Анализ показателей расселения в зависимости от рода ландшафта (таблица 1) показал, что наибольшая плотность сельского населения характерна для рода холмисто-моренно-эрозионных ландшафтов, занимающих незначительную долю (менее 1 %) в общей площади провинции. Также значения плотности выше средних по провинции наблюдаются для вторичноморенных, моренно-зандровых и пойменных ландшафтов. Эти же роды ландшафтов характеризуются и наибольшими значениями доли селитебных ландшафтов от общей площади. Минимальной плотностью сельского населения характеризуются озёрно-болотные, озёрно-аллювиальные и аллювиальные террасированные ландшафты.

Таблица 1 – Особенности показателей размещения населения и селитебных ландшафтов в зависимости от рода ландшафтов

Показатель	ОБ*	АТ	ОА	ВВЛ	МЗ	ХМЭ	П	ВМ
Доля рода в общей площади провинции, %	16,7	21,3	20,5	17,4	7,6	0,6	10,4	5,1
Плотность сельского населения, чел./км ²	9,0	11,9	12,4	12,2	17,7	28,9	15,5	20,1
Доля селитебных ландшафтов, %	3,2	6,5	5,5	6,0	7,7	13,6	8,6	8,8
Плотность населённых пунктов**, шт./100 км ²	2,8	4,6	4,5	5,6	7,5	7,1	5,2	11,1
Средняя людность сельских населённых пунктов**	337	265	273	224	226	372	284	183
Средний размер сельского населённого пункта, км ²	1,02	0,87	0,99	0,86	0,81	1,04	0,85	0,69
Среднее расстояние между ближайшими населёнными пунктами**, км	2,0	1,3	1,3	1,2	1,4	0,7	1,5	0,7

Примечания: * – ОБ – озёрно-болотные, АТ – аллювиально-террасированные, ОА – озёрно-аллювиальные, ВВЛ – вторичные водно-ледниковые, МЗ – моренно-зандровые, ХМЭ – холмисто-моренно-эрозионные, П – пойменные, ВМ – вторичноморенные; ** – населённые пункты без населения не учитывались.

Максимальная плотность населённых пунктов характерна для вторичноморенных ландшафтов, им же свойственны минимальная людность, средний размер и среднее расстояние между ближайшими населёнными пунктами. Озёрно-болотные ландшафты, напротив, характеризуются максимальными людностью и средним расстоянием между ближайшими

населёнными пунктами, минимальными плотностью населённых пунктов (в 4,0 раза ниже, чем для вторичноморенных и в 2,1 раза ниже, чем в среднем по провинции) и доле селитебных ландшафтов.

Таблица 2 – Особенности показателей размещения населения и селитебных ландшафтов в зависимости от подрода ландшафтов

Показатель	ТП*	АП	Т	ППВЛС	ВЛП	ЛС	ПВЛС	ВЛС
Доля подрода в общей площади провинции, %	11,1	31,6	5,6	25,8	12,9	1,5	8,8	2,6
Плотность сельского населения, чел./км ²	9,2	11,7	8,8	14,2	10,5	21,6	18,7	26,9
Доля селитебных ландшафтов, %	3,5	6,7	2,7	6,5	4,9	15,8	7,9	7,7
Плотность населённых пунктов**, шт./100 км ²	3,5	5,4	2,5	6,3	5,1	12,4	11,2	5,7
Средняя людность сельских населённых пунктов**	261	217	356	225	208	174	168	473
Средний размер сельского населённого пункта, км ²	0,98	1,22	1,09	1,02	0,95	1,26	0,71	1,33
Среднее расстояние между ближайшими населёнными пунктами**, км	2,1	1,4	2,0	1,2	1,5	1,8	0,8	1,0

Примечания: * – ТП – с поверхностным залеганием торфа и песком, АП – с поверхностным залеганием аллювиальных песков, Т – с поверхностным залеганием торфа, ППВЛС – с прерывистым покровом водно-ледниковых супесей, ВЛП – с поверхностным залеганием водно-ледниковых песков, ЛС – с покровом лёссовидных суглинков, ПВЛС – с покровом водно-ледниковых супесей, ВЛС – с покровом водно-ледниковых суглинков; ** – населённые пункты без населения не учитывались

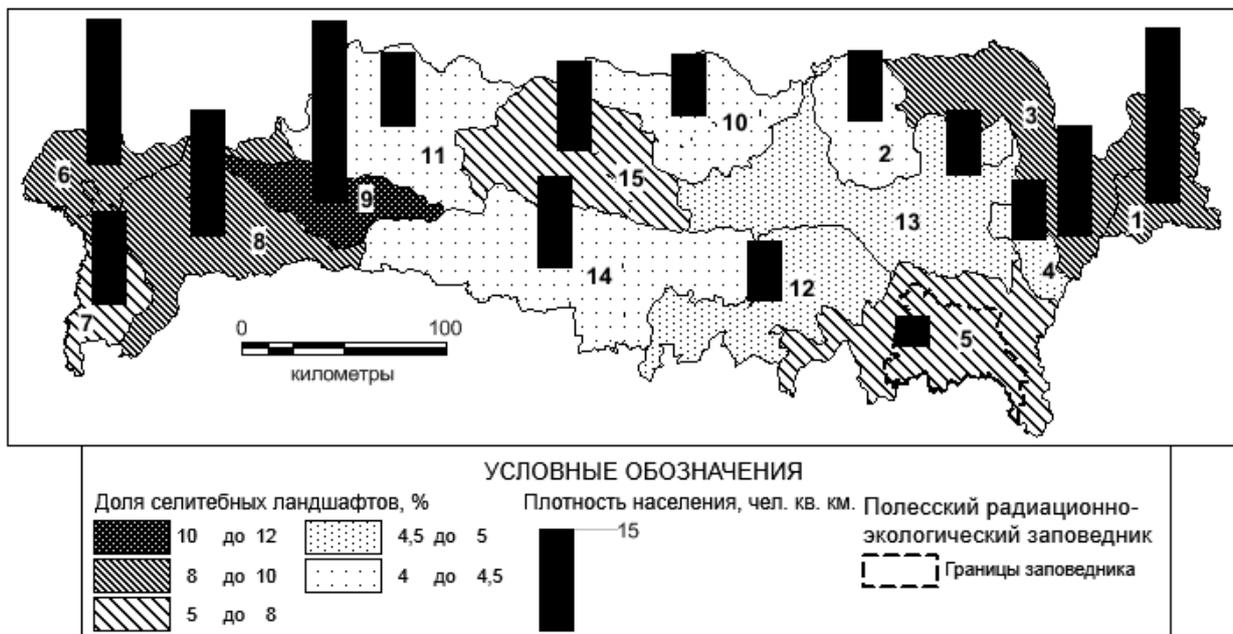


Рисунок 3 – Плотность сельского населения и доля селитебных ландшафтов по ландшафтными районам. Ландшафтные районы: 1 – Тереховский, 2 – Иппа-Тремлянский, 3 – Днепроовско-Сожский, 4 – Приднепровский, 5 – Наровлянско-Брагинский, 6 – Высоковский, 7 – Прибугский, 8 – Пина-Мухавецкий, 9 – Загородский, 10 – Оресский, 11 – Ясельдско-Щарский, 12 – Лельчицкий, 13 – Житковичско-Василевичский, 14 – Пинско-Туровский, 15 – Лунинецкий

Закономерности изменения показателей расселения в зависимости от подрода ландшафтов (таблица 2) проявляются в том, что существенно превышают среднепроинциальные значения плотности сельского населения ландшафты, относящиеся к трём подродам – с покровом водно-ледниковых суглинков, с покровом водно-ледниковых супесей и с покровом лёссовидных суглинков, в сумме составляющих 12,9 % от общей площади провинции. Ниже среднего значения плотности населения характерная для ландшафтов с поверхностным отложениями в виде песка и торфа – подроды с поверхностным залеганием водно-ледниковых песков и аллювиальных песков, а также подроды рода болотных ландшафтов – с поверхностным залеганием торфа и песка. Для ландшафтов с покровом лёссовидных суглинков харак-

терно превышение доли селитебных ландшафтов в 2,6 раза по сравнению со средним значением по провинции. Эти же ландшафты наряду с ландшафтами с покровом водно-ледниковых супесей отличаются и самым высоким показателем плотности населённых пунктов, а также самым низким показателем средней людности сельского населённого пункта.

Полесская ландшафтная провинция включает в себя 15 ландшафтных районов, отличающихся один от другого структурой видов ландшафтов [6]. Анализ плотности сельского населения и доли селитебных ландшафтов в разрезе ландшафтных районов (рисунок 3) показал, что максимальным значением этих показателей отличается Загородский ландшафтный район (соответственно, 26,5 чел./км² и 11,1 %). Высокие значения плотности характерны для Тереховского (25,8 чел./км²) и Высоковского (21,2 чел./км²) ландшафтных районов. Высокие значения доли селитебных ландшафтов также отмечаются для районов на крайнем западе и востоке провинции.

Результаты исследования позволяют сформулировать следующие выводы:

– природные свойства ландшафтов, лежащие в основе их классификации и районирования, обуславливают особенности сельскохозяйственного освоения и связанные с этим закономерности размещения сельского населения в пределах ландшафтов, которые, в свою очередь, могут служить показателем антропогенного воздействия и геоэкологического состояния ландшафтов;

– преобладающую долю площади провинции (56,5 %) занимают ландшафты с плотностью населения 5–15 чел./км², ландшафты с плотностью населения более 30 чел./км² составляют 4,6 % площади провинции, менее 5 чел./км² – 13,2 %. В целом по провинции население размещено неравномерно, и основные ареалы повышенной плотности населения приурочены к западной и крайне восточной частям провинции;

– из родов ландшафтов максимальными значениями плотности и доли селитебных ландшафтов отличаются холмисто-моренно-эрозионные, вторичноморенные и моренно-зандровые, из подродов ландшафтов – с покровом лёссовидных суглинков, с покровом водно-ледниковых супесей и с покровом водно-ледниковых суглинков, существенно превосходящие по этим показателям ландшафты, относящиеся к другим под родам.

Литература

1. Элизбарашвили, Н.К. Ландшафтный анализ размещения населения Грузии / Н.К. Элизбарашвили, Д.А. Николаишвили // География и природные ресурсы. – 2006. – № 4. – С. 150–155.
2. Кашапов, Р.Ш. Геоэкологическое состояние территории республики Башкортостан / Р.Ш. Кашапов // Вестник Нижневартовского государственного университета. – 2011. – № 2. – С. 30–34.
3. Исаченко, А.Г. Введение в экологическую географию / А.Г. Исаченко. – СПб. : Изд-во СПбГУ, 2003. – 192 с.
4. Кочуров, Б.И. География экологических ситуаций (экодиагностика территорий) / Б.И. Кочуров. – М. : ИГ РАН, 1997. – 156 с.
5. Токарчук, О.М. Селитебная освоенность бассейна реки Ясельда как фактор антропогенного загрязнения водного компонента ландшафтов / О.М. Токарчук, А.М. Кот // Экологическая культура и охрана окружающей среды: I Дорофеевские чтения : материалы междунар. науч.-практ. конференции, Витебск, 21–22 ноября 2013 г. – Витебск : ВГУ им. П.М. Машерова, 2013. – С. 305–307.
6. Марцинкевич, Г.И. Ландшафтоведение: учеб. пособие / Г.И. Марцинкевич, И.И. Счастливая. – Мн. : ИВЦ Минфина, 2014. – 252 с.
7. Гарады і вёскі Беларусі: энцыклапедыя у 15 т. / пад рэд. Г.П. Пашкова (гл. рэд.) [і інш.]. – Мінск : Беларуская энцыклапедыя, 2004–2007. – Т. 1–4.
8. Ландшафтная карта Белорусской ССР / под ред. А.Г. Исаченко. – М. : ГУГК, 1984.
9. Беларусь (BY) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://beryllium.gis-lab.info/project/osmshp/region/BY>. – Дата доступа : 26.07.2015.

УДК 661.7:547.458:664.27

Биотехнология получения амилопектина

Е.А. ЦВЕТКОВА, Л.В. ХРУЩЕВА, О.М. ХРАМЧЕНКОВА, Т.В. АРАСТОВИЧ, Н.И. ДРОЗДОВА

Предложена биотехнология получения амилопектина из легко доступного сырья – картофельного крахмала, с использованием антисептической молочной сыворотки. Полученный амилопектин можно использовать как гелеобразующий и желирующий агент в медицине и пищевой промышленности.

Ключевые слова: амилопектин, крахмал, гидроколлоиды, сыворотка, гель.

Biotechnology of obtaining the amylopectin from readily available raw materials – potato starch, using antiseptic whey is offered. Amylopectin obtained can be used as gelling and gelling agent in medicine and food industry.

Keywords: amylopectin, starch, hydrocolloids, whey, gel.

Введение. Одной из важных задач химической, фармацевтической, парфюмерной, пищевой промышленности является обеспечение населения продукцией высокого качества, полученной по безотходным, экономичным и экологически чистым технологиям. Свойства гидроколлоидов, полученных из природного сырья, позволяют эффективно использовать их в качестве основы в производстве.

По химической природе гидроколлоиды представлены двумя видами биополимеров – полисахаридами и белками, особенности которых и определяют индивидуальную специфику поведения каждого из них в гидрофильной среде при различных условиях [1]. Гидроколлоиды включают в рецептуру в количестве менее 1 %, но их влияние на текстуру конечного продукта очень велико. Эффективность действия гидроколлоидов полисахаридной природы и их производных определяется структурными особенностями их молекул: длиной цепи, степенью разветвления, природой мономерных звеньев и функциональных групп, их расположением в молекуле, наличием глюкозидных связей; зависит от состава изделия и способа приготовления [2].

Наиболее доступным веществом полисахаридной природы, которое обладает свойством образовывать коллоидные растворы, является амилопектин, основным источником которого является крахмал. В качестве сырья для производства крахмала используются корнеклубнеплоды и зерновые культуры [3]. Содержание амилопектина в картофельном крахмале составляет около 80 %. Одно из главных свойств амилопектина – образование устойчивых гелей и желе. Их отличительными чертами является отсутствие выделения воды при стоянии или хранении, а также при многократном замораживании – размораживании. Вышеназванные ценные свойства позволяют считать амилопектин одним из наиболее перспективных гидроколлоидов полисахаридной природы.

Разделение крахмала на фракции для получения амилопектина связано с большими трудностями, так как сложно подобрать такие агенты, которые разъединяли бы комплекс амилопектина и амилозы, не затрагивая связей между остатками глюкозы. Сравнительные характеристики амилозы и амилопектина представлены в таблице 1. Получение амилопектина – сложный многостадийный технологический процесс.

В этой связи практический интерес представляет поиск и/или разработка новых экономических способов получения амилопектинов из растительного сырья с использованием натуральных ингредиентов.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики амилозы и амилопектина

Характеристика	Амилоза	Амилопектин
1. Содержание в крахмале, %		
• картофельный крахмал	20 – 21	79 – 80
• кукурузный крахмал	20 – 28	72 – 80
• кукурузный (воск.) крахмал	0,8	99,2
• тапиоковый крахмал	16 – 17	83 – 84
• пшеничный крахмал	20 – 28	72 – 80
• рисовый крахмал	18	82
2. Растворимость в воде	Растворима в горячей воде, растворы неустойчивы – происходит ретроградация	Набухает в горячей воде, образуя клейстеры
3. Окраска с йодом	Синяя	Пурпурная или красная
4. Адсорбция йода	Высокая	Низкая
5. Адсорбция на целлюлозе	Высокая	Низкая
6. Расщепляемость амилазой, %	100	50
7. Реакция с органическими соединениями (1-бутанол)	Образует комплексы	Неспособен связываться с 1-бутанолом и др. органическими соединениями
8. Молекулярная масса	От 500 до 1600	От 10000 до 6 млн.
9. Содержание остатков глюкозы	От 100 до нескольких тысяч	До 50 тысяч
10. Строение	Линейное	Разветвленное

Материалы и методы исследования. Выбор сырья для получения амилопектина обоснован доступностью, ценовым показателем и большим объемом выпуска. Основными базовыми материалами для исследований служили крахмал, молочная сыворотка и сахар-песок.

При проведении исследований применяли картофельный крахмал торговой марки «Моя домашняя кухня» (производитель Гомельский жировой комбинат). Антисептическую молочную сыворотку получали путем сбраживания молочной сыворотки, применяя продукт ОАО «Милка-вита» дрожжами штамма *Saccharomyces acedum lactis-1*, при температуре от 28°C до 32°C в хладотермостате в течение 72 часов до образования гомогенной биомассы с рН равной 4,5–5,0.

Данная культура соответствует *Saccharomyces cerevisiae* (синонимы – *Saccharomyces aceti Santa Maria* 1959, *Saccharomyces acedum lactam*), автор описания – Meyenex Hansen, 1883 г. Штамм дрожжей *Saccharomyces acedum lactis-1* выделен из корня хрена *Armoracia*. Используемая культура отличается высокой ферментативной активностью (таблица 2), также обладает и антибиотической активностью по отношению к грамположительным бактериям и грибам. В процессе ферментации плотность дрожжевых клеток достигает от 2,5 до 3,5 млрд/мл [4].

Таблица 2 – Ферментативная активность дрожжей *Saccharomyces acedum lactis-1*

Штамм	Показатели сбраживания сахаров				
	глюкоза	мальтоза	лактоза	сахароза	крахмал
<i>Saccharomyces lactis</i>	+	–	+	–	–
<i>Saccharomyces acedum lactis-1</i>	+	–	+	+	+

Антисептическая молочная сыворотка обладает следующим антибиотическим потенциалом (таблица 3).

Выбор дрожжей обусловлен тем, что дрожжи занимают доминирующее положение в биотехнологии благодаря тому, что продуцируемые ими метаболиты обладают повышенной лабильностью, которая обуславливает исключительно высокую эффективность ферментативной системы дрожжей. Эта особенность позволяет им выживать при значительных колебаниях температуры, влажности, состава и свойств питательных сред. Дрожжи длительно сохраняют присущие им биосистему и биопотенцию, переходя в анабиоз, что способствует его выживанию в неблагоприятных условиях [5].

Таблица 3 – Антибиотическая активность дрожжевой молочной сыворотки

Тест культуры	Ширина стерильных зон вокруг блоков с препаратом, мм	Пенициллиновый эквивалент активности
<i>Sarcinae flava</i>	7,3	5,0
<i>Staphylococcus albicans</i>	6,0	5,0
<i>Sporolact. sylvestris</i>	6,5	5,0
<i>Bac. subtilis</i>	9,0	5,0
<i>Bac. brevis</i>	12,0	10,0
<i>Bac. thuringiensis</i>	9,7	5,0
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	9,4	5,0
<i>Pseudomonas liquefaciens</i>	8,8	5,0
<i>Cand. scoti</i>	9,1	-
<i>Cand. tenuis</i>	2,0	-
<i>Torul nitralophyla</i>	1,5	-
<i>Penicillium viridae</i>	8,9	-
<i>Aspergillus niger</i>	10,3	-
<i>Trichoderma lignorum</i>	9,0	-

Широкое использование дрожжевой продукции в жизни и деятельности человека объясняется также тем, что они практически безвредны для животных и растений. Более того, некоторые дрожжи применяют для производства лечебно-профилактических препаратов [6]–[10]. На основе пекарских дрожжей *Sacharomyces cerevisiae* получены сотни рас, используемых в пищевой промышленности. Все сахаромицеты активно сбраживают простые углеводы до этилового спирта, синтезируют и аккумулируют витамины группы В и используются в медицине при авитаминозах [11], [12].

Экспериментальные образцы амилопектина получали из крахмала, суспензированного в обогащенной молочной антисептической сыворотке. Для подготовки которой применяли хладотермостат суховоздушный ХТ-3/70-2. Суспензию крахмала в антисептической молочной сыворотке обрабатывали в автоклаве УХQ-LS-18SI. Полученные образцы подвергали экспериментальной проверке методами ИК-спектроскопии (ИК-Фурье спектрофотометр NICOLET 6700), дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК) и микробиологическому анализу, используя тест-культуру кишечной палочки (*Escherichia coli*) из паспортизированных штаммов УО «Гомельский государственный медицинский университет». Методика исследования состояла в выращивании культуры кишечной палочки (*Escherichia coli*) на простой питательной среде – агаре Мюллер-Хинтона в чашках Петри, погружении в нее образца и наблюдении за ростом колоний по наличию или отсутствию зон стерильности.

Результаты исследований. Анализ литературных источников показал, что существующие способы получения амилопектина сопровождаются использованием различных реагентов (бензол, жидкие алифатические углеводы, бромид триметилоксиламмония и др.) и высокой температурой. Наиболее оптимальным решением поставленной задачи является способ [13] получения амилопектина из обычного крахмала путем обработки его водой при постоянном перемешивании при температуре 160 С и выше и давлении насыщенного пара (рН 4–9). В связи с этим для достижения цели нами была применена ферментативная биотехнология, позволяющая снизить температуру обработки сырья и ускорить процесс разделения крахмала на амилозу и амилопектин.

В промышленности крахмал обычно гидролизуют в виде гидросуспензии при температуре 100–150°С, применяя в качестве катализатора серную или соляную кислоту. Сначала происходит ослабление и разрыв связей между макромолекулами амилопектина и амилозы, что сопровождается нарушением структуры крахмальных зерен и образованием гомогенной массы. При дальнейшем действии кислоты в полисахаридах разрываются валентные α -1,4- и α -1,6-глюкозидные связи, и по месту их разрыва присоединяется молекула воды. В растворимое состояние крахмал переходит сравнительно быстро, а гидролизуется значительно медленнее. Поскольку глюкозидные связи разрываются одновременно в различных частях молекул амилозы и амилопектина, образуются продукты с различной молекулярной массой.

Для получения амилопектина использовали три варианта суспензий крахмала: водную, нативной молочной сыворотки и антисептической молочной сыворотки (рН~5).

После смешения исходных компонентов суспензии подвергали термической обработке при разных технологических режимах: давление от 1 до 1,7 атм., температура от 100 С до 140 С и время от 10 до 40 минут. Затем, после охлаждения композиций, отделяли нерастворенную фракцию. Состав композиций представлен в таблице 4

Таблица 4 – Состав композиций (масс. %)

I суспензия	II суспензия	III суспензия
крахмал – 11	крахмал – 11	крахмал – 11
сахар – 22	сахар – 22	сахар – 22
вода – 67	молочная сыворотка – 67	антисептическая молочная сыворотка – 67

Анализ показал, что продукт автоклавирования суспензии (III) в реакции на йод дает красно-фиолетовое окрашивание и нерастворим в холодной воде, а продукты суспензий I и II – не соответствуют требуемым свойствам. Полученные результаты можно объяснить тем, что при обработке крахмала сывороткой, полученной с использованием дрожжей *Saccharomyes acidum lacti*, происходит процесс частичного ферментативного гидролиза крахмала. Так как данная культура отличается высокой ферментативной активностью, а именно сбразивает глюкозу, лактозу сахарозу и крахмал, все последующие эксперименты проводили с использованием дрожжей *Saccharomyes acidum lacti*.

Для оптимизации содержания крахмала в композициях использовали концентрацию крахмала от 15 до 50 грамм в сывороточной суспензии, что составляло от 3 до 11 масс. %. Содержание сахара во всех композициях было постоянным – 22 масс. %, а количество антисептической молочной сыворотки зависело от концентрации крахмала и составляло от 67 до 72 масс. %. Общий объем композиций постоянно соответствовал 500 мл. Исследуемые композиции подвергали автоклавированию, охлаждению и отделению растворенной фракции. Установлено, что оптимальное содержание крахмала в композициях составило 6 масс. %. При большем содержании крахмала в исходной композиции наблюдался его избыток в конечном продукте.

Для выбора режимов автоклавирования пользовались таблицей соответствия давления температуре (таблица 5).

Таблица 5 – Соответствие давления температуре в процессе автоклавирования

Температура, °С	100	102	105	109	112	115	119	121	126	128	134	135
Давление, атм	0	0,1	0,2	0,4	0,5	0,7	0,9	1,0	1,3	1,5	2,0	2,1

Эксперимент показал, что при варьировании температуры и давления автоклавирования, а также времени предварительной выдержки композиции, можно получать вещества с различными свойствами. Особый интерес представляют технологические режимы, отображенные в таблице 6.

Таблица 6 – Технологические режимы эксперимента

Режимы	Предварительная выдержка композиции	Давление, атм	Температура, °С	Время, мин
1	применялась	0,5	105	20 – 30
2	не применялась	1,5	120	20 – 30

При первом технологическом режиме применялась предварительная выдержка композиции в суховоздушном хладотермостате в течение 48–72 часов при температуре ~ 30°С, сопровождающаяся периодическим перемешиванием. Предположительно, при хранении происходил процесс ферментативного гидролиза крахмала. После извлечения из хладотермостата композицию перемешивали и подвергали термической обработке при температуре от 105°С до 110°С и давлении около 0,5 атм в течение 20 минут. В результате были получены продукты неполного гидролиза крахмала (смесь декстринов с глюкозой). Они представляли собой слегка желтоватую, очень вязкую массу сладкого вкуса, характеризующуюся высокой липкостью. Обычно такие смеси декстринов с глюкозой (патока) используют в качестве клея, для загустения красок при нанесении рисунков на ткань, в кондитерской промышленности и т. д.

При втором технологическом режиме, композицию из крахмала, сахара и антисептической молочной сыворотки подвергали автоклавированию ($P = 1,5$ атм. и $T = 120^{\circ}\text{C}$), что привело к получению вещества, при фильтрации которого через марлевые фильтры, происходило разделение на фракции: растворенную – амилозу и нерастворенную – амилопектин. На рисунке 1 представлена экспериментальная партия вещества – амилопектина, полученного при втором режиме автоклавирования. Размеры кристаллов представленных на фотографии соответствуют $\sim 2\text{--}7$ мм.



Рисунок 1 – Внешний вид образцов экспериментальной партии амилопектина

Технологический процесс получения амилопектина схематично можно разделить на пять этапов, от подготовки антисептической молочной сыворотки до блистерной упаковки полученных образцов амилопектина. Технологическая схема получения сывороточного амилопектина представлена на рисунке 2. Количество получаемого конечного продукта – амилопектина, по разработанной технологии, зависит от марки используемого крахмала.

Для подтверждения соответствия полученного материала амилопектину полученное аморфное вещество проверяли на растворимость: не растворимо в холодной воде, а в горячей – образует студенистую часть клейстера. При проведении йодометрии дает красно-фиолетовое окрашивание, что характерно для амилопектина [14].

Анализ фрагментов инфракрасных спектров исследуемых образцов в сравнении с фрагментами стандартного ИК-спектра амилопектина показал достаточно большое совпадение характеристических полос поглощения, соответственно подтверждающих отношение исследуемых образцов к полисахаридам [15]. Наблюдали интенсивные и широкие полосы поглощения: в области 3400 см^{-1} , характеризующие валентные колебания связанных ОН-групп; в области от 2800 до 3000 см^{-1} находятся полосы валентных колебаний СН-групп; полосы при 1740 и 1620 см^{-1} обусловлены валентными колебаниями СН-групп неионизированных и ионизированных кислот, в области от 1400 до 1450 см^{-1} расположены полосы плоских деформационных колебаний СН-групп; в области от 1000 до 1100 см^{-1} находятся полосы колебаний скелета молекулы.



Рисунок 2 – Технологическая схема получения амилопектина

Исследование полученных образцов амилопектина методом дифференциально-сканирующей калориметрии проводили при стандартном режиме нагревания от 20 до 220°C со скоростью 5°C/мин. Появление пиков на кривой ДСК свидетельствовало об изменении энтальпии, связанной с фазовым переходом вещества при температуре около 125°C в расплав. Таким образом, температура плавления находится в соответствующем диапазоне.

В качестве тест-объекта взята культура микроорганизма кишечной палочки *Escherichia coli* ATCC 25922 (кишечная палочка, антибиотикочувствительная, бактерия грамтрицательная). Выбор данного штамма обусловлен доступностью культуры микроорганизма, дешевизной и простой культивирования, широким использованием штамма в подобного рода экспериментах.

Экспериментально установлено угнетение роста тестового штамма кишечной палочки (*E. coli*) вокруг образцов амилопектина. Диаметр зоны подавления роста микроорганизма на плотной питательной среде составил от 3 до 5 мм (рисунок 4).



Рисунок 4 – Зоны подавления роста на культуре *E. Coli*

Заключение. Разработана простая, экономически выгодная и экологически безопасная импортозамещающая биотехнология получения амилопектина из картофельного крахмала с использованием антисептической молочной сыворотки. При варьировании технологических режимов возможно получение материалов с различной степенью гелеобразования, желирования или липкости в зависимости от целей и задач конкретного потребителя.

Литература

1. Филипс, Г.О. Справочник по гидроколлоидам / Г.О. Филипс, П.А. Вильямс ; пер. с англ.; под ред. А.З. Рубинова. – Санкт-Петербург : ГИОДР, 2006. – 535 с.
2. Подвойская, И.А. Перспективы разработки композиций гидроколлоидов Торгового дома / И.А. Подвойская, Д.И. Кучерук // Мясная Индустрия. – 2004. – № 5. – С. 23–24
3. Кнорре, Д.Г. Биологическая химия: учеб. для хим., биол., и мед. спец. вузов / Д.Г. Кнорре, С.Д. Мызина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1998. – 479 с.
4. МПК С12N 1/5, А23С 19/032. Штамм *Saccharomyces acedum lactis*-1 продуцент ферментов сычужного действия.
5. Беккер, М.Е. Структурные перестройки дрожжевых клеток при их переходе в состояния анабиоза и последующих регидратаций и реактиваций / М.Е. Беккер, Б.Э. Дамберг, А.И. Раппопорт // Анабиоз микроорганизмов. – Рига, 1981. – С. 77–135.
6. Новое в систематике и номенклатуре грибов / редкол. Ю.Т. Дьяков, Ю.В. Сергеев. – Москва : Национальная академия микологии. Медицина для всех, 2003. – 494 с.
7. Влияние биологически активной добавки автолизата обогащенных селеном пекарских дрожжей на состояние кишечного барьера у крыс при анофилаксии / М.А. Голубкина [и др.] // Вопросы питания. – 1998. – № 3. – С. 18–21.
8. Эвенштейн, З.М. Ацидофильно-дрожжевое молоко в комплексе мер стимуляции секреторной и кислотообразующей функции желудка у больных туберкулезом легких / З.М. Эвенштейн // Вопросы питания. – 1977. – № 3. – С. 91–92.
9. Чистяков, М.Г. Сравнительные исследования иммуногенеза у крыс, содержащихся на рационах с экспериментальными молочно-яичными продуктами / М.Г. Чистяков, А.П. Парахонский // Вопросы питания. – 1977. – № 1. – С. 57–60.

10. Модифицирующее действие *Saccharomyces boulabor* на биологические свойства энтеробактерий / Д.А. Кирилов [и др.] // Бюл. эксп. биологии и медицины. – 2002. – № 4. – С. 57–59.
11. Саттон, Д. Определитель патогенных и условно патогенных грибов / Д. Саттон, А. Фетергилл, М. Ринальди ; пер. с англ. – М. : Мир, 2001. – 354 с.
12. Сахаромицеты // Биология. Большой энциклопедический словарь. – 3-е изд. – М. : БРЭ, 1998. – С. 560.
13. Патент 3296501 JP, C08B30/20; C08B30/00; (IPC1 – 7): C08B30/20. Method for separating amylase and amylopectin / Takahashi Chie, Ibaraki Takamasa № JP19900098823 19900413 ; pub. 27.12.1991.
14. Гулюк, Н.Г. Крахмал и крахмалопродукты / Н.Г. Гулюк, А.И. Жушман. – Москва : Агропромиздат, 1985. – 240 с.
15. Анализ инфракрасных спектров крахмала [Электронный ресурс] // Крахмал. – Режим доступа : http://www.nprb.ru/uslugi_IR.html. – Дата доступа : 09.12.2013.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступила в редакцию 30.03.2015

Целью настоящей работы являлось картирование территории Гомельской, Могилевской и Витебской областей по комплексному радоновому показателю (КРП), учитывающему ряд факторов, определяющих концентрацию радона, а также картирование радонового риска и сопоставление полученных картографических данных.

Материалы и методика исследований. *Методика комплексного радонового показателя.* Если принять, что в сельских населенных пунктах преобладают одноэтажные деревянные строения с простыми фундаментами и деревянными полами, то можно считать, что поступление радона в помещение определяется, в основном, свойствами подстилающих пород. Исходя из этого, для поиска критических зон радоноопасности можно предложить величину, равную произведению значений факторов, обуславливающих наличия радона в почвах и породах в относительных единицах, которые представляют собой КРП территории.

Так, одним из важнейших факторов, связанных с ОА радона является запас урана в почвах и породах. Принимая во внимание, что уран является материнской породой для образования радона – концентрации урана в почвах будут определять содержание радона и как следствие его ОА. На основе геологической карты Беларуси, на которых показано расположение пород с различным содержанием урана [8] получены данные, которые были нормированы на значение максимального содержания урана в породе (глина), принятое за 1. Следующим показателем, определяющим ОА радона, является мощность экспозиционной дозы. Учитывая, что гамма-фон на местности определяется, в основном, радионуклидами 3-х естественных радиоактивных рядов уранов и тория, а также калия-40 (мощность дозы от которого принята постоянной) – колебания МЭД определяется концентрацией естественных радионуклидов в почвах. Таким образом, МЭД может опосредованно указывать на наличие радона. Для того чтобы исключить влияние искусственных радионуклидов, выпавших на территории Беларуси после аварии на Чернобыльской АЭС, в исследованиях использовались дочернобыльские карты МЭД [9], [10]. Полученные значения были нормированы на максимальную величину – 12 мкР/час, принятую за 1. Необходимо также учитывать, что эксхалация радона зависит от проницаемости почвы, которая в свою очередь, в большей степени, зависит от коэффициента фильтрации радона в грунтах [11]. Исходя из того факта, что период полураспада радона ^{222}Rn составляет около 3,8 суток, скорость его прохождения через слой почвы имеет важное значение, и обуславливает конечную ОА радона в помещениях зданий. Полученные по картам [12] значения коэффициента фильтрации были нормированы на максимальную величину (песчано-гравийная смесь), принятую за 1. Также, важным фактором, определяющим концентрации радона, является уровень залегания первого от поверхности водоносного горизонта. При уровне в 1–2 м от поверхности – почвенный радон почти полностью поглощается, а при уровне более 10 м – весь выделенный радон остается в почвенном воздухе [13]. Значения глубины залегания первого водоносного горизонта были получены по гидрогеологической карте территории Беларуси [14] и нормированы на максимальную величину – 10 м, принятую за 1.

Таким образом, КРП представляет собой произведение значений факторов, обуславливающих наличия радона в почвах и породах в относительных единицах: запас урана в почвах, мощность дозы дочернобыльского фона, проницаемость почв и пород для радона, и глубину залегания первого водоносного горизонта. Данный радоновый показатель можно представить формулой 1:

$$R = U_{отн} \times M_{отн} \times F_{отн} \times W_{отн}, \quad (1)$$

где R – значение комплексного радонового показателя, отн. ед.; $U_{отн}$ – относительное значение запаса урана в почвах и породах, отн. ед.; $M_{отн}$ – относительное значение мощности экспозиционной дозы, отн. ед.; $F_{отн}$ – относительное значение коэффициента фильтрации радона в почве, отн. ед.; $W_{отн}$ – относительное значение уровня залегания первого от поверхности водоносного горизонта, отн. ед.

Обоснование применения данных показателей приводится в работе [15]. На основе значений КРП можно выделить критические зоны радоноопасности, где ряд радиоэкологических показателей и факторов, определяющих концентрацию радона, будут способствовать формированию значительно более высоких ОА радона в помещениях зданий.

Методика по картированию радонового риска. Для составления карты радонового риска были использованы результаты исследований, проведенных ОИЭиЯИ (г. Минск, Сосны) в течение 2005–2014 гг. на территории 3-х областей Республики Беларусь: Гомельской, Могилевской, Витебской [16], [17]. Исследования были выполнены по методике, позволяющей проводить мониторинг радона: «Методики определения объемной активности радона в воздухе жилых и производственных помещений с использованием интегральных радонометров на основе твердотельных трековых детекторов альфа-частиц» (МВИ. МН. 1808-2002) [18]. В среднем, равномерность размещения дозиметров соответствует начальным европейским требованиям: ячейка 10 на 10 км [19]. Количество измерений по областям: Гомельская – 960 в 48 населенных пунктах (НП), Могилевская – 585 в 89 НП, Витебская – 372 в 90 НП. Всего для составления карты было использовано 1917 измерений в 227 НП, в среднем по 7 измерений на НП.

Построение карт радоноопасности. Была сформирована пространственно-скоординированная база данных результатов измерений с применением программного продукта Excel 2003. С помощью встроенных формул обработка и расчет необходимых для определения КРП данных проходила в автоматическом режиме, что значительно оптимизировало проведение работы. База данных включала в себя ряд целевых позиций: географические координаты долготы и широты места измерения, значения КРП, ОА радона; и второстепенных позиций: порядковый номер измерения; значения 4 факторов, входящих в КРП в абсолютных и относительных величинах; полный адрес места измерения и т.д. Процедура построения карты радоноопасности по КРП и радоновому риску была выполнена с применением программного продукта MapInfo10.5. Для построения тематических карт использовалась топооснова со слоями населенных пунктов и границами районов и областей, на которую наносились (согласно географическим координатам) значения КРП или радонового риска. Построение карты проводилось соответствующими программными процедурами с нанесением на рабочую поверхность изолиний согласно 5 градациям значений КРП или ОА радона, указанных на легендах к рисункам 1 и 2. Каждая из 5 градаций была раскрашена в контрастный цвет, причем на обеих картах цвета для соответствующих градаций были одинаковы, для облегчения возможного анализа и сопоставления двух построенных карт.

Результаты исследований и их обсуждение. *Определение радоноопасности территории по комплексному радоновому показателю.* На основании показателей, непосредственно влияющих на ОА радона (содержание урана в почвах, дочернобыльская мощность экспозиционной дозы, коэффициент фильтрации почв для радона, глубинами залегания первого водоносного горизонта) были получены значения КРП. Разработанная карта радоноопасности Гомельской, Могилевской и Витебской областей по КРП представлена на рисунке 1. По карте была проведена комплексная оценка радоновой опасности районов Гомельской, Могилевской и Витебской областей. Все районы Гомельской области имеют низкие значения КРП (до 50×10^{-4} отн. ед.) и низкий уровень радоновой опасности. Это обусловлено достаточно однородными геологическими и экологическими условиями данной территории: малые значения МЭД (до 8 мкР/час), небольшое и среднее содержание урана в почвах ($0-1 \times 10^{-3}$ %), поверхностное залегание первого водоносного горизонта (до 5 м). Средние и высокие значения коэффициента фильтрации почвы (0,027–0,04 отн. ед.). Необходимо выделить Ветковский район, на севере которого значения КРП доходят до 70×10^{-4} отн. ед., что обусловлено повышением содержания урана в почве до $1,75 \times 10^{-3}$ %, глубинами залегания первого водоносного горизонта до 10 м, резкими изменениями в коэффициенте фильтрации почвы (0,004–0,04 отн. ед.).

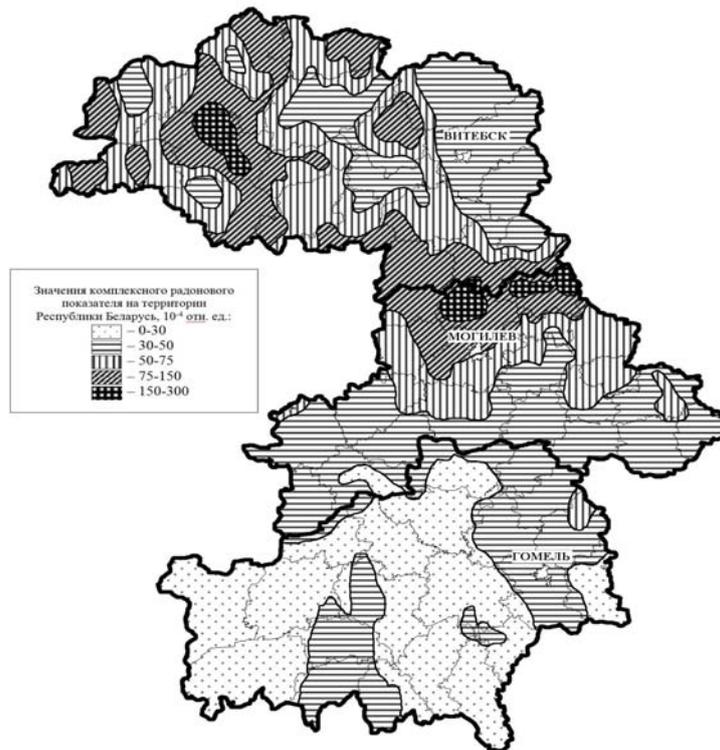


Рисунок 1 – Карта радоноопасности по комплексному радоновому показателю Гомельской, Могилевской и Витебской областей

Районы, расположенные на юго-западе Могилевской области, имеют сходные условия с районами Гомельской области и также характеризуются низким уровнем радоновой опасности (Глусский, Бобруйский, Осиповичский, Кировский, Кличевский). Районы на севере Могилевской области напротив, имеют большие значения КРП ($70-200 \times 10^{-4}$ отн. ед. и более) и высокий уровень радоновой опасности (Круглянский, Шкловский, Горецкий, Бельничский, Могилевский, Дрибинский районы). Это обусловлено высокими значениями МЭД (до 11 мкР/час), значительным содержанием урана в почвах ($1,5-2 \times 10^{-3} \%$), средним и глубоким залеганием водоносного горизонта (7,5–10 м и более), что позволяет радону беспрепятственно проходить через слой почвы. При этом низкие и средние значения коэффициента фильтрации радона в почве (0,004–0,027 отн. ед.) неспособны значительно уменьшить ОА радона. Остальные районы Могилевской области (Мстиславский, Чаусский, Кричевский, Чериковский, Климовичский, Быховский, Славгородский, Краснопольский, Костюковичский, Хотимский районы) имеют средний уровень радоновой опасности с промежуточными значениями КРП ($40-80 \times 10^{-4}$ отн. ед.) и составляющих его показателей.

Районы, расположенные преимущественно в центральной и восточной части Витебской области имеют промежуточные значения КРП ($40-80 \times 10^{-4}$ отн. ед.) и средний уровень радоновой опасности (Полоцкий, Бешенковичский, Городокский, Витебский, Лиозненский, частично Дубровинский). Данные районы характеризуются следующими значениями показателей: МЭД (до 8 мкР/час), содержание урана в почвах ($1,5-2 \times 10^{-3} \%$ и более), глубина залегания первого водоносного горизонта (2,5–7,5 м), коэффициент фильтрации радона в почве (0,004–0,04 отн. ед.). Остальные районы, расположенные в центральной, западной и юго-восточной части Витебской области (Верхнедвинский, Россонский, Браславский, Миорский, Шарковщинский, Поставский, Глубокский, Ушачский, Докшицкий, Лепельский, Чашникский, Сенненский, Толочинский, Шумилинский, Оршанского, частично Дубровинский) имеет большие значения КРП ($70-200 \times 10^{-4}$ отн. ед. и более) и высокий уровень радоноопасности. Это обусловлено высокими значениями МЭД (до 12 мкР/час), значительным содержанием урана в почвах ($1,5-2 \times 10^{-3} \%$ и более), глубоким залеганием первого водоносного горизонта (5–10 м и более) и значительным варьированием значений коэффициента фильтрации радона в почве (0,004–0,04 отн. ед.).

Показано, что наиболее неблагоприятная радоновая обстановка наблюдается для Могилевской области – в Круглянском, Шкловском, Горецком, Бельничском, Могилевском, Дрибинском районах; для Витебской области – в Россонском, Верхнедвинском, Миорском, Шарковщинском, Глубокском, Докшицком, Шумилинском, Толочинском (частично в других районах), где были зарегистрированы критические зоны радоноопасности со значениями КРП от $100 \cdot 10^{-4}$ отн. ед., а местами $200\text{--}300 \cdot 10^{-4}$ отн. ед.

Определение радоноопасности по картированию радонового риска. На основе данных по измерению ОА радона в помещениях зданий была разработана карта радонового риска Гомельской, Могилевской и Витебской областей, которая приведена на рисунке 2.

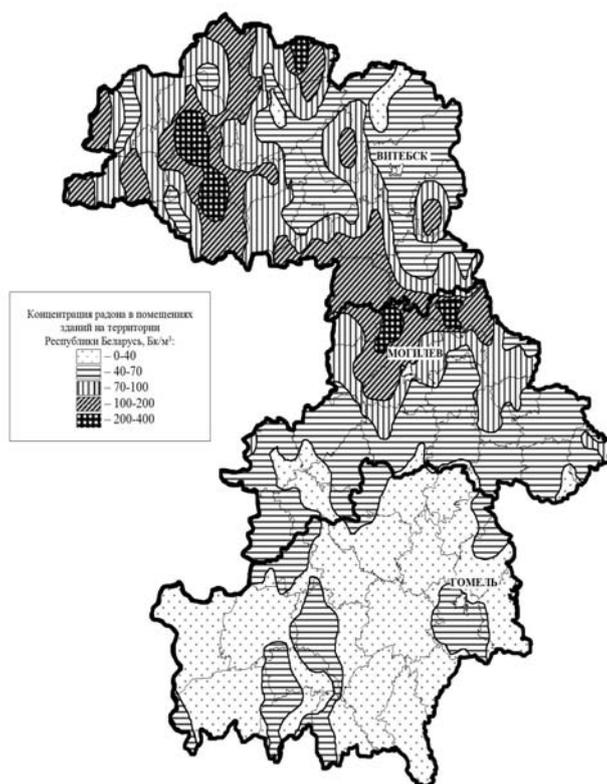


Рисунок 2 – Карта радонового риска Гомельской, Могилевской и Витебской областей

По карте была проведена оценка радоновой опасности районов Гомельской, Могилевской и Витебской областей. Все районы Гомельской области имеют низкие значения ОА радона: $0\text{--}70$ Бк/м³ с возможными единичными измерениями вплоть до 100 Бк/м³. В целом территория Гомельской области достаточно однородна и имеет низкий уровень потенциальной радоноопасности.

Районы, расположенные на юго-западе Могилевской области имеют низкий уровень радоновой опасности: ОА радона находится в пределах $0\text{--}70$ Бк/м³ с единичными измерениями вплоть до 100 Бк/м³ (Кличевский, Осиповичский, Кировский, Бобруйский, Глуский). Районы центральной и восточной части Могилевской области имеют промежуточные значения, с повышением уровня ОА радона до $40\text{--}70$ Бк/м³ и со значительными территориями вплоть до 150 Бк/м³ (Быховский, Чаусский, Славгородский, Чериковский, Краснопольский, Мстиславский, Кричевский, Климовичский, Костюковичский, Хотимский). Районы, расположенные на севере области, представляет зону потенциальной радоноопасности. На данной территории ОА радона находится в пределах $70\text{--}200$ Бк/м³ с ограниченными областями вплоть до 400 Бк/м³ (Круглянский, Шкловский, Горецкий, Бельничский, Могилевский и Дрибинский).

Районы, расположенные преимущественно в центральной и восточной части Витебской области, имеют значения ОА радона в пределах $40\text{--}70$ Бк/м³ с возможными единичными измерениями как в меньшую сторону – $0\text{--}40$ Бк/м³, так и в большую сторону – до 150 Бк/м³ (Полоцкий, Бешенковичский, Городокский, Витебский, частично Лиозненский и Дубровен-

ский). Районы центральной, западной и юго-восточной части Витебской области характеризуется значениями ОА радона в интервале 70–100 Бк/м³, с возможными единичными измерениями в меньшую сторону – 40–70 Бк/м³, и значительными колебаниями ОА радона в большую сторону – до 200 Бк/м³, а также с ограниченными областями вплоть до 400 Бк/м³ (Верхнедвинский, Россонский, Браสลавский, Миорский, Шарковщинский, Поставский, Глубокский, Ушачский, Докшицкий, Лепельский, Чашникский, Сенненский, Толочинский, Шумилинского, Оршанского, частично Лиозненского и Дубровенского).

Показано, что наиболее неблагоприятная радоновая обстановка наблюдается для Могилевской области – в Круглянском, Шкловском, Горецком, Бельничском, Могилевском, Дрибинском районах; для Витебской области – в Россонском, Верхнедвинском, Миорском, Шарковщинском, Глубокском, Докшицком, Шумилинском, Толочинском районах, где были зарегистрированы критические зоны радоноопасности со значениями ОА радона от 100 Бк/м³ до 400 Бк/м³.

Заключение. Методика по определению радоноопасности территории по комплексному радоновому показателю (КРП) учитывает целый ряд факторов [15]. С его помощью можно определить географическое положение критических зон радоноопасности и составить тематические карты этих территорий без проведения дорогостоящих, длительных, широкомасштабных исследований. При этом для принятия конкретных решений по дальнейшему проведению противорадиационных контрмер необходимо в критических зонах радоноопасности провести детальные исследования среднегодовых значений ОА радона в помещениях зданий [3]. Согласно методике определения радоноопасности по картированию радонового риска специалистами ОИЭиЯИ проведен широкомасштабный мониторинг радона в воздухе зданий Гомельской, Могилевской и Витебской областей, на основе которого составлена карта радонового риска. Необходимо отметить, что результаты, полученные по обеим методикам, являются схожими, и каждая из них может быть использована для анализа радоновой обстановки. По обеим методикам показано, что наиболее неблагоприятные условия по радону наблюдается для Могилевской области в Круглянском, Шкловском, Горецком, Бельничском, Могилевском, Дрибинском районах; для Витебской области в Верхнедвинском, Россонском, Миорском, Шарковщинском, Глубокском, Докшицком, Толочинском, Шумилинском районах (частично в ряде других районов). Наиболее целесообразным будет применение методики комплексного радонового показателя с целью снижения финансово-временных затрат и сужения площади исследований до территории потенциальных критических зон радоноопасности, и последующее исследование среднегодовых значений ОА радона на данных территориях с картированием радонового риска. Также, методика комплексного радонового показателя будет способствовать большей информативности процесса исследования радоновой обстановки учитывая ряд радиоэкологических и геологических особенностей местности.

Литература

1. Радиация. Дозы, эффекты, риск ; пер с англ. Ю.А. Банникова. – М. : Мир, 1990. – 79 с.
2. Радон и рак: информационный бюллетень / № 291. – Всемирная организация здравоохранения – М., 2005. – 4 с.
3. Риск возникновения рака легкого при облучении радоном и продуктами его распада. Заявление по радону / под ред. М.В. Жуковского, С.М. Киселева, А.Т. Губина ; перевод публикации № 115 МКРЗ. – М. : ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бунацына ФМБА России, 2013. – 92 с.
4. Защита от радона-222 в жилых зданиях и на рабочих местах / Публикация № 65 МКРЗ. – М. : Энергоатомиздат, 1995. – 78 с.
5. Бекман, И.Н. Радон: враг, врач и помощник / И.Н. Бекман. – М. : МГУ, 2000. – 205 с.
6. Матвеев, А.В. Концентрации радона в почвенном воздухе на смежных площадях Белорусской антеклизы и Припятского прогиба (Беларусь) / А.В. Матвеев, Л.А. Нечипоренко, В.В. Лосич, А.П. Иваненко // Природопользование. – 2012. – Вып. 21. – С. 68–74.
7. Akerblom, G. The Radon Book / G. Akerblom, R. Clavensjo. – Stockholm : SSM, 1994. – 256 p.
8. Шагалова, Э.Д. Содержание урана-238 в почвах Беларуси / Э.Д. Шагалова // Почвоведение. – 1986. – № 2. – С. 140–145.

9. Лукашев, К.И. Геохимические провинции покровных отложений БССР / К.И. Лукашев // Академия наук Белорусской ССР. – Минск : Наука и Техника, 1969. – С. 462–470.
10. Булыгин, Б.П. Инструкция по гамма-каротажу при массовых поисках урана: утв. Мин. Геологии СССР 01.09.1981 г. / Б.П. Булыгин [и др.]. – СПб : Министерство Геологии СССР, 1982. – 101 с.
11. Адушкин, В.В. Поля почвенного радона в восточной части Балтийского щита / В.В. Адушкин, И.И. Дивков, С.А. Кожухов // Динамические процессы в системе внутренних и внешних взаимодействующих геосфер. – М. : Геос, 2005. – С. 173–178.
12. Беляшов, А.В. Оценка гидрогеологических параметров по данным геофизических исследований в скважинах: Методическое руководство / А.В. Беляшов [и др.]. – Минск : Фонды геофизической экспедиции, 2008. – 43 с.
13. Выполнение комплексной геофизической съемки на площадке возможного размещения АЭС и прогноз миграции радионуклидов с подземными водами (Шкловско-Горецкий пункт, Кукшиновская площадка) : Отчет о НИР (закл.) / Бел. геофиз. экспед ; рук. темы А.В. Гаврилов. – Минск, 2008. – 257 с.
14. Богомоллов, Г.В. Гидрогеологическая карта четвертичных отложений Белорусской ССР / Г.В. Богомоллов [и др.]. – Минск, 1963.
15. Чеховский, А.Л. Обоснование применения компонентов радонового показателя для картирования радонового потенциала / А.Л. Чеховский // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2014. – № 6 (87). – С. 100–106.
16. Отчет о НИР (закл.) / Объединенный Институт энергитических и ядерных исследований ; рук. О.И. Ярошевич. – Минск ; Гомельский областной Центр гигиены, эпидемиологии и общественного здоровья ; рук. В.Н. Бортновский. – Гомель, 2008. – 170 с.
17. Карабанов, А.К. Радон и дочерние продукты его распада в воздухе зданий на территории Беларуси / А.К. Карабанов, Л.А. Чунихин, А.Л. Чеховский, Д.Н. Дроздов, О.Я. Ярошевич, И.В. Жук, М.В. Конопелько, А.В. Матвеев // Природопользование. – 2015. – Вып. 27. – С. 49–53.
18. Методика определения объемной активности радона в воздухе жилых и производственных помещений с использованием интегральных радонометров на основе твердотельных трековых детекторов альфа-частиц. – МВИ. МН 1808-2002. – Минск, 2002. – 18 с.
19. Friedmann, H. Final results of the Austrian radon project / H. Friedmann // Health Physics. – 2005. – Vol. 89, № 4. – P. 339–348.

ИНФОРМАТИКА

УДК 004.052

Изменение подходов к безопасной загрузке операционных систем

А.В. ВОРУЕВ, В.И. РАГИН, А.И. КУЧЕРОВ, В.Д. ЛЕВЧУК

Рассмотрено предложение об организации безопасного вычислительного процесса и регулирование профилактики компьютерных вирусов в сетевых структурах. Описан ряд вариантов организации загрузки операционных систем из фиксированных образов. Описывается применение программных и аппаратных средств для реализации управляемой сетевой загрузки.

Ключевые слова: операционная система, сервер, тонкий клиент, ЛВС.

The proposal to organize safe computing process and control of prevention from computer viruses in the network structures are considered. A number of options for booting operating systems from fixed images are described. The use of software and hardware to implement a managed network boot is shown.

Keywords: operating system, server, thin client, LAN.

Введение. Точкой отсчета в появлении компьютерных вирусов можно считать труды известного ученого Джона фон Неймана по изучению самовоспроизводящихся математических автоматов, о которых стало известно в 1940-х гг. В 1951 г. он предложил способ создания таких автоматов. А в 1959 г. журнал *Scientific American* опубликовал статью Л.С. Пенроуза, посвященную самовоспроизводящимся механическим структурам. В ней была описана простейшая двумерная модель самовоспроизводящихся механических структур, способных к активации, размножению, мутациям, захвату. Позднее другой ученый Ф.Ж. Шталь реализовал данную модель на практике с помощью машинного кода на IBM 650 [1].

Основными путями проникновения вирусов в компьютеры, используемые в учебном процессе, являются сменные диски (гибкие и лазерные), а также компьютерные сети. Заражение жесткого диска вирусами может произойти и при загрузке программы с твердотельного накопителя (флешки), содержащей вирус. Вирус может попасть на сам носитель, даже если носитель просто подключили к системе зараженного компьютера и, например, прочитали ее оглавление.

Поскольку, компьютеры, применяемые для решения задач предприятия, объединены в компьютерные сети и имеют однотипные настройки операционной системы дальнейший сценарий развития событий чаще всего попадает в схему, удобную для распространения вирусов типа *сетевой червь*.

В 1988 г. Робертом Моррисом-младшим было анонсировано перед научным сообществом понятие «массовый сетевой червь». Прототип программы разрабатывался в конце 1990 г. с расчётом на поражение операционных систем UNIX Berkeley 4.3. Вирус изначально разрабатывался как безвредный и имел целью лишь скрытно проникнуть в вычислительные системы, связанные сетью ARPANET, и остаться там необнаруженным. Вирусная программа включала компоненты, позволяющие раскрывать пароли, имеющиеся в инфицированной системе, что, в свою очередь, позволяло программе маскироваться под задачу легальных пользователей системы, на самом деле занимаясь размножением и рассылкой копий. Вирус не остался скрытым и полностью безопасным, как задумывал автор, в силу незначительных ошибок, допущенных при разработке, которые привели к стремительному неуправляемому саморазмножению вируса [1].

По самым скромным оценкам инцидент с червём Морриса стоил свыше 8 миллионов часов потери доступа и свыше миллиона часов прямых потерь на восстановление работоспо-

способности систем. Общая стоимость этих затрат оценивается в 96 миллионов долларов (в эту сумму также включены затраты по доработке операционной системы). Ущерб был бы гораздо больше, если бы вирус изначально создавался с разрушительными целями.

Червь Морриса поразил свыше 6200 компьютеров. В результате вирусной атаки большинство сетей вышло из строя на срок до пяти суток. Компьютеры, выполнявшие коммутационные функции, работавшие в качестве файл-серверов или выполнявшие другие функции обеспечения работы сети, также вышли из строя.

Для решения вопросов, связанных с регулярным перезаражением операционных систем и предотвращением их несанкционированного использования в целях злоумышленников, высокую эффективность показало применение следующих технологий:

- применение «тонких клиентов»;
- реализация централизованной загрузки клиентских операционных систем.

Применение «тонких клиентов». «Тонким» клиентом или терминалом называют пользовательскую вычислительную систему, ресурсов оборудования которой недостаточно для автономной работы. В этом случае обслуживание вычислительного процесса осуществляется удаленной мощной вычислительной системой – сервером [2].

На рисунке 1 отражены некоторые возможные варианты архитектур программных систем с «тонкими клиентами» разного уровня «толщины».



Рисунок 1 – Четыре уровня толщины «тонкого клиента»

Преимущества использования «тонких» клиентов:

- высокий уровень безопасности: непосредственно на пользовательских терминалах отсутствует возможность хранения конфиденциальных данных; все данные хранятся на серверах, где регулярно и централизованно резервируются;
- высокая надежность и длительный срок службы: тонкие клиенты служат дольше и реже выходят из строя; терминалы морально не устаревают рост требований к программному обеспечению вызывает лишь необходимость модернизации ядра системы, то есть сервера;
- уменьшение затрат на обслуживание, администрирование: установка нового и обновление существующего программного обеспечения происходит значительно быстрее и проще; наличие «контролируемой» среды на терминалах не позволяет пользователям запускать неразрешенные администратором приложения.

Низкий уровень требования к оборудованию позволяет разработчикам устройств данного типа до предела их минимизировать и компактно разместить в ограниченном объеме.

Производительность прогнозируется низкая. Из этого положения следует два вывода:

- тепловыделение настолько мало, что устройство практически не нуждается в охлаждении, а, соответственно, не шумит;
- мощность, потребляемая устройством для своей работы, настолько низкая, что обеспечить его достаточным уровнем энергоснабжения можно, используя бытовой блок питания +5V, либо используя технологию PoE (Power over Ethernet).

Работая с тонким клиентом, путь информационного обмена при загрузке операционной системы значительно увеличивается относительно локальной загрузки. Что видно на рисунке 2. Такой метод эффективно применяется в случае низких нагрузок единичного пользователя и при необходимости развернуть большое количество дешевых рабочих мест [3].

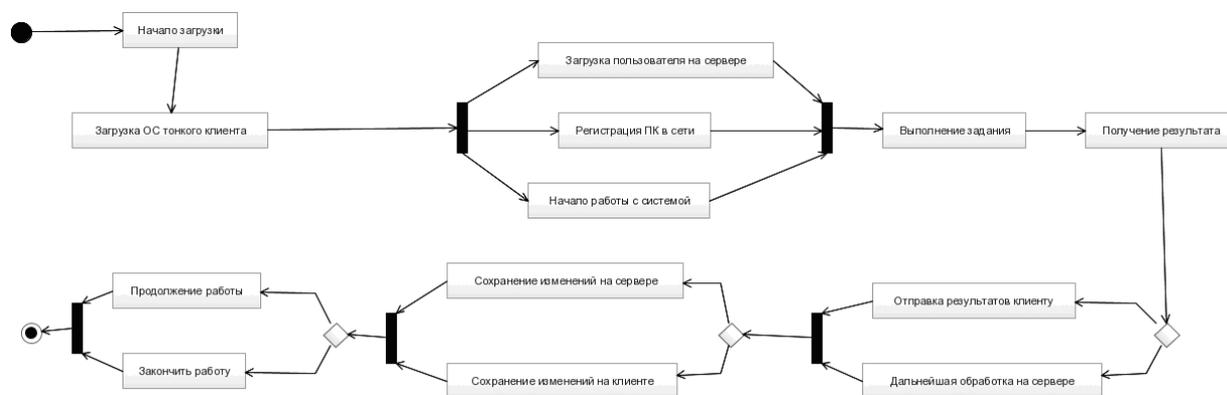


Рисунок 2 – UML диаграмма процесса загрузки тонкого клиента

При типовой работе трафик от клиента к серверу не превышает одного килобайта в секунду. Трафик в обратном направлении (сервер->клиент) составляет несколько десятков килобайт в секунду. Максимальное значение, достигнутое в ходе сеанса при открытии окна IE с графикой и динамическими flash-баннерами на mail.ru – 106664 байт/с. Среднее значение трафика составляет около 5–6 Кбайт/с (работа с браузером, просмотр документов MS Word без графики, открытие и работа программ со стандартными элементами пользовательского интерфейса). Такой низкий трафик достигается не только компрессией передаваемых данных (доходит до 300 %), но и, главным образом, тем, что во время сеанса клиенту передаются только команды на локальное отображение элементов пользовательского интерфейса (окна, кнопки, шрифтовое оформление) вместо их изображения [4].

Превышение максимальной пропускной способности канала не приводит к сбою, а лишь вызывает замедление обновления экрана клиента. Это позволяет при необходимости работать даже через модемное соединение с полосой пропускания 2–5 Кбит/с. Если принять за номинальную рабочую полосу пропускания Ethernet сети 100 Мбит, то данная полоса дает возможность работать либо 20–30 клиентам в режиме серьезной нагрузки без задержки обновления экрана, либо до 500 клиентов в режиме обычной офисной работы без активной динамической графики, требующей постоянной пересылки графических изображений на экран.

Несмотря на то, что использование «тонких клиентов» может серьезно исправить ситуацию с вирусной опасностью в сети учреждений образования, есть в этой технологии ряд серьезных недостатков, ограничивающих их применение для решения поставленной задачи:

- как правило, аппаратная составляющая «тонкого клиента» оптимизирована для работы одного семейства операционных систем, что сужает число дисциплин, которые можно проводить в учебной аудитории;

- при подготовке специалистов в области программирования требуется большое число ресурсов вычислительной системы, что спровоцирует перегрузку оборудования на стороне сервера, увеличит нагрузку на сеть передачи данных и, как следствие, снизит скорость взаимодействия пользователей с интерфейсом на рабочем месте;

- работа с системами обработки графических данных и нелинейной обработки видео будет крайне затруднена, либо требует специализированных программных средств, оптимизированных исключительно для терминальных систем.

Тонкий клиент хорошо подходит для использования в бухгалтерии, офисах и т. п., где нет высоких запросов ко времени обработки данных и прямого доступа к устройствам.

Сравнение и реализация технологий клиентских станций. В современном производственном процессе бездисковая загрузка мало представлена, однако на определенные ти-

пы задач (работа с графикой, звуком, обучение студентов) она является наиболее выгодной как экономически, так и с точки зрения безопасности.

Для аргументации использования этого метода загрузки, нам необходимо сравнить, насколько различается взаимодействие пользователей с локальной и удаленной машиной.

На рисунке 3 показан процесс взаимодействия с ПК пользователя локальной системы. Это классическая система работы и предполагаемый переход на удаленную загрузку является попыткой оптимизации ресурсов и упрощения администрирования системы в целом [5]. Рисунок 4 показывает ту же самую работу, но с использованием удаленной загрузки.

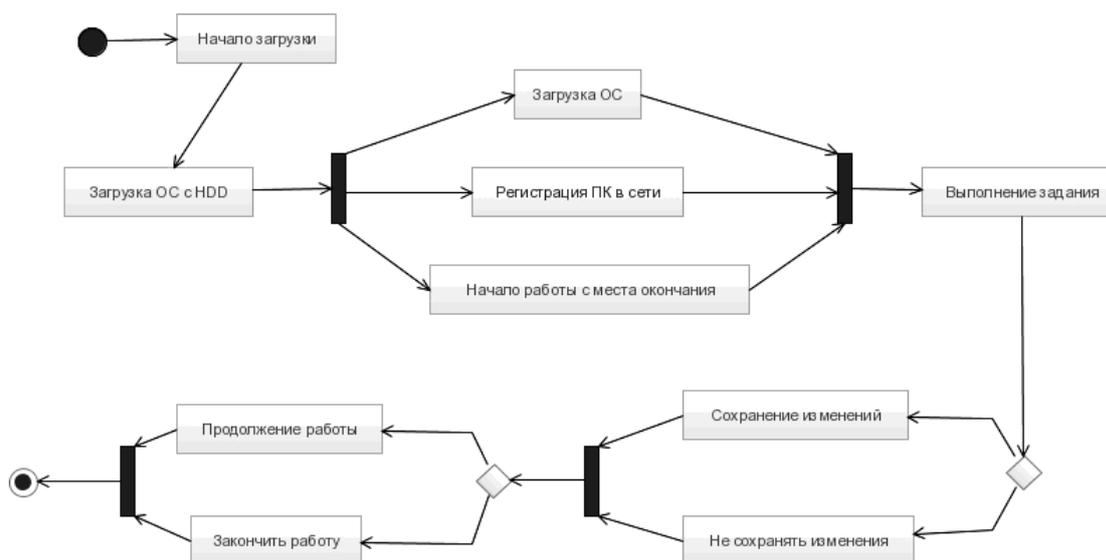


Рисунок 3 – UML диаграмма процесса локальной загрузки

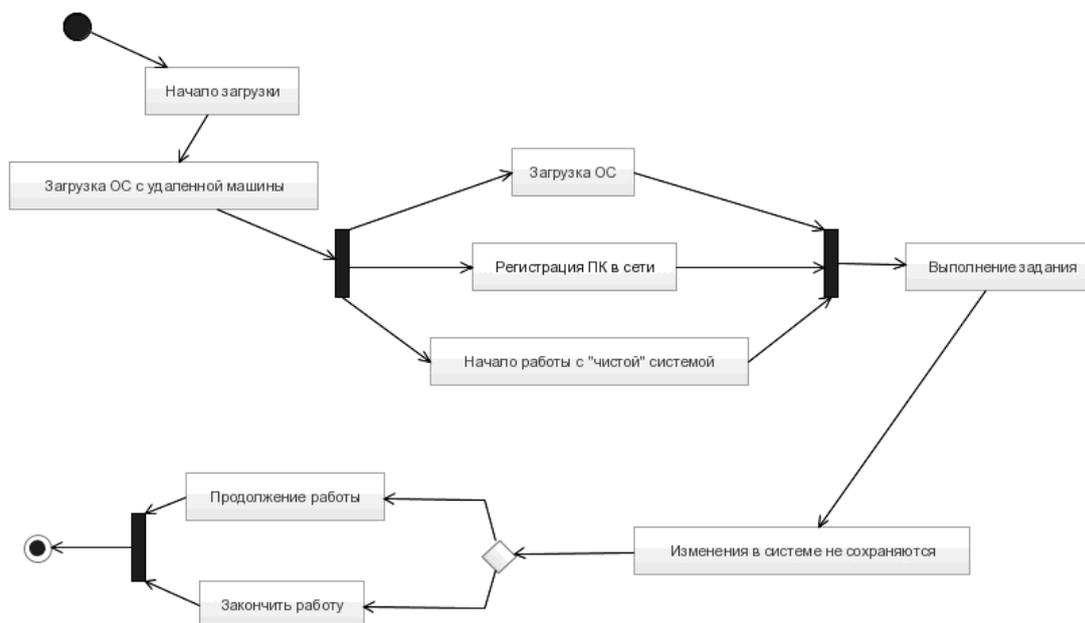


Рисунок 4 – UML диаграмма процесса удаленной загрузки

Как видно, принципиальных отличий не существует. Для пользователя, разница заключается лишь в невозможности сохранить результат изменения самой системы (хотя и это ограничение является гибко настраиваемым). Это же ограничение распространяется на вирусы или любой другой нелегитимный программный код.

Несмотря на действия защиты методом запрета, у пользователя остаётся широкий круг возможностей. Раньше, при реализации политики доменов в локальных машинах, требова-

лось ограничивать пользователей в административных правах. В данном случае этот пункт является условным. Никакие изменения, сделанные в ходе сеанса работы, не сохраняются при последующей перезагрузке.

Использование iSCSI для решения задач толстого клиента. Для реализации прототипа удаленной загрузки был выбран StarWind iSCSI SAN с бесплатной лицензией [6]. За серверную платформу был взят MS Server 2012, бесплатный для студентов, преподавателей и учебных заведений. MS Server включает в себя большинство необходимых служб и настроек:

- встроенный TFTP сервер из состава компонент служб развертки;
- DHCP и NAT. При настройке особое внимание необходимо обратить на дополнительные параметры DHCP, параметры 66, 67, с их помощью мы задаем имя загружаемого файла и IP сервера TFTP;
- DNS и Active Directory для соединения с сетевыми учетными записями, если данные службы не активированы во внешней сети.

Образ системы устанавливается на виртуальной машине и настраивается, обязательна установка CCboot инициатора. По завершению настройки система конвертируется в .img образ с помощью StarWind V2V Image Converter. Полученный образ добавляется в StarWind iSCSI SAN и настраивается таргет. Раздача образов определяется MAC адресом машины.

Подключенный образ можно настроить как на запись, так и на отклонения сделанных изменений в системе. Во время первой загрузки необходимо обновить драйвера и ПО, а также произвести персональную настройку рабочего места. Сделанные изменения сохраняются в файле snapshot и могут быть использованы при следующей загрузке системы, не внося изменения в основной образ. После настройки файл snapshot также блокируется для записи.

Пример реализации удаленной загрузки. При разработке прототипа, сеть реализации загрузки размещалась в пределах одного помещения и состояла из сервера, маршрутизатора, персональных ПК для удаленной загрузки, а также подключения к общей сети и раздаче сервиса Wi-Fi [7]. Сервер используется для задач DHCP, NAT, PXE, iSCSI. Во всей схеме, сервер одно из «узких мест», соответственно, необходимо сохранить максимум ресурсов на основные задачи. Вторым «узким местом» является пропускная способность коммутатора, что крайне сказывается на первичной загрузке, это можно отследить на рисунке 5.

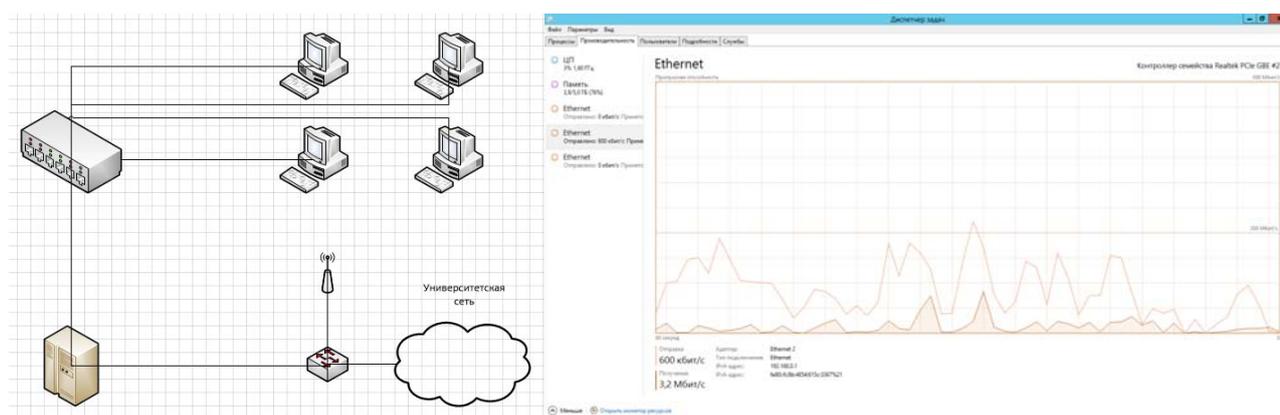


Рисунок 5 – Компонентная схема и график загрузки прототипа сети для загрузки с образов

В сети присутствует соединение 100 Мб/с с общей сетью и соединение 100 Мб/с с пользовательскими станциями. Между коммутатором и сервером канал 1 Гб/с. На графике видно, что даже одна пользовательская станция в такой конфигурации сети при загрузке полностью использует 100 Мб/с канал, т. е. всю полосу пропускания. Этот факт сказывается на скорости загрузки операционной системы - примерно от 90 до 120 секунд.

В измененной схеме (рисунок 6) сеть лишается основных недостатков.

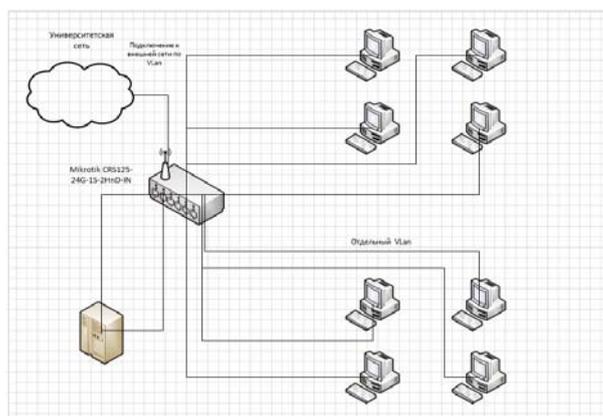


Рисунок 6 – Изменение компоновки сети для загрузки пользовательских станций с образов

Теперь надобность в NAT отпадает, что освобождает ресурсы сервера. За разделение и передачу трафика между VLAN, используется маршрутизатор Mikrotik CRS125-24G-1S-2HnD-IN. Каналы связи по всем направлениям поддерживают скорость 1 Гб/с, также маршрутизатор является точкой Wi-Fi. На сервере остается только нагрузка DHCP, iSCSI, PXE.

Литература

1. История компьютерных вирусов [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа : http://ru.wikipedia.org/wiki/История_компьютерных_вирусов. – Дата доступа : 20.02.2015.
2. Воруев, А.В. Архитектура ЭВМ / А.В. Воруев, О.М. Демиденко, А.И. Кучеров, В.Н. Кулинченко, В.Н. Леванцов // Учебно-методическое пособие Рекомендовано УМО вузов Республики Беларусь по образованию в области информатики и радиоэлектроники в качестве учебно-методического пособия для студентов учреждений, обеспечивающих получение высшего образования «Автоматизированные системы обработки информации». – ГГУ им. Ф. Скорины. – Гомель : 2011. – 192 с.
3. Официальный сайт программы управления данными Starwind [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа : <http://ru.starwindsoftware.com/>. – Дата доступа : 25.11.2014.
4. Коллективный блог [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа : <http://habrahabr.ru/>. – Дата доступа : 25.12.2014.
5. Моримото, Р., Ноэл, М. Microsoft Windows Server 2012. Полное руководство / Р. Моримото, М. Ноэл. – М. : ООО «Вильямс», 2013. – 1456 с. : ил.
6. Официальный сайт Starwind [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: <http://ru.starwindsoftware.com/>. – Дата доступа : 25.11.2014.
7. Демиденко, О.М., Левчук, В.Д., Кучеров, А.И. Функциональные возможности программного комплекса адаптивной идентификации пользователей корпоративной сети / О.М. Демиденко, В.Д. Левчук, А.И. Кучеров // Проблемы, физики, математики и техники. – 2010. – № 3 (4). – С. 69–73.

УДК 581.3.06:624.131

Компьютерный анализ эффективности пакетного вертикального армирования грунтовых оснований плитных фундаментов

С.В. КИРГИНЦЕВА

Методом компьютерного моделирования исследуется эффективность использования пакетного вертикального армирования грунтовых оснований большеразмерных плитных фундаментов с целью повышения их несущей способности.

Ключевые слова: моделирование, плитный фундамент, грунты, несущая способность, пакетное вертикальное армирование.

The method of computer modeling investigates the efficiency of the reinforcing of the soil bases of large slab foundations for the purpose of increase their bearing ability.

Keywords: modeling, slabby base, the soil, bearing ability, batch vertical reinforcing.

Введение. Задача удешевления жилья всегда являлась очень актуальной. Вкладом в решение этой проблемы может быть использование рациональных конструкций фундаментов и подготовка грунтовых оснований фундаментов возводимых зданий и сооружений при условии обеспечения необходимой несущей способности грунтов: подсыпка, уплотнение, армирование грунтов [1], [2]. В данной работе рассматривается эффективность использования вертикального пакетного армирования грунтовых оснований плитных фундаментов с целью повышения несущей способности грунтов и, как следствие, удешевления стоимости фундаментов возводимых зданий. Пакет представляет некоторую подобласть грунта, содержащую горизонтальные и вертикальные армирующие элементы, а также грунт. Горизонтальными элементами являются армирующие материалы в виде пленок, полос из не гниющего и не поддающегося коррозии материала: стекловолокно, различные полимерные материалы, которые сверху и снизу ограничивают пакет. Внутри пакета на некотором расстоянии друг от друга расположены вертикальные сваи различных размеров и степени жесткости. Грунт внутри вертикального армирующего пакета может быть уплотнен. При этом степень уплотнения определяется расчетным или экспериментальным путем. Физико-механические характеристики элементов также могут быть определены расчетным методом или экспериментальным.

Фундамент, грунтовое основание и вертикальный армирующий пакет образуют единую сложную нелинейную физическую систему. Для исследования данной системы используется компьютерное объектно-ориентированное моделирование, в основе которого содержится понятие объекта системы, его свойств и связей; при этом используются методы математического и геометрического моделирования, объектно-ориентированное программирование и методы вычислительного эксперимента.

Общая постановка задачи. Рассмотрим задачу о взаимодействии большеразмерного плитного фундамента и армированного вертикальным пакетом нелинейно-деформируемого грунтового основания. В качестве базовой задачи рассмотрим задачу исследования деформирования однородного грунтового основания фундаментной плиты. Необходимо исследовать эффективность использования армирующего вертикального пакета в нелинейно-деформируемом грунтовом основании, а также влияние количества и физико-механических характеристик горизонтальных и вертикальных элементов армирующего пакета на осадку указанного типа фундамента. В формализованной постановке данная задача является третьей многокритериальной краевой задачей нелинейной математической физики (задача Дирихле-Неймана) [3].

Решение поставленной задачи было получено методом компьютерного моделирования на основе метода конечных элементов при использовании метода энергетической линеаризации с помощью программного комплекса «Энергия-3D» в линейной и нелинейной постановках [4], [5].

Математическая модель физической системы. Ядро математической модели строится на основе принципа минимума полной энергии системы. Для краевых задач нелинейной механики грунтов математическая модель исследуемой сложной нелинейной физической системы будет иметь вид [4]:

1. Геометрическая модель деформируемой среды.
2. Механико-математическая модель элементов системы
 - при линейно – упругом деформировании: $\sigma_i = E\varepsilon_i$,
 - при нелинейно – упругом деформировании: $\sigma_i = A\varepsilon_i^m$, $A > 0$, $0 < m < 1$,

где σ_i, ε_i – интенсивности напряжений и деформаций, E – модуль деформации, A, m – параметры закона нелинейного деформирования.

3. Система краевых условий задаётся в соответствии с классификацией поставленной задачи как краевой задачи математической физики.

4. Условия равновесия системы (ядро математической модели):

$$\frac{\delta \Pi}{\delta \{U\}} = 0,$$

где $\Pi = \frac{1}{2} \int_V \{\varepsilon\}^T \{\sigma\} dV - \{U\}^T \{P\}$ – полная энергия деформируемой системы; $\{P\}$ – вектор внешних сил, $\{\sigma\}, \{\varepsilon\}, \{U\}$ – векторы напряжений, деформаций и перемещений, V – объём области существования исследуемой системы.

5. Математическая модель (форма) искомого решения:

$$\varphi = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 y + \alpha_3 z.$$

Компьютерное моделирование упрочнения грунтового основания большеразмерного плитного фундамента методом пакетного вертикального армирования и анализ результатов. Исследовано множество модельных задач в трехмерном пространстве в одной и той же дискретизованной области, в силу симметрии их численное решение проводилось для одной четверти деформируемой области. Размеры расчётной области определены на основании экспериментальных исследований: $790 \times 790 \times 250,6$ см.

Элементами рассматриваемой сложной нелинейной физической системы «Плитный фундамент – грунтовое основание» являются:

1. Прямоугольная фундаментная плита размерами $230 \times 230 \times 20$ см с характеристиками $E_{пл} = 20000$ МПа, $\mu_{пл} = 0,15$.
2. Однородное основание из минерального грунта с характеристиками $E_{гр} = 12$ МПа, $\mu_{гр} = 0,27$.
3. Армирующий вертикальный пакет, состоящий из армирующих горизонтальных пленок ($E_{пленок} = 100-3000$ МПа, $\mu_{пленок} = 0,2$), армирующих вертикальных свай ($E_{свай} = 1000-20000$ МПа, $\mu_{свай} = 0,3$) и уплотненного грунта внутри армирующего вертикального пакета. Степень уплотнения грунта принята равной $k_{упл} = 7$.

Схема дискретизации $\frac{1}{4}$ расчетной области плитного фундамента на армированном вертикальным пакетом грунтовом основании представлена на рисунке 1.

Осадка большеразмерной фундаментной плиты указанных размеров на однородном грунте составила 2,90 см и 5,46 см при линейном и нелинейном деформировании грунта соответственно.

Исследовалось влияние количества и физико-механических характеристик горизонтальных и вертикальных элементов армирующего вертикального пакета в грунтовом основании на осадку указанного типа фундамента. Результаты вычислений приведены в таблицах 1 и 2.

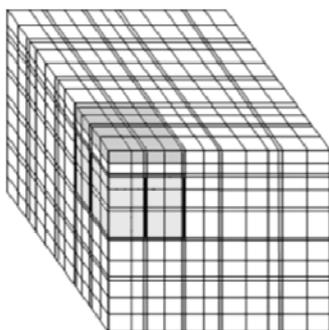


Рисунок 1 – Дискретизация $\frac{1}{4}$ расчетной области

В таблице 1 показаны осадки плитного фундамента на армируемом вертикальным пакетом грунтовым основанием со следующими характеристиками армирующего пакета: глубина заложения пакета от поверхности плитного фундамента $h = 46$ см; длина горизонтальных пленок $l_{\text{пленок}} = 115$ см; толщина армирующего пакета $H = 100,6$ см; толщина армирующих пленок $h_{\text{пленок}} = 0,3$ см.

Данные таблицы 1 подтверждают неэффективность использования двух армирующих пленок в пакете: несущая способность однородного грунта повышается менее чем на 1 %. Однако уплотнив грунт внутри армирующего пакета из двух пленок в 7 раз, представляется возможным уменьшить осадку фундаментной плиты до 18 % при линейном деформировании и 15 % при нелинейном деформировании грунтового основания.

Использование в пакете одной, двух, трех или четырех армирующих вертикальных свай диаметром $d = 10$ см и длиной $l = 100$ см с модулем упругости материала свай $E_{\text{свай}} = 1000$ МПа позволит уменьшить осадку плиты до 12 % при линейном и нелинейном деформировании. Уплотнив при этом грунт внутри армирующего пакета, осадка плиты падает до 20 % и 18 % при линейном и нелинейном деформировании соответственно.

Таблица 1 – Осадки плитного фундамента на армированном грунтовым основании в зависимости от количества и физико-механических характеристик элементов вертикального армирующего пакета (см)

$E_{\text{пленок}}, \text{МПа}$		100								3000							
$d_{\text{свай}}, \text{см}$		10				15				10				15			
$E_{\text{свай}}, \text{МПа}$	S^{nl}	S^l	$S^l_{\text{упл}}$	S^H	$S^H_{\text{упл}}$	$S^l$	$S^l_{\text{упл}}$	$S^H$	$S^H_{\text{упл}}$	$S^l$	$S^l_{\text{упл}}$	$S^H$	$S^H_{\text{упл}}$	$S^l$	$S^l_{\text{упл}}$	$S^H$	$S^H_{\text{упл}}$
	$n_{\text{свай}}$																
Без свай		2,89	2,39	5,45	4,68	2,89	2,39	5,45	4,68	2,88	2,38	5,42	4,66	2,88	2,38	5,42	4,66
1000	1	2,80	2,38	5,29	4,65	2,72	2,37	5,15	4,61	2,77	2,37	5,20	4,62	2,70	2,36	5,08	4,58
	2	2,70	2,35	5,07	4,58	2,56	2,31	4,81	4,48	2,67	2,34	4,96	4,55	2,55	2,30	4,75	4,45
	3	2,63	2,35	4,94	4,55	2,48	2,31	4,66	4,44	2,60	2,33	4,83	4,51	2,46	2,28	4,61	4,39
	4	2,56	2,33	4,79	4,50	2,40	2,26	4,48	4,36	2,54	2,32	4,71	4,47	2,38	2,26	4,46	4,34
7000	1	2,70	2,36	5,19	4,61	2,62	2,34	5,05	4,56	2,67	2,35	5,08	4,57	2,60	2,33	4,97	4,52
	2	2,54	2,29	4,89	4,46	2,39	2,22	4,59	4,33	2,49	2,28	4,72	4,42	2,37	2,22	4,52	4,30
	3	2,46	2,28	4,79	4,43	2,32	2,22	4,48	4,29	2,41	2,25	4,61	4,37	2,28	2,18	4,38	4,24
	4	2,38	2,23	4,60	4,34	2,22	2,16	4,27	4,17	2,34	2,22	4,44	4,31	2,21	2,15	4,25	4,15
20000	1	2,68	2,35	5,17	4,60	2,60	2,32	5,02	4,53	2,64	2,34	5,04	4,55	2,58	2,31	4,95	4,49
	2	2,50	2,26	4,87	4,41	2,36	2,20	4,55	4,28	2,45	2,25	4,69	4,37	2,33	2,19	4,48	4,26
	3	2,43	2,25	4,75	4,39	2,29	2,19	4,45	4,25	2,37	2,22	4,57	4,32	2,26	2,16	4,34	4,20
	4	2,34	2,20	4,56	4,29	2,19	2,13	4,25	4,13	2,30	2,19	4,40	4,24	2,18	2,13	4,22	4,12

где $E_{\text{пленок}}$ – модуль упругости горизонтальных пленок в вертикальном армирующем пакете; $d_{\text{свай}}$, $E_{\text{свай}}$ и $n_{\text{свай}}$ – диаметр, модуль упругости и количество вертикальных свай в армирующем пакете соответственно; S^{nl} – осадка фундаментной плиты; S^l и S^H – осадки фундамента при линейном и нелинейном деформировании армированного вертикальным пакетом грунтового основания соответственно; $S^l_{\text{упл}}$ и $S^H_{\text{упл}}$ – осадки фундамента при линейном и нелинейном деформировании армированного вертикальным пакетом грунтового основания соответственно с учетом уплотнения грунта внутри вертикального армирующего пакета.

При использовании свай диаметром $d = 15$ см несущая способность грунта повышается до 17 % при линейном деформировании и 18 % при нелинейном деформировании грунта, а в случае уплотненного грунта внутри вертикального армирующего пакета – до 22 % и 20 % при линейном и нелинейном деформировании грунтового основания соответственно. Использовать более дорогой материал армирующих пленок не целесообразно, поскольку осадки фундамента практически не изменяются. Однако материал вертикальных свай в армирующем пакете играет значительную роль в уменьшении осадки плиты: различия в значениях осадок плитного фундамента достигают 10 %. Но ставится вопрос и экономической целесообразности использования

большого количества армирующих свай, изготовленных из более дорогого материала: значения осадок фундамента на грунтовом основании, армированном вертикальным пакетом со сваями с модулями упругости $E_{свай} = 7000$ МПа и $E_{свай} = 20000$ МПа, отличаются незначительно.

Исследовалось также влияние толщины вертикального армирующего пакета, наличия горизонтальных пленок в пакете, диаметра вертикальных свай, а также уплотнения грунта в пакете и физико-механических характеристик армирующих свай на несущую способность грунтового основания. В таблице 2 показаны осадки плитного фундамента на грунтовом основании, армированным вертикальным пакетом, расположенным в однородном грунте на той же глубине, длина пакета при этом не изменилась, толщина пакета возросла почти в 2 раза ($H = 200,6$ см). Модуль упругости горизонтальных элементов армирующего пакета принят равным $E_{пленок} = 3000$ МПа, количество вертикальных свай $n_{свай} = 2$.

Таблица 2 – Осадки плиты на армированном вертикальным пакетом грунтовом основании в зависимости от физико-механических характеристик элементов армирующего пакета и наличия армирующих пленок в пакете (см)

Армирующий пакет	С горизонтальными пленками								Без горизонтальных пленок							
$d_{свай}, см$	10				15				10				15			
$E_{свай}, МПа$	S^{nl}	S^l	S^u	S^{ul}	S^l	S^l	S^u	S^{ul}	S^l	S^l	S^u	S^{ul}	S^l	S^l	S^u	S^{ul}
10000	2,57	2,05	4,67	4,01	2,37	2,00	4,30	3,86	2,59	2,06	4,76	4,04	2,39	2,01	4,35	3,89
15000	2,49	2,03	4,52	3,95	2,28	1,97	4,15	3,79	2,52	2,04	4,64	3,98	2,30	1,98	4,21	3,82
18642	2,45	2,02	4,45	3,92	2,24	1,95	4,08	3,76	2,48	2,03	4,57	3,95	2,26	1,96	4,14	3,78
20000	2,43	2,01	4,42	3,91	2,22	1,95	4,06	3,74	2,47	2,02	4,55	3,94	2,24	1,95	4,12	3,77
30000	2,35	1,99	4,30	3,85	2,15	1,91	3,96	3,69	2,39	2,00	4,45	3,89	2,17	1,92	4,03	3,71
35000	2,33	1,98	4,26	3,83	2,13	1,90	3,93	3,67	2,37	1,99	4,43	3,86	2,15	1,91	4,01	3,70
41945	2,29	1,97	4,21	3,81	2,10	1,89	3,90	3,64	2,34	1,98	4,39	3,84	2,13	1,89	3,98	3,67
45000	2,28	1,96	4,19	3,80	2,09	1,88	3,89	3,63	2,33	1,97	4,38	3,84	2,12	1,89	3,97	3,66
50000	2,27	1,95	4,18	3,78	2,08	1,87	3,88	3,61	2,32	1,96	4,37	3,83	2,10	1,88	3,97	3,64
70000	2,21	1,93	4,11	3,75	2,04	1,85	3,83	3,56	2,28	1,94	4,32	3,79	2,07	1,86	3,93	3,59
200000	2,20	1,87	3,99	3,63	1,97	1,80	3,75	3,47	2,19	1,88	4,25	3,67	2,01	1,81	3,86	3,49

Данные таблицы 2 показывают, что, увеличив толщину вертикального армирующего пакета почти в 2 раза, осадка плиты уменьшается до 32 % при линейном деформировании и 31 % при нелинейном деформировании грунтового основания, а в случае уплотненного грунта – до 38 % и 36 % при линейном и нелинейном деформировании соответственно. Следует отметить, что при использовании горизонтальных пленок в вертикальном армирующем пакете несущая способность грунта повышается незначительно.

При использовании двух свай диаметром $d = 10$ см в вертикальном армирующем пакете достаточно использовать материал свай с модулем упругости $E_{свай} = 4182$ МПа или двух вертикальных свай диаметром $d = 15$ см с модулем упругости материала свай $E_{свай} = 1859$ МПа. Это приведет к удешевлению стоимости подготовки грунтового основания плитного фундамента и повышению несущей способности грунта.

Результаты исследования влияния длины армирующего вертикального пакета в однородном грунте на осадку фундамента методом компьютерного моделирования представлены на рисунке 2. Приняты следующие характеристики уплотненного вертикального пакета: длина горизонтальных пленок $l_{пленок} = 115$ см, 230 см и 345 см; толщина армирующего пакета $H = 200,3$ см; толщина горизонтальных пленок $h_{пленок} = 0,3$ см; диаметр вертикальных свай $d = 15$ см; количество вертикальных свай $n_{свай} = 3$; модуль упругости горизонтальных элементов пакета $E_{пленок} = 3000$ МПа.

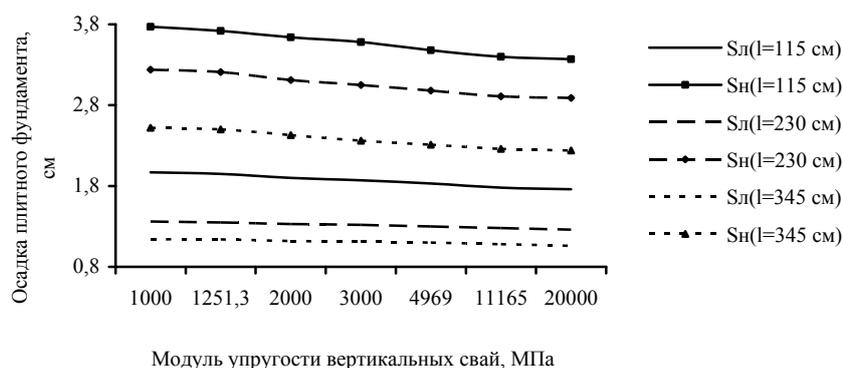


Рисунок 2 – График зависимости осадки плиты на армированном грунтовом основании от длины вертикального армирующего пакета

Данные рисунка 2 позволяют сделать вывод, что при использовании вертикального армирующего уплотненного пакета в однородном грунте длиной 115 см с тремя сваями, достаточно использовать материал свай с модулем упругости $E_{свай} = 1251,3$ МПа, осадка фундаментной плиты составляет 1,95 см при линейном деформировании и 3,72 см при нелинейном деформировании грунта. В случае, когда используется уплотненный вертикальный армирующий пакет длиной 230 см с тремя сваями, осадка плиты составляет 1,30 см и 2,98 см при линейном деформировании и нелинейном деформировании соответственно, при этом лучше использовать вертикальные сваи с модулем упругости $E_{свай} = 4969$ МПа. Увеличив длину армирующего пакета до 345 см с тремя вертикальными сваями, осадка фундамента уменьшается до 1,08 см и 2,26 см при линейном и нелинейном деформировании грунтового основания, в этом случае достаточно использовать материал свай с модулем упругости $E_{свай} = 11165,4$ МПа.

Заключение. Результаты компьютерного моделирования показали, что использование вертикального армирующего пакета в грунтовом основании высокоэффективно. При заданных условиях представляется возможным уменьшить осадку плитного фундамента до 32 % при линейном деформировании и 31 % при нелинейном деформировании грунта, а в случае уплотненного вертикального пакета – до 63 % и 59 % при линейном и нелинейном деформировании грунтового основания соответственно. Количество и физико-механические характеристики горизонтальных и вертикальных элементов вертикального армирующего пакета играют значительную роль в уменьшении осадки плитного фундамента на однородном грунтовом основании. При этом особое внимание следует уделить возможности удешевления материала элементов вертикального армирующего пакета.

Литература

1. Быховцев, В.Е. Численный анализ эффективности вертикального армирования структур грунтовых оснований фундаментов зданий / В.Е. Быховцев, Д.В. Прокопенко, С.В. Торгонская // Материалы, технологии, инструменты. – 2013. – Том 18, № 1. – С. 5–16.
2. Сеськов, В.Е., Быховцев, В.Е., Феофилов, Ю.В. Рекомендации по армированию песчаных намывных и насыпных оснований / В.Е. Сеськов, В.Е. Быховцев, Ю.В. Феофилов // Госстрой БССР, НИИС. – Мн., 1984. – 12 с.
3. Партон, В.З. Методы математической теории упругости / В.З. Партон, П.И. Перлин. – М. : Наука, 1981. – 688 с.
4. Быховцев, В.Е. Компьютерное объектно-ориентированное моделирование нелинейных систем деформируемых твёрдых тел / В.Е. Быховцев. – Гомель: УО «ГГУ им. Ф. Скорины», 2007. – 219 с.
5. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М. : Мир, 1975. – 540 с.

УДК 004.052

Инициализация начального состояния компьютера для реализации экспериментов по надежности узла локальной вычислительной сети

А.И. КУЧЕРОВ, А.В. ВОРУЕВ, В.Д. ЛЕВЧУК

Рассмотрены предпосылки для исследования надежности узла вычислительной сети на начальном этапе запуска компьютера. Описаны методы определения неисправностей средствами POST-диагностики.

Ключевые слова: надежность, диагностика, POST, BIOS.

Prerequisites for studying the reliability of the computer network node at the initial stage of starting the computer are considered. The methods for determining the fault by means of POST-diagnostics are considered.

Keywords: reliability, diagnostics, POST, BIOS.

Введение. В процессе функционирования вычислительной системы возникают сбои и отказы как аппаратуры, так и программных средств, входящих в состав этой вычислительной системы. Для своевременного реагирования на сбои и отказы, возникающие в процессе функционирования вычислительной системы, необходимо доподлинно знать состав аппаратных средств этой системы [1]. От состава аппаратных компонентов и их работоспособности на момент запуска компьютера зависит дальнейшая надежность узла локальной вычислительной сети. При запуске вычислительной системы происходит ее самодиагностика или другими словами POST-диагностика (Power-On Self Test). POST – программа, расположенная в микросхеме BIOS расположенной на системной плате. BIOS (Basic Input/Output System) – базовая система ввода-вывода.

Рассмотрены методы диагностики на начальной стадии запуска узла локальной вычислительной сети и влияние изначально протестированного оборудования на надежность вычислительной системы в дальнейшем [2].

Этапы диагностики начального состояния. Очень часто владельцы компьютеров сталкиваются с ситуацией, когда при нажатии на кнопку питания системного блока он по всем признакам включается, но на экран ничего не выводится. Что делать в этом случае, как определить поломку?

Программа POST-диагностики определяет и проверяет установленное оборудование, настраивает устройства и готовит их к работе. При самотестировании, возможно, будет обнаружена неисправность оборудования, тогда процедура POST будет остановлена с выводом соответствующего сообщения или звукового сигнала. Если же все проверки прошли успешно, самотестирование завершается вызовом встроенной подпрограммы для загрузки операционной системы. Ну а если же программой будет выявлена серьезная ошибка, работа системы будет остановлена с выдачей звуковых сигналов, которые укажут на возникшую неисправность [3].

Процесс запуска компьютера можно описать следующим алгоритмом (рисунок 1):

1. После нажатия кнопки включения компьютера блок питания производит самотестирование напряжений. Если все соответствует норме, то на процессор подается напряжение и сигнал сброса. Процессор сбрасывает свою память и начинает работу [4].

2. Первое что делает процессор – получает из BIOS POST-программу (Power-On Self Test – самотестирование при включении). В соответствии с этой программой начинается тестирование составляющих компьютера [5]:

- тестирование процессора;
- копирование BIOS в оперативную память и проверка контрольных сумм BIOS;
- проверка регенерации памяти и тестирование 64 Кбайт нижней памяти;
- настройка чипсета;
- поиск и настройка видеоадаптера – именно в этот момент на экране монитора появляются первые сообщения;

- тестирование оперативной памяти;
- тестирование клавиатуры и других устройств ввода-вывода;
- проверка контрольной суммы CMOS и состояния батарейки;
- инициализация COM и LPT-портов;
- инициализация дисководов и IDE-устройств;
- распределение системных ресурсов;
- поиск других устройств, содержащих свой BIOS;
- вызов программного прерывания BIOS INT 19h, по которому ищется загрузочный сектор.

3. Управление передается загрузчику операционной системы, который загружает ОС в компьютер [4].

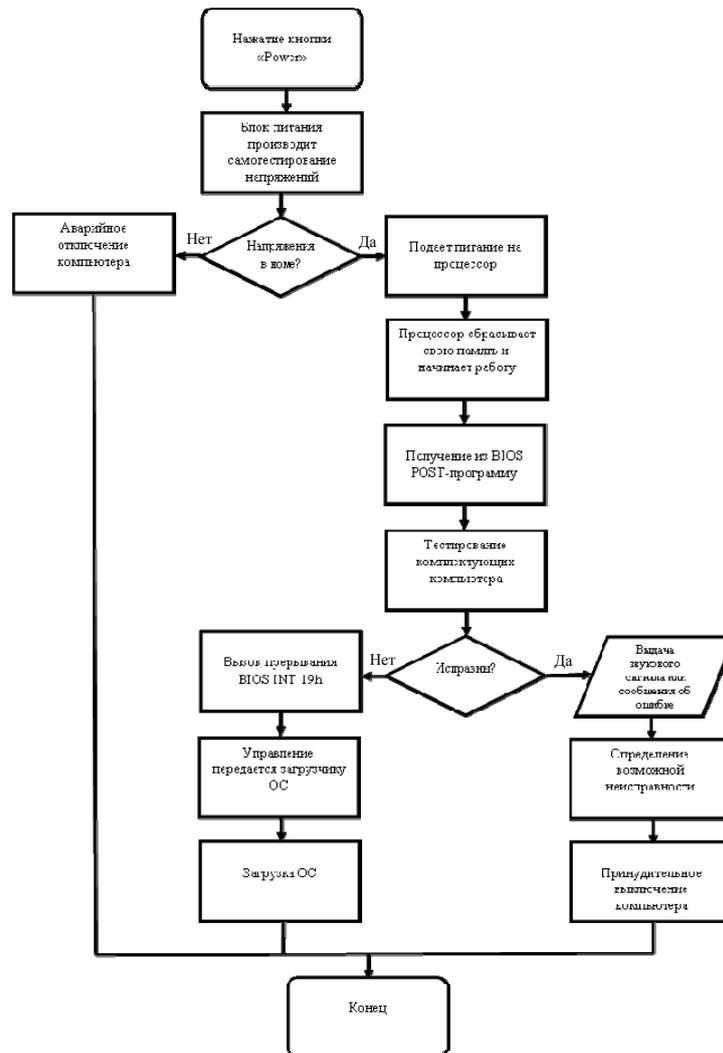


Рисунок 1 – Алгоритм запуска компьютера от нажатия кнопки «Power» до завершения POST-диагностики

Если в результате всех этих манипуляций произойдет какой-либо сбой, то компьютер выдаст определенную комбинацию звуковых сигналов или на экран выведется сообщение об ошибке.

Обработка аппаратных событий. У разных производителей системных плат от ведущих производителей BIOS таких как AMI BIOS, Award BIOS, Phoenix BIOS, существуют свои системы подачи сигналов, где набор коротких и длинных сигналов будет соответствовать определенной критической ошибке. Зная эти кодовые звуковые сигналы, достаточно легко определить неисправные компоненты оборудования компьютера, так как если не проходит POST-диагностика, то на экран монитора не может выводиться ничего. Но для диагностирования неисправностей таким методом необходимо подключить динамик (спикер) к системной плате компьютера.

В таблицах 1, 2, 3 указаны коды звуковых сигналов с их описанием [6].

Таблица 1 – Звуковые сигналы AMI BIOS

Сигнал	Значение
1 короткий	Ошибок не обнаружено, загрузка системы продолжается
2 коротких	Ошибка четности оперативной памяти
3 коротких	Неисправность первых 64 Кбайт оперативной памяти
4 коротких	Неисправен системный таймер
5 коротких	Неисправность процессора
6 коротких	Неисправность контроллера клавиатуры
7 коротких	Неисправность системной платы
8 коротких	Ошибка видеопамати
9 коротких	Неправильная контрольная сумма BIOS
10 коротких	Ошибка записи в CMOS-память
11 коротких	Ошибка кэш-памяти
1 длинный 2 коротких	Неисправен видеоадаптер
1 длинный 3 коротких	
2 длинных 2 коротких	Ошибка контроллера гибких дисков
Сигналы отсутствуют	Неисправен блок питания или системная плата

Таблица 2 – Звуковые сигналы Award BIOS

Сигнал	Значение
1 короткий	Ошибок не обнаружено, загрузка системы продолжается
Непрерывный или короткий повторяющийся	Неисправен блок питания или замыкание в цепях питания
1 длинный или длинный повторяющийся	Ошибка оперативной памяти
1 длинный 2 коротких	Видеоадаптер не обнаружен или ошибка видеопамати
1 длинный 3 коротких	В зависимости от версии BIOS этот сигнал может означать ошибку видеоадаптера или ошибку клавиатур
3 длинных	Ошибка контроллера клавиатуры
1 длинный 9 коротких	Ошибка чтения BIOS или неисправна микросхема BIOS
2 коротких	Обнаружена некритическая ошибка. Этот сигнал обычно сопровождается сообщением на экране с более конкретным описанием ошибки. Пользователь может продолжить загрузку после нажатия F1 или войти в BIOS SETUP с помощью клавиши Delete
Сигналы отсутствуют	Неисправен блок питания или системная плата

Звуковые сигналы Phoenix BIOS состоят из нескольких серий коротких гудков, которые следуют с некоторым интервалом. Например, сигнал с кодом 2-1-4 будет звучать так: два коротких гудка, пауза, один короткий гудок, пауза, четыре коротких гудка. В устаревших версиях BIOS серия состоит из трех гудков, а в более новых из четырех.

Таблица 3 – Звуковые сигналы Phoenix BIOS

Сигнал	Значение
1-1-3	Ошибка при чтении данных из микросхемы встроенной памяти CMOS
1-1-4	Ошибка контрольной суммы микросхемы CMOS
1-2-1	Ошибка на системной плате
1-2-2	Ошибка контроллера DMA системной платы
1-2-3	Ошибка чтения или записи данных в один из каналов DMA
1-3-1	Ошибка в оперативной памяти

Окончание таблицы 3

1-3-3	Ошибка первых 64 Кбайт основной памяти
1 3-4	Ошибка тестирования оперативной памяти
1-4-1	Ошибка системной платы
1-4-2	Ошибка тестирования оперативной памяти
от 2-1-1 до 2-4-4	Ошибка одного из битов первых 64 Кбайт оперативной памяти
3-1-1	Ошибка в первом канале DMA
3-1-2	Ошибка во втором канале DMA
3-1-3	Ошибка при обработке прерываний
3-1-4	Ошибка контроллера прерываний материнской платы
3-2-4	Ошибка контроллера клавиатуры
3-3-4	Ошибка видеоадаптера
3-4-1	Ошибка при тестировании видеопамати
3-4-2	Ошибка при поиске видеопамати
4-2-1	Ошибка системного таймера
4-2-2	Завершение тестирования
4-2-3	Ошибка контроллера клавиатуры
4-2-4	Ошибка центрального процессора
4-3-1	Ошибка тестирования оперативной памяти
4-3-3	Ошибка системного таймера
4-3-4	Ошибка часов реального времени
4-4-1	Ошибка последовательного порта
4-4-2	Ошибка параллельного порта
4-4-3	Ошибка математического сопроцессора
1-2	Ошибка в работе адаптеров, имеющих собственный BIOS
1-2-2-3	Ошибка при подсчете контрольной суммы BIOS
1-3-1-1	Ошибка в работе оперативной памяти
1-3-1-3	Ошибка контроллера клавиатуры
1-3-4-1	Ошибки при тестировании оперативной памяти
2-1-2-3	Ошибка при проверке уведомления об авторском праве ROM BIOS
2-2-3-1	Ошибка при обработке непредвиденных прерываний

Но звуковое сопровождение не всегда присуще какой-либо критической ошибке, и поэтому при процедуре самотестирования POST появление критической ошибки будет указываться сообщением диагностики.

Заключение. Инициализация начального состояния компьютера для реализации экспериментов по надежности узла локальной вычислительной сети является актуальной задачей для исследования надёжности узла сети. Надёжная вычислительная система будет способствовать точности определения рабочей нагрузки узла локальной вычислительной сети. Зная актуальную рабочую нагрузку узла локальной вычислительной сети за определенный промежуток времени, можно судить о характере износа оборудования, а износ оборудования будет влиять на надежность вычислительной системы в целом.

Если при запуске компьютера не возникает проблем и внештатных ситуаций, то это является залогом того, что при эксплуатации его в дальнейшем не должно возникать серьезных сбоев и отказов аппаратуры. А все возникающие неполадки компьютера, будут, скорее всего, связаны с программными средствами и с подключенными периферийными устройствами.

При правильной эксплуатации компьютера и проведении своевременных регламентных работ по его обслуживанию надежность вычислительной техники не будет снижаться. Это очень важно при проведении натуральных и имитационных экспериментов с использованием вычислительной техники, что обеспечивает необходимую достоверность полученных результатов при проведении научных исследований.

Литература

1. Кучеров, А.И. Методика повышения надежности вычислительных систем / А.И. Кучеров // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2012. – № 6 (75). – С. 120–123.
2. Демиденко, О.М. Сравнительный анализ математических методов повышения надежности информационных и технических систем / О.М. Демиденко, А.И. Кучеров // Проблемы физики, математики и техники. – 2015. – № 1 (22). – С. 92–97.
3. Кучеров, А.И. Получение информации об интенсивности использования ЭВМ с целью дальнейшего повышения ее надежности / А.И. Кучеров // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2013. – № 6 (81). – С. 125–129.
4. Процесс загрузки компьютера [Электронный ресурс]. - Режим доступа : http://www.on-line-teaching.com/bios/02_post.html. – Дата доступа : 17.05.2015.
5. Алгоритм диагностики нестарта компьютера [Электронный ресурс]. - Режим доступа : http://shaddy.at.ua/blog/opyt_algorithm Diagnostika_nestarta_komputera/2013-01-25-61. – Дата доступа : 17.05.2015.
6. Расшифровка звуковых сигналов BIOS [Электронный ресурс]. - Режим доступа : <http://www.allmbs.ru/bios-01.html>. – Дата доступа : 17.05.2015.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступила в редакцию 30.09.2015

Архитектура инструментария имитационного моделирования сетей нового поколения

А.И. Хобня

Представлены результаты разработки оптимальной архитектуры системы имитационного моделирования сетей нового поколения. Рассматриваются основные аспекты моделирования сетей и их влияние на проектирование. Данная архитектура использована для построения проблемно-ориентированного инструментария автоматизации имитационного моделирования сетей нового поколения.

Ключевые слова: моделирование, сети нового поколения, NGN.

The results of optimal architecture design for simulation system of the next generation networks are presented. The main aspects of networks simulation and their influence on design are considered. Presented architecture design is used for building problem-oriented toolkit for automation of next generation networks simulation.

Keywords: simulation, next generation networks, NGN.

Введение. Существует ряд методов формализации функционирования моделируемой системы. Одним из них является *транзактный* метод, при котором объект моделирования представляется как сеть массового обслуживания (СМО), обрабатывающая поток входных заявок (транзактов). Для СМО характерны следующие статические элементы:

- источники заявок на обслуживание – транзактов;
- обслуживающие устройства;
- очереди для сохранения транзактов перед занятыми устройствами;
- поглотители заявок [1], [2].

Однако при моделировании сетей существует ряд определенных аспектов, затрудняющих представление моделируемой системы в виде графа основных статических элементов СМО. Например, механизмы обеспечения качества обслуживания маршрутизаторов и программируемых коммутаторов реализуют сложные алгоритмы и не могут быть представлены примитивными очередями транзактов [3]. Генерация входящего трафика может зависеть от множества факторов [4]. С другой стороны, моделируемая сеть может содержать большое количество однотипных узлов. Поэтому для имитационного моделирования сетей нового поколения архитектура системы моделирования, с одной стороны, должна позволять описывать типовые элементы моделируемой системы на высоком уровне абстракции и, с другой стороны, позволять описывать нетривиальные аспекты работы системы на низком уровне.

При моделировании сетей в качестве транзактов представляются сетевые пакеты. Отправка, обработка и уничтожение сетевых пакетов моделируется как отдельные дискретные события. Поэтому в архитектуре системы моделирования должна быть заложена возможность оптимизации работы с большим количеством событий и транзактов.

Архитектура системы моделирования. Компоненты инфраструктуры имитационного моделирования можно отнести к одному из трех уровней абстракции модели: уровню дискретных событий, уровню связанных активностей, уровню устройств. Система допускает описание различных составных частей модели на различных уровнях абстракции. Это позволяет компактно описывать типовые алгоритмы поведения модели, используя API высокого уровня и, с другой стороны, программировать нетривиальные аспекты работы модели, используя более низкие уровни абстракции системы.

На самом низком уровне абстракции любая имитационная модель в динамике представляется в качестве цепи последовательных дискретных событий. Этот уровень описывается четырьмя абстрактными концепциями: событие, активность, объект назначения и задание. Активность инкапсулирует в себе определенное действие, как правило связанное с изменением состояния модели, которое может неоднократно выполняться в ходе работы моде-

ли. Активность выполняется в контексте объекта назначения, который передается коду активности в качестве параметра. Объект назначения может рассматриваться активностью и как источник входных параметров, определяющих ход выполнения активности, и как хранитель состояния модели, которое должно быть модифицировано в результате выполнения активности. Активности параметризуются классами объектов назначения, т. е. определенные активности могут принимать на вход только те объекты назначения, которые поддерживают определенный интерфейс. Совокупность активности и конкретного объекта назначения, в контексте которого данная активность должна быть выполнена, образует задание. Задание, выполнение которого установлено на определенное модельное время, образует событие. Модельное время представляет собой виртуальное время внутри модели, которое изменяется при переходе между событиями во время прогона модели. Наступление события приводит к выполнению задания, что в свою очередь означает выполнение активности в контексте объекта назначения. Выполнение активности может порождать новые события. Таким образом, моделируемая система представляется в виде цепи последовательных дискретных событий.

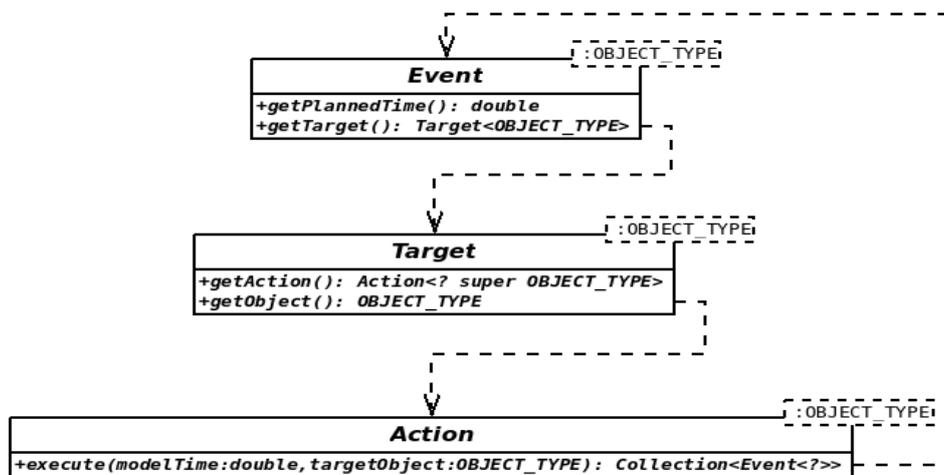


Рисунок 1 – Зависимости между основными интерфейсами

С точки зрения объектно-ориентированного программирования событие представляет собой объект, содержащий время и объект задания. Задание представляет собой объект, содержащий объект назначения и активность. Активность представляет собой объект, содержащий метод, который отвечает за ее выполнение и возвращает коллекцию событий. В описываемой инфраструктуре моделирования данные концепции представлены в виде интерфейсов. Зависимости между данными интерфейсами показаны на диаграмме классов, изображенной на рисунке 1. Интерфейс `Event` описывает событие и содержит два метода, возвращающих время, на которое данное событие запланировано, и задание (`Target`). Интерфейс `Target` в свою очередь содержит методы возвращающие активность (`Action`) и объект назначения параметризуемого типа. Интерфейс `Action` содержит единственный метод `execute()`, который принимает модельное время и объект назначения в качестве параметров. Реализации этого метода в конкретных активностях должны выполнять определенные действия в контексте объекта назначения. Метод `execute()` возвращает коллекцию новых объектов событий, реализующих интерфейс `Event`.

Часть ядра системы моделирования, отвечающее за прогон модели, использует описанное выше API низкого уровня абстракции. На данном уровне работает механизм поиска активностей. Он реализуется при помощи управления списком будущих событий. Данный список содержит объекты будущих событий, реализующие интерфейс `Event`, и является всегда отсортированным по планируемому времени событиями `getPlannedTime()`. На каждой итерации прогона модели система совершает следующие шаги:

- выбирается событие из вершины списка, новой вершиной становится следующее за ним событие;

- модельное время изменяется на планируемое время полученного события;
- выполняется задание полученного события;
- новые события, возвращенные выполненной активностью, вставляются в список таким образом, чтобы сохранить упорядоченность по планируемому времени. Для этого используется двоичный поиск по списку.

Модель заканчивает работу, когда все дискретные события исчерпаются или при наступлении специально определенных условий.

Имитационная модель может быть описана полностью на уровне дискретных событий с использованием только лишь понятий событие, активность, объект назначения и задание. Как правило, в большинстве случаев это не практично, т. к. требует от разработчика модели на низком уровне реализовывать такие действия, как порождение и управление объектами событий и заданий, кэширование, маршрутизация между активностями и т. д. Кроме того, формализация модели с использованием одних только указанных выше понятий затруднительна, поскольку данные абстракции неспособны отразить статическую структуру и структуру состояния модели. Однако описание некоторых модулей модели на данном уровне абстракции оправдано в нетривиальных случаях, когда по причине накладываемых ограничений описание данных модулей невозможно на более высоком уровне.

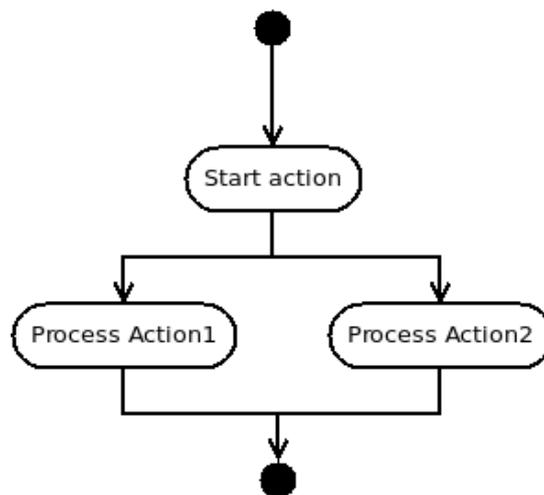


Рисунок 2 – Пример диаграммы активностей

На уровне *связанных активностей* имитационная модель представляется графами переходов между активностями. Это промежуточный несамостоятельный уровень абстракции, который может использоваться для описания модели только в совокупности с более низким или более высоким уровнем. Компоненты инфраструктуры моделирования на данном уровне позволяют решать следующие задачи:

- инкапсуляция системных функций инфраструктуры моделирования, таких как управление порождением и кэшированием объектов событий, заданий и т. д., что позволяет описывать активности более компактно;

- отделение кода реализации активностей от кода связей между ними (это решение позволяет повторно использовать код активности в различных частях модели, динамически устанавливая связи между различными активностями);

- формализация и описание отдельных частей модели в виде графа переходов между активностями.

Граф переходов между активностями может быть представлен в виде UML-диаграммы активностей. Пример представлен на рисунке 2.



Рисунок 3 – Зависимости между классами на уровне связанных активностей

Основной концепцией на данном уровне абстракции является связываемая активность. API системы имитационного моделирования на данном уровне представлено двумя абстрактными классами **SingleOutAction** и **MultiOutAction**. **SingleOutAction** представляет активность, которая может быть динамически связана в последовательность с другой активностью. После выполнения данной активности управление будет передано активности, которая была связана с ней. **MultiOutAction** представляет активность, которая может быть динамически связана с несколькими другими активностями. В зависимости от результата работы кода активности, управление передается одной из предварительно связанных с ней активностей. Конкретная активность, производная от абстрактного класса **MultiOutAction**, может иметь несколько определенных *слотов (выходов)*. С каждым слотом может быть динамически связана только одна активность. Основной код активности должен возвращать идентификатор слота, по которому необходимо передать управление в данном случае. Таким образом, при помощи данного API определяются типовые активности, которые затем связываются в графы переходов. Графы переходов между активностями описывают модель работы механизмов обслуживания устройств моделируемой системы. Также классы **SingleOutAction** и **MultiOutAction** содержат методы `setServiceAction()`, позволяющие задавать служебные активности, которые будут вызваны при переходах между основными активностями механизма обслуживания.

Зависимости между классами API данного уровня абстракции системы представлены на рисунке 3. Абстрактные классы **SingleOutAction** и **MultiOutAction** содержат служебный код для порождения объектов событий, использующий пулы объектов, код передачи управления связанным активностям и иной код, обеспечивающий функционирование системы моделирования.

На *уровне устройств* имитационная модель представляется графом соединенных устройств системы массового обслуживания (СМО). На данном уровне абстракции используются следующие концепции:

- транзакты (заявки) – сообщения, движущиеся между устройствами;
- генераторы (источники транзактов);
- устройства обслуживания (УО);
- очереди (и другие типы устройств накопления транзактов) для сохранения транзактов перед занятыми устройствами;

– поглотители (уничтожители) транзактов;

Транзакт икапсулирует в себе некоторое сообщение, которое будет обработано иными устройствами модели. Транзакт может содержать состояние, которое может изменяться после обработки транзакта на различных устройствах модели.

Устройства обслуживания икапсулируют в себе определенные механизмы обслуживания транзактов, которые, в свою очередь, описываются графами переходов между активностями на более низком уровне абстракции. Обслуживание начинается с приходом транзакта на устройство и завершается после его ухода. Без транзактов код активностей устройств не получают управление. Транзакт после обслуживания на исходном устройстве может быть перемещен на следующее устройство или быть уничтожен, а также ожидать начала обслуживания или привести к аварийному завершению эксперимента из-за невозможности его обслуживания следующим устройством.

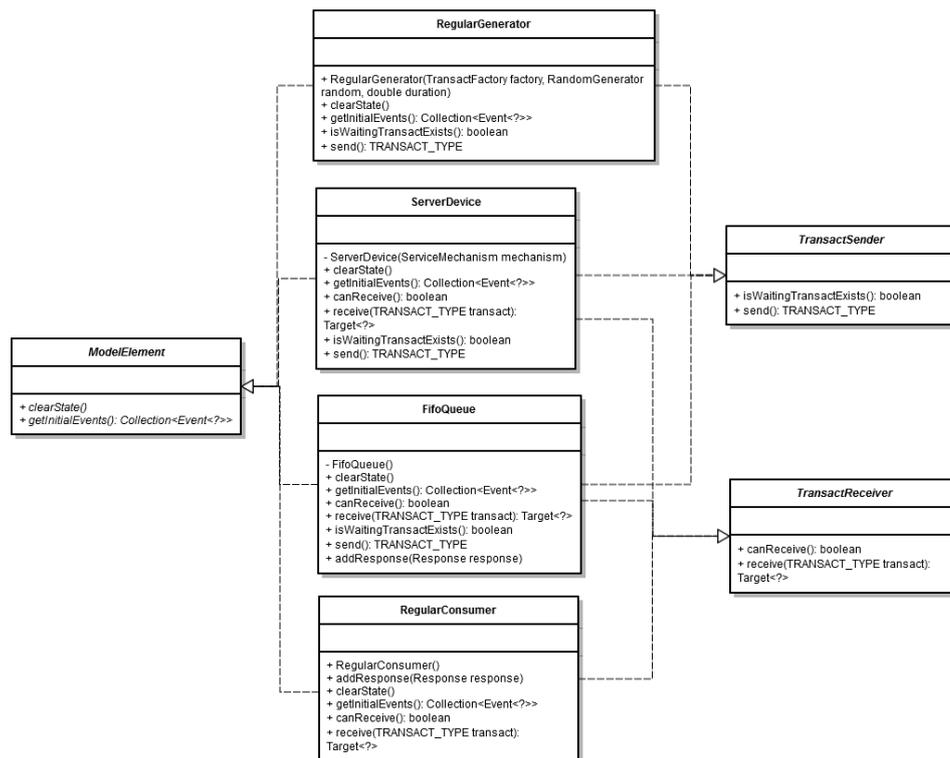


Рисунок 4 — Диаграмма основных классов и интерфейсов API уровня устройств.

Элемент имитационной модели, самостоятельно порождающий транзакты, называется *генератором*. Генераторы позволяют моделировать воздействие внешней среды на моделируемую систему путем создания потока транзактов на обслуживание. Также генераторы могут использоваться для внутренней синхронизации элементов системы или для выполнения ими служебных функций при программировании имитационной модели (отладки или мониторинга состояния имитационной модели).

Элемент имитационной модели, уничтожающий транзакты, называется *поглотителем*. Как правило, поглотители используются для вычисления откликов модели.

Устройство накопления сохраняет транзакты, если следующие за ним устройство занято обработкой иного транзакта. Устройства накопления могут быть организованы как простые очереди, работающие по принципу FIFO (First Input – First Output), так и реализовывать более сложную логику накопления, извлечения и уничтожения транзактов.

Основные классы, интерфейсы и зависимости данного уровня API представлены на рисунке 4.

Заключение. Таким образом, API системы моделирования позволяют описывать различные составные части модели на различных уровнях абстракции. Это позволяет компактно

описывать типовые алгоритмы поведения модели, используя API высокого уровня, и при необходимости программировать нетривиальные аспекты работы модели, используя API более низкого уровня абстракции. Система моделирования адаптирована для имитации большого количества дискретных событий и генерации большого потока транзактов, что является важным аспектом, т.к. имитационное моделирование сетей предполагает моделирование обработки каждого сетевого пакета. Данная архитектура использована для построения проблемно-ориентированного инструментария автоматизации имитационного моделирования сетей нового поколения.

Литература

1. Левчук, В.Д. Программно-технологические комплексы имитации сложных дискретных систем / В.Д. Левчук, И.В. Максимей. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2006. – 263 с.
2. Левчук, В.Д. Базовая схема формализации системы моделирования MISIC4 / В.Д. Левчук // Проблемы програмування. – 2005. – № 1. – С. 85–96.
3. Хобня, А.И. Разработка универсальной платформы моделирования механизмов обеспечения качества обслуживания в сетях пакетной передачи данных / А.И. Хобня // Тезисы докладов XVIII Респ. научной конф. «Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях». – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2015.
4. Демиденко, О.М. Концептуальная модель генерации VoIP трафика в сети NGN / О.М. Демиденко, А.И. Хобня // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2014. – № 6 (87). – С. 117–122.
5. Кулинченко, В.Н., Демиденко, О.М., Чечет, П.Л. Об одном подходе к определению попускной способности каналов ЛВС по протоколам TCP/IP, ICMP и UDP / В.Н. Кулинченко, О.М. Демиденко, П.Л. Чечет // Проблемы физики, математики и техники. – 2014. – № 4 (21). – С. 1–3.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступила в редакцию 25.06.2015

Инициализация датчиков псевдослучайных чисел во встроенных устройствах

П.Л. ЧЕЧЕТ, В.Д. ЛЕВЧУК, А.В. ВОРУЕВ

Рассмотрена реализация оригинального способа задания начального значения датчика псевдослучайных чисел в устройстве с микроконтроллером.

Ключевые слова: датчик псевдослучайных чисел, начальное состояние.

The implementation of the original method of setting the initial value of the pseudo-random numbers generator in the device with a microcontroller is considered.

Keywords: pseudo-random numbers generator, initial state.

Введение. Многие алгоритмы для своего функционирования требуют использования датчиков псевдослучайных чисел. К примеру, это применение метода Монте-Карло, имитационное моделирование, различные виды шифрования. Так как чисто программные алгоритмы генерации псевдослучайных чисел по своей сути детерминированы, какая конкретно последовательность будет получена, зависит от выбора начального значения (одного или нескольких) для используемого датчика псевдослучайных чисел [1].

Существуют задачи, где достаточно постоянной одинаковой последовательности псевдослучайных чисел, лишь бы числа были достаточно «качественные». Однако есть приложения, в которых важно иметь различные последовательности псевдослучайных чисел. В этом случае возникает задача получения различных, по возможности, случайных начальных значений для первичной инициализации используемого датчика псевдослучайных чисел.

Получение начальных значений. Если алгоритмы, требующие псевдослучайных чисел, выполняются на устройстве с полноценной операционной системой, то для них существует много возможностей по генерации различных значений для начальной инициализации используемых датчиков псевдослучайных чисел. Например, может быть использовано значение времени для получения начальных значений для инициализации датчика. В операционных системах семейства UNIX в API есть функция *time()*, возвращающая текущее значение времени в секундах, начиная с так называемой «эры Unix», с даты 1 января 1970 г. времени 00:00:00. Значение, возвращаемое этой функцией, может быть напрямую или после преобразования использовано как одно или несколько начальных значений для инициализации выбранного датчика псевдослучайных чисел.

Операционная система Windows также в своём API предлагает различные функции для работы со временем, которые могут быть использованы для получения различных меняющихся начальных значений датчиков псевдослучайных чисел. Во многих случаях может быть использована функция *GetTickCount()*, которая возвращает количество миллисекунд, прошедших с последнего запуска операционной системы. Если приложение запускается автоматически при старте операционной системы, то такой способ получения начальных значений может оказаться неэффективным в виду получения значений, близких к некоторому среднему значению, зависящему от времени старта операционной системы в конкретном программном и аппаратном окружении. В этом случае лучшие результаты может дать функция *GetSystemTime()*, которая возвращает значение всемирного (UTC) времени в виде структуры с полями, соответствующими году, месяцу, дню, дню недели, часам, минутам, секундам и миллисекундам. Для получения начальных значений для инициализации датчика псевдослучайных чисел могут быть использованы одно или несколько полей. Также возможно преобразование значений полей структуры в одно 64-битное целочисленное значение функцией API *SystemTimeToFileTime()*. Однако следует иметь в виду, что использование данных функций не будет достаточно эффективным в случае автоматического запуска приложения по периодическому расписанию (ежедневно, еженедельно, ежечасно и т. п.), так как расписание обычно привязывается к постоянным значениям некоторых компонент даты и/или времени. В этом случае получаемые значения даты и времени будут иметь постоянно одинаковые значения для некоторых полей (минуты, секунды, дни и т. д.).

В случае необходимости получения различных псевдослучайных последовательностей на различных устройствах, но не критичности к их повторению на одном и том же устройстве, в качестве начальных значений могут быть использованы различные идентификаторы, доступные для чтения программно, такие как серийный номер дискового тома, серийный номер оборудования, дата установки операционной системы или приложения и др.

Особенности получения начальных значений во встроенных устройствах. Встроенные автономные устройства часто функционируют без полноценной операционной системы, а также часто не имеют в своём составе часов реального времени. Поэтому возможности для получения начальных значений для инициализации датчиков псевдослучайных чисел получаются ограниченными. Следует отметить, что описанные ниже способы могут быть, конечно, применены и в устройствах, работающих под управлением полноценных операционных систем.

Для устройства без часов реального времени рассмотрим возможные варианты функционирования. Для удобства сведём их в таблицу 1.

Таблица 1– Варианты функционирования встроенного устройства

№ п.п.	Питание устройства	Выполнение алгоритма, требующего псевдослучайные числа
1	Постоянно	Постоянно
2	Постоянно	По запросу пользователя или при наступлении определённого события
3	Для выполнения задачи	По запросу пользователя или при наступлении определённого события

При постоянном функционировании устройства (варианты №№ 1 и 2 в таблице 1) возможна организация аналога функции *GetTickCount()* путём использования аппаратного таймера микроконтроллера, тактируемого с определённой частотой. В этом случае при выполнении задачи, требующей датчика псевдослучайных чисел, может быть считано текущее значение таймера непосредственно или путём преобразований (нормирование, разбиение на несколько значений сдвиговыми операциями и др.). Это значение может быть использовано для начальной инициализации датчика псевдослучайных чисел, что позволит получать в общем случае различные начальные значения и, следовательно, псевдослучайные последовательности для каждого выполнения алгоритма. Например, при использовании шестнадцатиразрядного таймера, разбив его значение на два байта, можно получить два восьмиразрядных числа, предназначенных для начальной инициализации датчика псевдослучайных чисел.

```
w <- Timer //получить текущее значение таймера
x1=w >> 8 //x1 – старший байт значения
x2=w & 0xFF //x2 – младший байт значения
```

Более сложным представляется случай № 3 (таблица 1). В этом случае устройство «не знает», в какое время оно было включено, и задача получения различных начальных значений для инициализации датчиков псевдослучайных чисел усложняется. В качестве начальных значений в таком случае может быть использована, например, некоторая количественная информация об окружающей среде. Это может быть значение температуры, если устройство имеет соответствующий датчик, влажности, давления. Достаточно эффективным может оказаться использование значения уровня внешней освещённости, при использовании устройств, подобных описанным в [2]. В этом случае изменения внешних условий могут быть использованы для получения различных начальных значений для инициализации датчика псевдослучайных чисел. Следует, конечно, учитывать особенности функционирования устройств во внешней среде, такие как нахождение в месте с постоянным поддержанием температуры, в постоянном месте с одинаковым освещением и т. п.

Если устройство взаимодействует с человеком, то появляется возможность использовать его физиологические показатели (реакция, скорость) для получения различных начальных значений для начальной инициализации датчика псевдослучайных чисел. Даже при использовании устройства одним и тем же пользователем, числа будут получаться различными, так как физиологические характеристики одного и того же человека непостоянны и зависят от множества факторов (самочувствие, время суток, физиологическое состояние и т. п.).

Получение начальных значений по действию пользователя. При взаимодействии человека с устройством простым и эффективным способом получения начальных значений

для инициализации датчиков псевдослучайных чисел могут быть различные физиологические характеристики, с которыми пользователь взаимодействует с органами управления устройства. Например, при наличии устройства позиционирования (мышь, трекбол, сенсорная панель/экран) числовые характеристики скорости перемещения угла, могут быть использованы в качестве начальных значений для инициализации датчика псевдослучайных чисел. При наличии кнопок управления для получения числового значения, пригодного для целей инициализации датчиков псевдослучайных чисел, может быть использовано время удержания кнопки или длина промежутка времени между последовательными нажатиями кнопки или кнопок управления устройством.

Для практической проверки был реализован алгоритм получения числового значения, связанного со временем нажатия кнопки устройства. Устройство, реализованное с использованием микроконтроллера, находится в спящем (sleep) режиме, при котором все узлы микроконтроллера выключены, за исключением системы обработки внешних прерываний, что позволяет организовать пробуждение устройства нажатием кнопки.

Схематично алгоритм работы программы микроконтроллера представлен на рисунке 1. В практическом варианте, предназначенном для проверки функционирования способа получения начальных значений для инициализации датчика псевдослучайных чисел, алгоритм, использующий псевдослучайные числа (на рисунке 1 выделен пунктиром), был заменён выводом в порт микроконтроллера полученного значения.

Рассмотрим подробнее алгоритм функционирования устройства, реализованный в программном обеспечении микроконтроллера. При первой подаче питания происходит инициализация микроконтроллера, периферийного оборудования. Настраивается таймер для отсчёта времени и выполняется участок кода, ожидающий отпускания кнопки включения устройства. Так как при подаче питания кнопка отпущена, то ожидание не производится и следующим шагом производится считывание значения таймера, равное нулю, так как, уже отмечено выше, ожидание не выполнялось.

Данный факт (нулевое значение) может быть использован как признак того, что целевой алгоритм устройства выполнять при первом включении не нужно, если такое поведение устройства требуется. Следующий участок кода выполняет отработку задержки перехода устройства в «спящий» режим для снижения энергопотребления. Если во время отработки задержки будет нажата кнопка, то происходит переход к участку кода, измеряющему продолжительность нажатия. Если в течение заданного времени нажатие кнопки не происходит, устройство переходит в спящий режим с отключением периферийных устройств и всех генераторов микроконтроллера. Выход из спящего режима возможен только при поступлении внешнего прерывания, информирующего микроконтроллер о нажатии кнопки включения устройства.

При нажатии кнопки включения возникает внешнее прерывание, «пробуждающее» микроконтроллер, выполнение кода возобновляется с участка, отвечающего за инициализацию таймера для отсчёта времени. После выполнения этой инициализации, управление переходит в участок кода, где производится ожидание отпускания кнопки включения устройства. Для выбранного микроконтроллера переход к ожиданию отпускания кнопки занимает около 30 тактов, с учётом времени «пробуждения» этот процесс занимает десятки микросекунд, что намного меньше скорости реакции пользователя на включение устройства.

Упрощённая принципиальная схема подключения микроконтроллера представлена на рисунке 2. Как видно из этой схемы, выбранный микроконтроллер тактируется от кварцевого резонатора с частотой 6,144MHz, что обеспечивает выполнение инструкций за время:

$$(1 \div 3) \frac{1}{6,144Mhz} \approx 0,16 \div 0,5 \mu S . \quad (1)$$

Как видно из (1), время выполнения даже самой длинной инструкции, требующей трёх тактов, занимает не более 0,5 микросекунды. Восьмиразрядный таймер 0 микроконтроллера тактируется от тактового генератора через делитель на 256. При этом частота тактирования таймера составляет:

$$6,144Mhz / 256 = 24KHz . \quad (2)$$

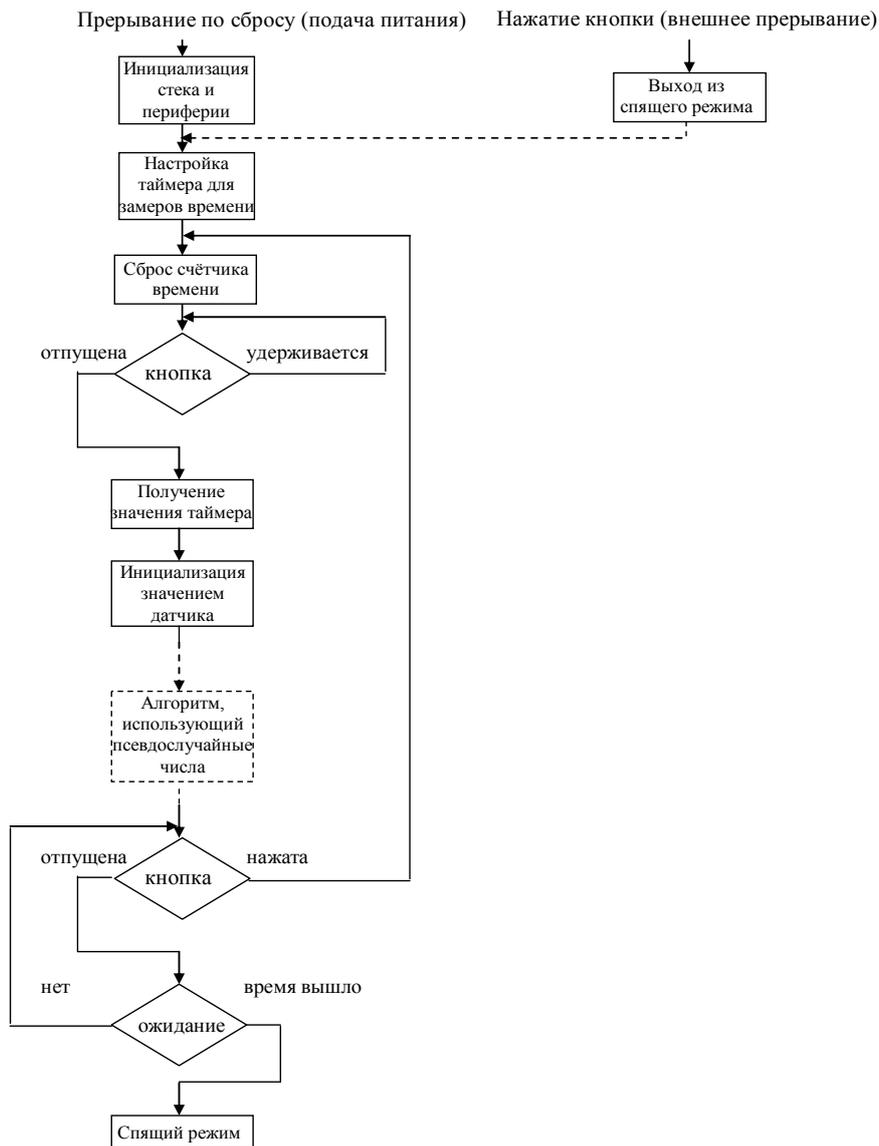


Рисунок 1 – Схема алгоритма программного обеспечения устройства

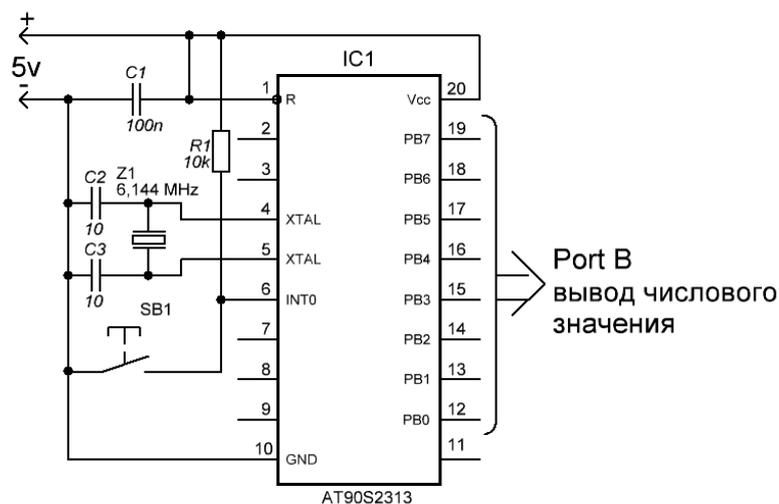


Рисунок 2 – Упрощённая принципиальная схема устройства

С учётом частоты тактирования (2) и разрядности таймера, равной восьми, частота переполнения таймера 0 составит:

$$\frac{24\text{KHz}}{2^8} = 93,75\text{Hz} . \quad (3)$$

Система прерывания микроконтроллера настроена на обработку переполнения таймера 0, что позволяет измерять время нажатия кнопки SB1 (рисунок 2), а также выполнять отсчёт времени для выключения устройства путём перевода микроконтроллера в «спящий» режим с пониженным энергопотреблением. Производитель микроконтроллера гарантирует, что при использовании «спящего» режима (Power-down Mode), и отключенном сторожевом таймере (WDT) потребляемый ток не превысит 2µА. Поэтому дополнительное отключение питания не организовано.

При переводе микроконтроллера в «спящий» режим, настраивается обработка поступления внешнего прерывания INT0. К входу запроса внешнего прерывания (вывод 6 микроконтроллера, рисунок 2) подключена кнопка устройства. Внешний подтягивающий резистор R1 предназначен для повышения помехозащищённости устройства, так как сопротивления внутреннего (35 ÷ 120 Ком) может оказаться недостаточно для отсутствия случайных включений устройства, вызванных внешними наводками. Числовое значение, полученное с помощью алгоритма, схема которого представлена на рисунке 1, выводится в порт В микроконтроллера (выводы 12–19, рисунок 2). К этим выводам подключался светодиодный индикатор с токоограничивающими резисторами (на рисунке 2 не показаны) для отображения полученного значения в двоичной форме (разряд индикатора – разряд числа).

Заключение. В настоящее время используется большое число алгоритмов, требующих для своей работы псевдослучайные числа. Характеристики современных встраиваемых систем легко позволяют реализовывать такие алгоритмы и программные генераторы псевдослучайных чисел в подобных системах. Однако часто требуется решить задачу начальной инициализации используемых генераторов псевдослучайных чисел для получения различных псевдослучайных последовательностей. В этом случае могут быть использованы различные характеристики внешней среды, такие как температура, освещённость, время, если устройство имеет аппаратные возможности для получения этих значений. Если такой возможности нет, то для получения начальных значений для инициализации датчиков псевдослучайных чисел могут быть использованы характеристики взаимодействия пользователя с устройством, определяющиеся физиологическими характеристиками человека (скорость нажатия кнопок, время удержания, реакция и т. д.). Такой способ позволяет без усложнения аппаратной составляющей встроенного устройства получить различные значения для начальной инициализации датчиков псевдослучайных чисел. В статье рассмотрена реализация подобного способа в устройстве с микроконтроллером. Было получено практическое подтверждение работоспособности предложенного способа для получения различных начальных значений для инициализации датчиков псевдослучайных чисел. Для полноценных выводов о качестве предложенного способа следует провести также дополнительные статистические исследования о типе распределения получаемых значений при работе с постоянным пользователем и с различными пользователями.

Литература

- 1 Кнут, Д. Глава 3. Случайные числа / Дональд Кнут // Искусство программирования The Art of Computer Programming. – 3-е изд. – М. : «Вильямс», 2007. – Т. 2. Получисленные алгоритмы. – 832 с.
- 2 Чечет, П.Л. Программные приёмы реализации адаптивной яркости в устройствах отображения / П.Л. Чечет, О.М. Демиденко // Проблемы физики, математики и техники. – 2013. – № 4 (17). – С. 72–76.

МАТЕМАТИКА

УДК 681.3.06:624.131

Моделирование методом конечных элементов неоднородных систем деформируемых твёрдых тел

Ю.Д. БОНДАРЕВА

Предложено дальнейшее развитие аналитического метода конечных элементов для исследования напряжённо-деформированного состояния неоднородных трёхмерных систем твёрдых тел

Ключевые слова: неоднородные трёхмерные системы твёрдых тел, метод конечных элементов, аналитика, развитие метода.

The further development of an analytical method of final elements for research of the stress-strain state of non-uniform three-dimensional systems of firm bodies is offered.

Keywords: non-uniform three-dimensional systems of firm bodies, method of final elements, analytics, development of a method.

Введение. Встречающиеся в природе и применяемые в производстве твердые тела обладают большим количеством свойств, учесть которые одновременно во многих случаях не представляется возможным. Поэтому при исследовании состояния твёрдых тел под нагрузкой выделяют те свойства, которые могут оказаться значимыми для целей исследования.

В классической теории упругости рассматривается однородное линейно-деформируемое твёрдое тело, заданной формы и с заданными физико-механическими характеристиками. На тело действуют заданные нагрузки и наложены некоторые связи. Требуется определить напряжения, деформации и перемещения в теле. При решении таких задач принимаются следующие допущения [1], [2]:

1. *Материал деформируемого твёрдого тела (элемента системы деформируемых твёрдых тел) представляет собой сплошную среду.*

Из допущения сплошности следует непрерывность распределения внутренних сил по объёму тела. Если говорить о напряжениях, переходим к пределу отношения внутренних сил, действующих на некоторой площадке к её площади, стремящейся к нулю, что имеет смысл только для сплошной среды:

$$\sigma_v = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta S},$$

где σ_v – вектор напряжений в точке, v – нормаль к площадке ΔS .

2. *Деформации в точках тела считаются малыми.*

Это допущение говорит о малости изменений размеров тела под действием нагрузок.

Системы деформируемых твёрдых тел. Принятые гипотезы послужили основой для разработки подходов к исследованию состояния деформируемых твёрдых тел под нагрузкой, которую стало возможным рассматривать не только как определённые внешние силы, но и как действие некоторых объектов внешней среды с возможным учётом их изменённого состояния. Таким образом, мы приходим к понятию физической (механической) системы.

В общем случае под системой понимают конечное множество элементов и связей между ними и между их свойствами, действующими с определенной целью как целостное образование.

В настоящей работе рассматриваются системы, элементами которых могут быть недеформируемые и деформируемые твёрдые тела, рассмотренные совместно с их свойствами и связями. Свойства системы зависят от свойств составляющих её элементов, но в целом будут другими. В задачах механики деформируемого твёрдого тела и механики грунтов системы содержат элементы разных типов и обладают разнородными связями между ними. Такие системы называют большими и сложными. Основными характерными особенностями сложных систем являются: уникальность, разнородность системы, слабая структурированность

теоретических и фактических знаний о системе; многокритериальность оценок процессов, протекающих в системе [3], [4], [5]. Из изложенного очевидно, что исследование систем деформируемых твёрдых тел методологически и функционально имеет принципиальные отличия от методов исследования отдельных деформируемых твёрдых тел. Основу этой методологии составляют математическое моделирование систем, численные методы исследования математических моделей систем, вычислительный эксперимент.

Подходы к исследованию деформаций трёхмерных систем твёрдых тел. Системный подход. Свойства системы, как сложного объекта, не обнаруживаются в свойствах её отдельных подсистем. Следовательно, изучение целого путём анализа его частей и суперпозиции их свойств непригодно для больших и сложных систем. А для физических нелинейных систем принцип прямой суперпозиции и вовсе непригоден. Решением проблемы становится *системный подход* [3], суть которого состоит во взаимосвязанном рассмотрении всех элементов (подсистем) системы. Основным при системном подходе является определение цели. Для каждой цели должен быть выбран свой надёжный критерий эффективности. Например, для деформируемых систем это может быть удовлетворение принципа стационарности полной энергии системы. Системный подход есть система принципов. Принципы системного подхода – это некоторые утверждения общего характера, обобщающие опыт человека по исследованию сложных систем.

Системный подход при исследовании различных систем, явлений, объектов позволяет с единых позиций строить общую методологию исследования указанных систем и процессов независимо от их природы. Эта методология содержит следующие этапы.

Этап 1. Определение системы.

1. Определение системы и области её существования.
2. Определение исследуемой функции системы.
3. Определение краевых условий.
4. Декомпозиция системы вплоть до простых элементов.
5. Определение свойств элементов системы и модулей.
6. Нахождение связей между элементами и модулями системы.

Этап 2. Построение математической модели.

1. Формальное описание исследуемой функции.
2. Разработка дискретной модели системы.
3. Разработка алгоритмической модели.

Этап 3. Исследование системы при различных входных воздействиях

При исследовании систем механики деформируемого твёрдого тела и механики грунтов возникают проблемы в связи с количеством объектов исследуемых систем, разнородностью их свойств и изменением этих свойств в процессе функционирования системы.

Математическое моделирование. Суть математического моделирования заключается в том, что различные изучаемые процессы могут иметь одинаковое математическое описание. Это значит, что если система определена и ее функция может быть описана с помощью математических и логических предложений, то исследование системы возможно математическими средствами и средствами вычислительной техники.

Построение математической модели системы. Так как природа элементов системы может быть различна, то это качество системы и принципы системного подхода в целом позволяют подойти к исследованию систем на высоком содержательном уровне. Наполнение системы определяет её предметную направленность и этим предопределяют методологию и технологию её исследования. В настоящей работе ставится задача исследования напряжённо-деформированного состояния системы деформируемых твёрдых тел в целом и на уровне её отдельных элементов. Для этого в каждом конкретном случае необходимо определить содержание границы и наполнение системы. От всего этого зависит облик исследуемой системы. Изложенный материал позволяет дать более строгое определение математической модели системы или объекта.

Математическая модель это конечная совокупность логико-математических предложений, адекватно отражающих основные закономерности и особенности реального объекта или системы, которые имеют свою среду (пространство) и условия существования.

Всякая реальная система или объект всегда имеют определенные связи с внешней средой, которая налагает свои условия на их существование и функционирование. Все эти и

другие качества в математической модели должны иметь своё отображение, а это значит, что математическая модель может иметь свою структурную схему [3], [4]. Для краевых задач механики грунтов структурная схема имеет вид:

1. Геометрическая модель деформируемой среды,
2. Уравнения состояния элементов структуры деформируемой среды,
3. Система краевых условий,
4. Условия равновесия (устойчивости) системы,
5. Математическая модель результата решения.

Предлагаемая структурная схема является общим эффективным алгоритмом построения математических моделей систем или объектов. В современной науке и технике возникающие проблемы, как правило, сводятся к построению математических моделей физических систем и разработке методов их исследования. В настоящее время наиболее эффективным методом исследования систем деформируемых твёрдых тел является метод конечных элементов.

Аналитический алгоритм метода конечных элементов для исследования напряжённо-деформированного состояния неоднородных трёхмерных систем твёрдых тел

Применение метода конечных элементов для исследования физических систем предусматривает дискретизацию исследуемых систем, определённых в двумерном или трёхмерном пространстве [2], [3]. Вопрос дискретизации трёхмерных объектов и систем деформируемых твёрдых тел более сложный, чем объектов и систем в двумерном пространстве. В настоящей работе применён принцип и алгоритм согласованной объёмной дискретизации объектов и систем в трёхмерном пространстве [3]. Дискретизацию будем производить конечными элементами в форме параллелепипедов, каждый из которых в свою очередь разбивается на шесть равновеликих тетраэдров тремя секущими плоскостями. В объёме параллелепипеда противоположные грани должны быть гомеоморфными, рисунок 1, что является основным условием согласованной дискретизации элементов системы твёрдых тел.

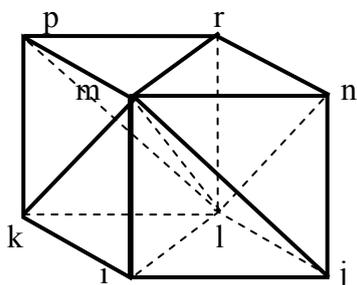


Рисунок 1 – Дискретизация параллелепипеда

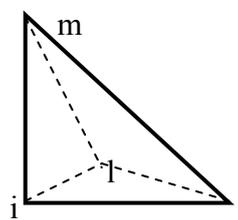


Рисунок 2 – Тетраэдр

Для тетраэдра основное уравнение метода конечных элементов имеет следующий вид:

$$\{R\} = [K]\{g\}, \quad (1)$$

где $\{R\}$, $\{g\}$ – векторы узловых усилий и перемещений соответственно, $[K]$ – матрица жёсткости.

Исследуемая физическая система, исходя из её размеров, структуры и свойств, подлежит нерегулярной дискретизации тетраэдрами. ***Для каждого тетраэдра строится локальная матрица жёсткости, учитывающая его оригинальные геометрические и физико-механические характеристики.*** Глобальная матрица жёсткости системы получается как сумма всех локальных матриц. Аналитический алгоритм построения локальной матрицы жёсткости покажем на примере одного произвольного трёхмерного конечного элемента.

Конечноэлементные соотношения для тетраэдра будем выводить, полагая, что к его вершинам приложены узловые усилия: $\{R\}^T = \{X_1, Y_1, Z_1, X_2, Y_2, Z_2, X_3, Y_3, Z_3, X_4, Y_4, Z_4\}$, которым будут соответствовать узловые перемещения:

$$\{g\}^T = \{U_1, V_1, W_1, U_2, V_2, W_2, U_3, V_3, W_3, U_4, V_4, W_4\}.$$

Для тетраэдра можно взять линейные функции для перемещений

$$\begin{aligned} U &= \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 z, \\ V &= \alpha_5 + \alpha_6 x + \alpha_7 y + \alpha_8 z, \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} W &= \alpha_9 + \alpha_{10} x + \alpha_{11} y + \alpha_{12} z \\ \{g_0\} &= [A]\{\alpha\}, \end{aligned} \tag{3}$$

или
где

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & x & y & z & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x & y & z & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x & y & z \end{bmatrix}, \tag{4}$$

$$\{\alpha\}^T = \{\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \dots \quad \alpha_{12}\}. \tag{5}$$

Так как (2) имеет место для любой точки тетраэдра, то для его узлов будем иметь

$$\{g\} = [B]\{\alpha\}, \tag{6}$$

где

$$[B] = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_1 & y_1 & z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_2 & y_2 & z_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_3 & y_3 & z_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_4 & y_4 & z_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix}, \tag{7}$$

x_i, y_i, z_i ($i = \overline{1,4}$) – координаты узлов тетраэдра.

Из (6) следует

$$\{\alpha\} = [B]^{-1}\{g\}, \tag{8}$$

$$\text{где } [B]^{-1} = \frac{1}{6\mathcal{V}} \begin{bmatrix} a_1 & 0 & 0 & a_2 & 0 & 0 & a_3 & 0 & 0 & a_4 & 0 & 0 \\ b_1 & 0 & 0 & b_2 & 0 & 0 & b_3 & 0 & 0 & b_4 & 0 & 0 \\ c_1 & 0 & 0 & c_2 & 0 & 0 & c_3 & 0 & 0 & c_4 & 0 & 0 \\ d_1 & 0 & 0 & d_2 & 0 & 0 & d_3 & 0 & 0 & d_4 & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & 0 & 0 & a_2 & 0 & 0 & a_3 & 0 & 0 & a_4 & 0 \\ 0 & b_1 & 0 & 0 & b_2 & 0 & 0 & b_3 & 0 & 0 & b_4 & 0 \\ 0 & c_1 & 0 & 0 & c_2 & 0 & 0 & c_3 & 0 & 0 & c_4 & 0 \\ 0 & d_1 & 0 & 0 & d_2 & 0 & 0 & d_3 & 0 & 0 & d_4 & 0 \\ 0 & 0 & a_1 & 0 & 0 & a_2 & 0 & 0 & a_3 & 0 & 0 & a_4 \\ 0 & 0 & b_1 & 0 & 0 & b_2 & 0 & 0 & b_3 & 0 & 0 & b_4 \\ 0 & 0 & c_1 & 0 & 0 & c_2 & 0 & 0 & c_3 & 0 & 0 & c_4 \\ 0 & 0 & d_1 & 0 & 0 & d_2 & 0 & 0 & d_3 & 0 & 0 & d_4 \end{bmatrix};$$

\mathcal{V} – объём элементарного тетраэдра;

$$a_i = (-1)^{i+1} \begin{vmatrix} x_j & y_j & z_j \\ x_k & y_k & z_k \\ x_n & y_n & z_n \end{vmatrix}, \quad b_i = (-1)^i \begin{vmatrix} 1 & y_j & z_j \\ 1 & y_k & z_k \\ 1 & y_n & z_n \end{vmatrix},$$

$$c_i = (-1)^{i+1} \begin{vmatrix} 1 & x_j & z_j \\ 1 & x_k & z_k \\ 1 & x_n & z_n \end{vmatrix}, \quad d_i = (-1)^i \begin{vmatrix} 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \\ 1 & x_n & y_n \end{vmatrix},$$

i, j, k, n – номера вершин элементарного тетраэдра.

Остальные значения a, b, c, d получаются круговой перестановкой индексов. Отметим, что и в этом случае порядок обхода узлов тетраэдра не имеет значения, если неизвестные коэффициенты $\{\alpha\}^T = \{\alpha_1 \ \alpha_2 \ \dots \ \alpha_{12}\}$ в (2) определять сразу так, как это описано для определения соответствующих коэффициентов для плоской задачи [3, п. 3.4.2].

Используя уравнения Коши и обобщённый закона Гука, получим:

$$\{\varepsilon\} = [C]\{\alpha\}, \quad (9)$$

$$\{\sigma\} = [E]\{\varepsilon\} = [E][C]\{\alpha\}, \quad (10)$$

где

$$[C] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$[E] = \begin{bmatrix} 2G + \lambda & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & 2G + \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & 2G + \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где G, λ – модуль сдвига и коэффициент Ламе единичного элемента.

Подставим (8) в (9) и (10), тогда получим:

$$\{\varepsilon\} = [C][B]^{-1}\{g\}, \quad (13)$$

$$\{\sigma\} = [E][C][B]^{-1}\{g\}. \quad (14)$$

На основании принципа возможных перемещений:

$$\{\delta g\}^T \{R\} = \int_V \{\delta \varepsilon\}^T \{\sigma\} d\mathcal{V}. \quad (15)$$

Подставив в (15) выражения (13) и (14) и учитывая, что в рассматриваемом случае все матрицы и $\{g\}$ не зависят от текущих координат, получим

$$\{R\} = [D]^T [E][D]\{g\} \mathcal{V}, \quad (16)$$

следовательно, для тетраэдра:

$$[K] = [D]^T [E_0][D] \mathcal{V}, \quad \text{где } [D] = [C][B]^{-1}. \quad (17)$$

Выполнив матричные операции в (17), получим

$$[K] = \frac{1}{36\mathcal{V}} \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

где $[k_{ij}] = \begin{bmatrix} b_i b_j \rho + (c_i c_j + d_i d_j) G & b_i c_j \lambda + c_i b_j G & b_i d_j \lambda + d_i b_j G \\ c_i b_j \lambda + b_i c_j G & c_i c_j \rho + (b_i b_j + d_i d_j) G & c_i d_j \lambda + d_i c_j G \\ d_i b_j \lambda + b_i d_j G & d_i c_j \lambda + c_i d_j G & d_i d_j \rho + (c_i c_j + b_i b_j) G \end{bmatrix}$, i – номер

узла, связанного с узлами j ; $i, j=1,2,3,4$; $\rho = 2G + \lambda$, G, λ – модуль сдвига и коэффициент

Ламе: $G = \frac{E}{2(1 + \mu)}$; $\lambda = \frac{\mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)} E$.

Коэффициенты E и μ при построении глобальной матрицы жесткости включаются в структуру соответствующих вычисляемых матриц. Глобальная матрица жесткости системы, определяющая жесткость физической системы в целом, строится в следующем порядке

$$K = \sum_{r=1}^N k_{ij}^r, \tag{19}$$

где N – количество конечных элементов дискретизованной области.

Суммирование $K = \sum_{r=1}^N k_{ij}^r$, производится, учитывая номера конечных элементов и узлов.

Покажем сказанное на примере для двумерной задачи. Пусть дискретизованная область имеет вид прямоугольника (рис 3). Глобальная матрица жесткости для этого ансамбля может быть получена следующим образом:

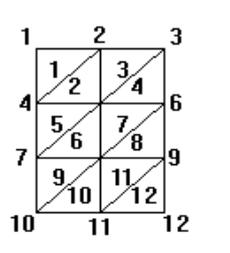


Рисунок 3 – Схема дискретизации

- 1) формируем соответствующее матричное поле, пока не заполненное (двумерный массив);
- 2) рассматриваем i -й конечный элемент и для него вычисляем матричные коэффициенты по следующей формуле:

$$[k_{mn}] = \begin{bmatrix} b_m b_n + \frac{1-\mu}{2} c_m c_n & \mu b_m c_n + \frac{1-\mu}{2} c_m b_n \\ \mu c_m b_n + \frac{1-\mu}{2} b_m c_n & c_m c_n + \frac{1-\mu}{2} b_m b_n \end{bmatrix}, \tag{20}$$

которые прибавляем к глобальной матрице на позиции, определяемые глобальными номерами рассматриваемых узлов и конечных элементов (верхние индексы). Следовательно, соблюдая глобальную нумерацию узлов дискретизации, получим:

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{11}^1 & K_{12}^1 & 0 & K_{14}^1 & 0 & 0 & \dots \\ K_{21}^1 & K_{22}^{1+2+3} & K_{23}^3 & K_{24}^{1+2} & K_{25}^{2+3} & 0 & \dots \\ 0 & K_{32}^3 & K_{33}^{3+4} & 0 & K_{35}^{3+4} & K_{36}^4 & \dots \\ K_{41}^1 & K_{42}^{1+2} & 0 & K_{44}^{1+2+5} & K_{45}^{2+5} & 0 & \dots \\ 0 & K_{52}^{2+3} & K_{53}^{3+4} & K_{54}^{2+5} & K_{55}^{2+3+4+5+6+7} & K_{56}^{4+7} & \dots \\ 0 & 0 & K_{63}^4 & 0 & K_{65}^{4+7} & K_{66}^{4+7+8} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

Ввиду того, что матрица жесткости системы имеет ленточную структуру и симметрична относительно главной диагонали, в памяти ЭВМ достаточно сформировать и хранить элементы верхней или нижней полуленты. После построения матрицы жесткости $[K]$ всей системы, составляется система линейных уравнений

$$[K]\{\delta\} = \{P\}, \quad (21)$$

где $\{P\}^T = \{X_1, Y_1, X_2, Y_2, \dots, X_n, Y_n\}$ – вектор узловых сил; $\{\delta\}^T = \{U_1, V_1, U_2, V_2, \dots, U_n, V_n\}$ – вектор узловых перемещений.

В своём первоначальном виде система решения не имеет, т.к. матрица жёсткости $[K]$ сингулярная – её главный определитель равен нулю. Учёт граничных условий приводит к изменению матрицы жёсткости $[K]$ и векторов $\{P\}$ и $\{\delta\}$. Матрица $[K]$ уже не будет сингулярной и система (21) будет иметь решение.

Для реальных задач система (21) имеет порядки, измеряемые сотнями уравнений. Наиболее эффективным методом решения больших СЛАУ является метод сопряженных градиентов.

Литература

1. Безухов, Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести / Н.И. Безухов. – М. : Высш. шк., 1968. – 512 с.
2. Быховцев, В.Е. Компактный алгоритм построения матрицы жесткости в методе конечных элементов / В.Е. Быховцев // Весці АН БССР. Сер. ф.-м. навук. – 1983. – № 1. – С. 34–37.
3. Быховцев, В.Е. Компьютерное объектно-ориентированное моделирование нелинейных систем деформируемых твёрдых тел / В.Е. Быховцев. – Гомель : УО «ГГУ им. Ф. Скорины», 2007. – 219 с.
4. Журавков, М.А. Математическое моделирование деформационных процессов в твёрдых деформируемых средах / М.А. Журавков. – Мн. : БГУ, 2002. – 456 с.
5. Цытович, Н.А. Механика грунтов / Н.А. Цытович. – М. : Стройиздат, 1963. – 542 с.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступила в редакцию 15.09.2015

Инвариантность стационарного распределения замкнутых сетей с многорежимными стратегиями обслуживания и разнотипными заявками

А.Р. ЕРЕМИНА

Рассматривается замкнутая сеть массового обслуживания с многорежимными стратегиями и разнотипными заявками. Время пребывания прибора в каждом режиме имеет показательное распределение, а количество работы по обслуживанию поступающих заявок – произвольное распределение с конечным математическим ожиданием. Устанавливается инвариантность стационарного распределения вероятностей состояний сети по отношению к функциональной форме распределений величин работ, требующихся на обслуживание заявок.

Ключевые слова: сеть массового обслуживания, инвариантность, многорежимное обслуживание, LCFS PR.

The closed queuing network with multimode service and heterogeneous applications is considered. The residence time of the device in each mode has an exponential distribution. The quantity of work, which is necessary for servicing of incoming demands, has an arbitrary distribution with finite expectation value. It is proved that stationary distribution of queuing network state probabilities is invariant in relation to functional form of distribution of work's quantities, which are necessary for servicing of demands.

Keywords: queuing network, invariance, multimode service, LCFS PR.

Введение. Сети массового обслуживания с многорежимными стратегиями позволяют моделировать ситуации, когда обслуживающие приборы частично надёжны, что особенно актуально для реальных транспортных и производственных сетей, сетей связи и передачи данных, информационных и компьютерных сетей и т. д. Такие сети рассматривались, например, в [1]–[3]. Ю.В. Малинковским, А.Ю. Нуеманом и Ю.Е. Летунович в [4]–[6] исследовались сети с многорежимными стратегиями в случае различных дисциплин обслуживания, причем Ю.Е. Летунович были впервые рассмотрены сети с многорежимными стратегиями и заявками нескольких типов. Было установлено, что стационарное распределение вероятностей состояний таких сетей имеет форму произведения. Однако в указанных работах полагалось, что длительности обслуживания заявок и времена пребывания приборов в режимах имеют экспоненциальные распределения. В реальных сетях указанные распределения чаще всего отличаются от экспоненциального.

Результаты для сетей с многорежимными стратегиями обслуживания были обобщены А.Н. Старовойтовым в [7]–[8] на случай произвольного распределения времени обслуживания. Однако в работах А.Н. Старовойтова свойство инвариантности устанавливалось для сетей с заявками одного типа, что ограничивает использование полученных результатов.

Поэтому в данной работе рассматриваются сети, в которых величина работы по обслуживанию заявки имеет произвольный закон распределения. Устанавливается, что стационарное распределение вероятностей состояний указанных сетей не зависит от вида законов распределения величин работ по обслуживанию заявок в узлах и имеет мультипликативную форму, если фиксированы первые моменты этих законов.

Описание сети. Рассматривается замкнутая сеть массового обслуживания, состоящая из N однолинейных узлов, в которой циркулируют заявки M типов ($\sum_{l=1}^N n(l) = \bar{N} < \infty$ заявок).

После обслуживания в l -м узле заявка типа u независимо от других заявок мгновенно направляется в k -й узел и становится заявкой типа v с вероятностью $P_{(l,u)(k,v)}$

$$\left(\sum_{k=1}^N \sum_{v=1}^M P_{(l,u)(k,v)} = 1; l, k = \overline{1, N}; u, v = \overline{1, M} \right).$$

В каждом из N узлов находится единственный обслуживающий прибор, который может работать в $r_l + 1$ режимах $0, 1, \dots, r_l$, $l = \overline{1, N}$. Переключение может осуществляться только на соседние

режимы. По истечении времени пребывания в режиме прибор переходит в другой режим мгновенно. Во время переключения прибора с одного режима на другой число заявок в узле не меняется.

Заявки в узлах обслуживаются в соответствии с дисциплиной LCFS PR (Last Come – First Served Preemptive Resume). Заявка, поступающая в узел, вытесняет заявку с прибора и начинает обслуживаться, а вытесненная заявка становится первой в очереди на обслуживание. Таким образом, поступающие в узел заявки имеют абсолютный приоритет.

Нумерация заявок в очереди на каждый узел осуществляется от конца очереди к прибору, то есть если в l -м узле в момент времени t находится $n(l)$ заявок, то заявка, которая находится на обслуживании, имеет номер $n(l)$, а последняя заявка в очереди – номер 1. Поступающая заявка начинает сразу обслуживаться и получает номер $n(l)+1$, а вытесненная заявка сохраняет номер $n(l)$ и становится первой в очереди на дообслуживание.

Состояние сети в момент времени t характеризуется вектором $x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t))$, где состояние l -го узла в момент времени t описывается вектором $x_l(t) = (\bar{x}_l(t), j_l(t)) = (x_{l1}(t), x_{l2}(t), \dots, x_{l,n(l)}(t), j_l(t))$, $x_{l1}(t)$ – тип заявки, стоящей последней в очереди на обслуживание в l -м узле в момент времени t , $x_{l2}(t)$ – тип заявки, стоящей предпоследней в очереди на обслуживание в l -м узле в момент времени t и т. д., $x_{l,n(l)-1}(t)$ – тип заявки, стоящей первой в очереди на обслуживание в l -м узле в момент времени t , $x_{l,n(l)}(t)$ – тип заявки, находящейся на обслуживании в l -м узле в момент времени t , $j_l(t)$ – режим, в котором находится l -ый узел в момент времени t . Процесс $x(t)$ обладает конечным фазовым пространством состояний $Y = \{x \in X_1 \times X_2 \times \dots \times X_N : n(1) + n(2) + \dots + n(N) = \bar{N} < \infty\}$, где $X_l = \{(0, j_l), (x_{l1}, j_l), (x_{l1}, x_{l2}, j_l), (x_{l1}, x_{l2}, x_{l3}, j_l), \dots : x_{lk} = \overline{1, M}, k = 1, 2, \dots, n(l); j_l = \overline{0, r_l}\}$.

В качестве основного режима работы прибора полагается режим 0. Переход возможен только на соседние режимы.

Время пребывания в основном режиме работы имеет экспоненциальное распределение с параметром $\nu_l(\bar{x}_l, 0)$, после чего прибор переходит в режим 1. Для состояний x_l , у которых $1 \leq j_l \leq r_l - 1$, время пребывания в режиме l также имеет экспоненциальное распределение, при этом с интенсивностью $\varphi_l(x_l)$ прибор l -го узла переходит в режим $(j_l - 1)$, а с интенсивностью $\nu_l(x_l)$ – в режим $(j_l + 1)$. Время пребывания в последнем r_l -м режиме имеет экспоненциальное распределение с параметром $\varphi_l(\bar{x}_l, r_l)$, после чего прибор переходит в режим $(r_l - 1)$.

Для упрощения записей введём в рассмотрение операторы:

$$T_u^+(\bar{x}_l) = T_u^+(x_{l1}, \dots, x_{l,n(l)}) = (x_{l1}, \dots, x_{l,n(l)}, u),$$

$$T^-(\bar{x}_l) = T^-(x_{l1}, \dots, x_{l,n(l)}) = (x_{l1}, \dots, x_{l,n(l)-1}),$$

$$T_{(l,u)}^+(x) = T_{(l,u)}^+(x_1, \dots, x_N) = (\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_N), \text{ где } \tilde{x}_k = x_k \text{ при } k \neq l, \tilde{x}_l = (T_u^+(\bar{x}_l), j_l),$$

$$T_l^-(x) = T_l^-(x_1, \dots, x_N) = (\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_N), \text{ где } \tilde{x}_k = x_k \text{ при } k \neq l, \tilde{x}_l = (T^-(\bar{x}_l), j_l),$$

$$R_l^{j_l+1}(x) = R_l^{j_l+1}(x_1, \dots, x_N) = (\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_N), \text{ где } \tilde{x}_k = x_k \text{ при } k \neq l, \tilde{x}_l = (\bar{x}_l, j_l + 1),$$

$$R_l^{j_l-1}(x) = R_l^{j_l-1}(x_1, \dots, x_N) = (\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_N), \text{ где } \tilde{x}_k = x_k \text{ при } k \neq l, \tilde{x}_l = (\bar{x}_l, j_l - 1),$$

$$l = \overline{1, N}, u = \overline{1, M}.$$

Если в момент времени t состояние l -го узла представляет собой вектор (\bar{x}_l, j_l) и сразу после указанного момента в этот узел поступает заявка типа u , которая начинает немедленно обслуживаться, то количество работы по её обслуживанию является случайной величиной $\eta_l(T_u^+(\bar{x}_l))$ с функцией распределения $B_l(T_u^+(\bar{x}_l), \tilde{u})$ и математическим ожиданием $\tau_l(T_u^+(\bar{x}_l)) < \infty$. При этом $B_l(T_u^+(\bar{x}_l), 0) = 0$.

Если в момент времени t состояние l -го узла – вектор (\bar{x}_l, j_l) , то обслуживание ведётся со скоростью $\alpha_l(\bar{x}_l, j_l)$, то есть зависит от состояния узла.

Переход прибора из режима обслуживания 0 в режим обслуживания 1 можно трактовать как частичную потерю работоспособности прибора, влекущую уменьшение скорости обслуживания с $\alpha_l(\bar{x}_l, 0)$ на $\alpha_l(\bar{x}_l, 1)$.

Аналогично, переход из режима j_l в режим $(j_l + 1)$ означает переход прибора в более щадящий режим обслуживания. Переход прибора из режима j_l в режим $(j_l - 1)$ означает восстановление тех возможностей, которые были утеряны при переходе из режима $(j_l - 1)$ в режим j_l .

Полагаем, что матрица $(p_{(l,u)(k,v)})$, $u, v = \overline{1, M}$, $l, k = \overline{1, N}$, неприводима. Тогда уравнение трафика

$$\varepsilon_{lu} = \sum_{k=1}^N \sum_{v=1}^M \varepsilon_{kv} p_{(k,v)(l,u)}, l = \overline{1, N}; u = \overline{1, M}, \quad (1)$$

имеет единственное с точностью до постоянного множителя положительное решение $(\varepsilon_{lu}; l = \overline{1, N}, u = \overline{1, M})$.

Через $\psi_{lk}(t)$ обозначим количество работы, которое осталось выполнить с момента t для завершения обслуживания заявки, стоящей в момент времени t на k -й позиции в l -м узле, $\psi_l(t) = (\psi_{l1}(t), \psi_{l2}(t), \dots, \psi_{l,n(l)}(t))$, $l = \overline{1, N}$.

В силу сказанного выше

$$\frac{d\psi_{l,k}(t)}{dt} = -\alpha_l(x_{l1}, x_{l2}, \dots, x_{lk}, j_l),$$

если состояние l -го узла (\bar{x}_l, j_l) .

В общем случае процесс $x(t)$ не является марковским, поэтому рассмотрим кусочно-линейный марковский процесс $\zeta(t) = (x(t), \psi(t))$, который получается из $x(t)$ добавлением непрерывной компоненты $\psi(t) = (\psi_1(t), \psi_2(t), \dots, \psi_N(t))$.

Под $P = \{P(x)\}$ будем понимать стационарное распределение вероятностей состояний процесса $x(t)$.

Функции

$$F(x, y) = F(x, y_{11}, y_{12}, \dots, y_{1,n(1)}; y_{21}, y_{22}, \dots, y_{2,n(2)}; \dots; y_{N1}, y_{N2}, \dots, y_{N,n(N)}) = \\ = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{x(t) = x; \psi_{l1}(t) < y_{l1}, \psi_{l2}(t) < y_{l2}; \dots; \psi_{l,n(l)}(t) < y_{l,n(l)}, l = \overline{1, N}\}$$

будем называть стационарными функциями распределения вероятностей состояний кусочно-линейного процесса $\zeta(t)$.

Основной результат. Для описанных выше сетей имеет место следующая теорема.

Теорема. Если выполняются соотношения

$$v_l(\bar{x}_l, j_l - 1) \alpha_l(\bar{x}_l, j_l) \varphi_l(T^-(\bar{x}_l), j_l) = v_l(T^-(\bar{x}_l), j_l - 1) \alpha_l(\bar{x}_l, j_l - 1) \varphi_l(\bar{x}_l, j_l), \quad (2)$$

$$l = \overline{1, N}, j_l = \overline{1, r_l}, n(l) \geq 1, \sum_{l=1}^N n(l) = \overline{N} < \infty,$$

то стационарные функции распределения вероятностей состояний $F(x, y)$ определяются по формулам

$$F(x, y) = C(N, M, \overline{N}) p_1(x_1) p_2(x_2) \times \dots \times p_N(x_N) \times \\ \times \prod_{l=1}^N \prod_{w=1}^{n(l)} \tau_l^{-1}(x_{l1}, x_{l2}, \dots, x_{lw}) \int_0^{y_{l,w}} (1 - B_l(x_{l1}, x_{l2}, \dots, x_{lw}, \tilde{u})) d\tilde{u}, \quad (3)$$

где

$$p_l(\bar{x}_l, j_l) = \prod_{w=1}^{n(l)} \frac{\varepsilon_{l,x_{lw}} \tau_l(x_{l1}, x_{l2}, \dots, x_{lw})}{\alpha_l(x_{l1}, x_{l2}, \dots, x_{lw}, j_l)} \prod_{k=1}^{j_l} \frac{v_l(0, k-1)}{\varphi_l(0, k)}, \quad (4)$$

$\varepsilon_{l,x_{lw}}$ находятся из (1), а

$$C(N, M, \bar{N})^{-1} = \sum_{\substack{n(1), n(2), \dots, n(N) \geq 0, \\ n(1) + n(2) + \dots + n(N) = \bar{N}}} \sum_{j_1=0}^{r_1} \sum_{j_2=0}^{r_2} \dots \sum_{j_N=0}^{r_N} \prod_{l=1}^N \prod_{w=1}^{n(l)} \frac{\varepsilon_{l, x_{lw}} \tau_l(x_{l1}, x_{l2}, \dots, x_{lw})}{\alpha_l(x_{l1}, x_{l2}, \dots, x_{lw}, j_l)} \times \quad (5)$$

$$\times \prod_{k=1}^{j_l} \frac{\nu_l(0, k-1)}{\varphi_l(0, k)}, x \in Y.$$

Доказательство. Для $F(x, y)$ справедлива следующая система разностно-дифференциальных уравнений:

$$\left(\sum_{l=1}^N (\nu_l(\bar{x}_l, j_l) + \varphi_l(\bar{x}_l, j_l)) \right) F(x, y) = \quad (6)$$

$$= \sum_{l=1}^N \alpha_l(\bar{x}_l, j_l) \left(\frac{\partial F(x, y)}{\partial y_{l, n(l)}} - \left(\frac{\partial F(x, y)}{\partial y_{l, n(l)}} \right)_{y_{l, n(l)}=0} \right) +$$

$$+ \sum_{l=1}^N \sum_{s=1, s \neq l}^N \sum_{u=1}^M \alpha_s(T_u^+(\bar{x}_s), j_s) p_{(s, u)(l, x_{l, n(l)})} B_l(\bar{x}_l, y_{l, n(l)}) \left(\frac{\partial F(T_{(s, u)}^+(T_l^-(x)), y)}{\partial y_{s, n(s)+1}} \right)_{y_{s, n(s)+1}=0} +$$

$$+ \sum_{l=1}^N \sum_{u=1}^M \alpha_l(\bar{x}_l, j_l) p_{(l, u)(l, x_{l, n(l)})} B_l(\bar{x}_l, y_{l, n(l)}) \left(\frac{\partial F(T_{(l, u)}^+(T_l^-(x)), y)}{\partial y_{l, n(l)}} \right)_{y_{l, n(l)}=0} +$$

$$+ \sum_{l=1}^N \nu_l(\bar{x}_l, j_l - 1) F(R_l^{j_l-1}(x), y) + \sum_{l=1}^N \varphi_l(\bar{x}_l, j_l + 1) F(R_l^{j_l+1}(x), y), x \in X.$$

Для данных уравнений предполагаем, что если аргумент функции $F(x, y)$ не принадлежит фазовому пространству, то есть $x \notin Y$, то $F(x, y) = 0$.

Разобьём полученную систему на уравнения локального баланса следующим образом:

$$\sum_{l=1}^N \alpha_l(\bar{x}_l, j_l) \left(\left(\frac{\partial F(x, y)}{\partial y_{l, n(l)}} \right)_{y_{l, n(l)}=0} - \frac{\partial F(x, y)}{\partial y_{l, n(l)}} \right) = \quad (7)$$

$$+ \sum_{s=1, s \neq l}^N \sum_{u=1}^M \alpha_s(T_u^+(\bar{x}_s), j_s) p_{(s, u)(l, x_{l, n(l)})} B_l(\bar{x}_l, y_{l, n(l)}) \left(\frac{\partial F(T_{(s, u)}^+(T_l^-(x)), y)}{\partial y_{s, n(s)+1}} \right)_{y_{s, n(s)+1}=0} +$$

$$+ \sum_{u=1}^M \alpha_l(\bar{x}_l, j_l) p_{(l, u)(l, x_{l, n(l)})} B_l(\bar{x}_l, y_{l, n(l)}) \left(\frac{\partial F(T_{(l, u)}^+(T_l^-(x)), y)}{\partial y_{l, n(l)}} \right)_{y_{l, n(l)}=0},$$

$$(v_l(\bar{x}_l, j_l) + \varphi_l(\bar{x}_l, j_l)) F(x, y) = \quad (8)$$

$$= v_l(\bar{x}_l, j_l - 1) F(R_l^{j_l-1}(x), y) + \varphi_l(\bar{x}_l, j_l + 1) F(R_l^{j_l+1}(x), y).$$

Покажем, что функции распределения вероятностей $F(x, y)$, определенные формулами (3)–(5), являются решением уравнений (7)–(8) и, следовательно, уравнений (6).

Действительно, подставим (3) в уравнение (7), приведём подобные слагаемые и разделим обе части полученного соотношения на $B_l(\bar{x}_l, y_{l, n(l)}) F(T_l^-(x), y)$. Получим уравнение трафика (1). Подставим (3) в (8). Учитывая (2), получим тождество.

Теорема доказана.

Из доказанной теоремы с учётом равенства $P(x) = F(x, +\infty)$ следует утверждение.

Следствие. Если выполняются соотношения (2) и фиксированы первые моменты, то стационарное распределение $\{P(x), x \in Y\}$ не зависит от вида функций распределения $B_l(\bar{x}_l, \tilde{y})$ и имеет вид

$$P(x) = C(N, M, \bar{N}) p_1(x_1) p_2(x_2) \times \dots \times p_N(x_N),$$

где $p_l(x_l)$, $l = \overline{1, N}$, находятся по формулам (4), а $C(N, M, \bar{N})$ – (5).

Заключение. В работе установлены условия инвариантности стационарного распределения вероятностей состояний замкнутой сети с многорежимными стратегиями обслуживания и заявками разных типов от вида законов распределения величин работ, требующихся на обслуживание заявок в узлах, когда дисциплиной обслуживания является LCFS PR (абсолютный приоритет поступающего требования с дообслуживанием). При этом установлено, что стационарное распределение сети имеет форму произведения, где каждый множитель есть распределение отдельного узла, помещенного в фиктивную окружающую среду. Этот результат был получен с помощью метода расширения фазового пространства: когда процесс, описывающий поведение сети (вообще говоря, немарковский), дополняют непрерывными компонентами. Описанный «расширенный» процесс является кусочно-линейным марковским процессом, для которого было найдено стационарное распределение.

Литература

1. Ивницкий, В.А. Теория сетей массового обслуживания / В.А. Ивницкий. – М. : Физматлит, 2004. – 772 с.
2. Ковалев, Е.А. Сети с ненадежными каналами и резервом / Е.А. Ковалев // Математические методы исследования сетей связи и сетей ЭВМ : тезисы докладов VI Белорусской школы-семинара по ТМО. – Минск, 1990. – С. 70–71.
3. Ковалев, Е.А. Стационарное распределение двухузловой замкнутой ненадежной сети с делящимся резервом / Е.А. Ковалев, Н.А. Чикунова // Современные математические методы исследования телекоммуникационных сетей : материалы международной конференции. – Минск, 1999. – С. 85–89.
4. Летунович, Ю.Е. Мультипликативность стационарного распределения состояний открытой сети с несколькими типами заявок и многорежимными стратегиями / Ю.Е. Летунович, Ю.В. Малинковский // Массовое обслуживание: потоки, системы, сети : материалы Междунар. науч. конф. «Математические методы повышения эффективности информационно-телекоммуникационных сетей», Гродно, 29 янв.–1 февр. 2007 г. / редкол. : А.Н. Дудин (отв. ред.) [и др.]. – Минск : РИВШ, 2007. – Вып. 19. – С. 134–137.
5. Малинковский, Ю.В. Замкнутые информационные сети с многорежимными стратегиями обслуживания / Ю.В. Малинковский, А.Ю. Нуеман // Информационные системы и технологии (IST'2002) : материалы I Междунар. конф., Минск, 5–8 ноября 2002 г. : в 2 ч. / Белорусский гос. ун-т. ; – Минск, 2002. – Ч. 1. – С. 324–328.
6. Нуеман, А.Ю. Замкнутые сети с многорежимными стратегиями обслуживания / А.Ю. Нуеман // Массовое обслуживание. Потоки, системы, сети : материалы Междунар. конф. «Современные математические методы исследования информационно-вычислительных сетей», г. Минск, 23–25 янв. 2001 г. / Белорусский гос. ун-т. – Минск, 2001. – Вып. 16. – С. 159–160.
7. Старовойтов, А.Н. Инвариантность стационарного распределения сетей с многорежимными стратегиями обслуживания и дисциплиной обслуживания PS / А.Н. Старовойтов // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях : материалы IX Республиканской научной конференции студентов и аспирантов, Гомель, 13–15 марта 2006 г. / ГГУ им. Ф. Скорины ; редкол. : Д.Г. Лин [и др.]. – Гомель, 2006. – С. 199–200.
8. Старовойтов, А.Н. Инвариантность стационарного распределения состояний сетей с многорежимными стратегиями обслуживания / А.Н. Старовойтов // Проблемы передачи информации. – 2006. – Т. 42, № 4. – С. 121–128.

УДК 519.23:656.072

Исследование транспортных пассажиропотоков методами дисперсионного и регрессионного анализов

С.И. ЖОГАЛЬ¹, С.П. ЖОГАЛЬ², М.А. МАСЛОВСКАЯ¹

На основе методов регрессионного и дисперсионного анализов определены факторы, существенно влияющие на динамику транспортных пассажиропотоков, построены регрессионные зависимости для пассажиропотоков.

Ключевые слова: транспортные пассажиропотоки, прикладной статистический анализ, регрессионный анализ, дисперсионный анализ.

On the basis of regression analysis and analysis of variance the factors that significantly affect the dynamics of transport passenger traffics, are identified and regression dependences for passenger traffics are developed.

Keywords: transport passenger traffics, applied statistical analysis, regression analysis, analysis of variance.

Изучение сложных объектов и процессов, являющихся по своей природе стохастическими, возможно лишь на основе применения методов прикладной статистики. Методы прикладной статистики, дисперсионного и регрессионного анализов являются весьма эффективными при исследовании прикладных задач в различных областях науки, техники и производства. Построение регрессионных моделей по опытным данным, выявление факторов, оказывающих существенное влияние на исследуемый процесс, позволяют строить прогнозы и принимать стратегические решения с использованием компьютерного моделирования и прогнозирования.

Рассмотрим задачу построения регрессионных моделей по имеющимся опытным данным при исследовании транспортных потоков. Разработка прогнозных моделей с помощью методов множественной регрессии является важной задачей нахождения математических зависимостей, отражающих статистическую связь транспортного потока с группой других факторов, от которых он зависит [1]. Для прогноза развития железнодорожных магистралей необходимо было построить регрессионные модели зависимости пассажиропотоков на железнодорожном и воздушном транспорте в районе тяготения магистрали Воронеж–Ростов-на-Дону. По данным исследования пассажиропотоков на железнодорожном и воздушном транспорте была составлена следующая таблица.

Таблица 1 – Распределение пассажиропотоков (тыс. чел.) по зонам дальности поездки, видам транспорта и годам

Дальность поездки (км)	2008 г.		2010 г.		2012 г.	
	ж/д	воздушный	ж/д	воздушный	ж/д	воздушный
0–300	191	14	210	17	273	20
301–500	392	12	408	23	575	17
501–800	301	30	313	25	443	21
801–1200	183	33	179	41	265	30
1201–2000	95	27	108	60	152	19
2001–3000	9	9	10	19	57	5

В качестве целевого фактор-признака y , зависящего от других факторов, будем рассматривать количество пассажиров, а в качестве объясняющих фактор-признаков:

x_1 – «код» зоны дальности поездки;

x_2 – «код» вида транспорта (железнодорожный или воздушный);

x_3 – «код» года совершения поездки.

Методами дисперсионного анализа установим степень и значимость влияния объясняющих факторов на целевой признак y . Для этого применим метод однофакторного дисперсионного анализа (однофакторной классификации) [2]–[4].

Однофакторная классификация. Пусть получено p выборок из p ($p > 1$) генеральных совокупностей и необходимо сопоставить p значений выборочных средних. В этом случае можно говорить о разделении фактора A на p уровней или классов. Действие фактора A проявляется в p сравниваемых средних значениях. Будем исходить из следующей линейной модели, описывающей наблюдения:

$$y_{ij} = m + a_i + e_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, n_i, \quad i = 1, 2, \dots, p, \quad (1)$$

где n_i – объем выборки для i -го уровня фактора A , m – общее среднее значение, a_i – эффект i -го уровня фактора A , e_{ij} – независимые и нормально распределенные ошибки наблюдений с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ^2 . Дополнительно к (1) добавляется условие

$$n_1 a_1 + n_2 a_2 + \dots + a_p n_p = 0,$$

которое означает, что a_i группируются около общего среднего m в виде положительных и отрицательных эффектов.

Применяя метод наименьших квадратов (МНК), связанный с минимизацией суммы квадратов ошибок:

$$S = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - m - a_i)^2 \quad (2)$$

получаем следующие оценки параметров:

$$\hat{m} = y_{..} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij}$$

$$\hat{a}_i = y_{i\cdot} - y_{..} = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij} - \hat{m}, \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (3)$$

$$n = n_1 + n_2 + \dots + n_p$$

Результаты измерений при однофакторной классификации удобно представлять в виде следующей таблицы:

Таблица 2 – Результаты измерений при однофакторной классификации с повторными наблюдениями

i	j	Число наблюдений по выборкам				Среднее по выборкам
		1	2	...	n_i	
Уровни фактора A	1	y_{11}	y_{12}	...	y_{1n_1}	$y_{1\cdot}$
	2	y_{21}	y_{22}	...	y_{2n_2}	$y_{2\cdot}$

	p	y_{p1}	y_{p2}	...	y_{pn_p}	$y_{p\cdot}$
						$y_{..}$

Смысл дисперсионного анализа при однофакторной классификации заключается в проверке гипотезы:

$$H_A : a_1 = a_2 = \dots = a_p = 0, \quad (4)$$

означающей равное воздействие всех p уровней фактора, т. е. отсутствие существенного влияния фактора A на выходную переменную y .

Для проверки данной гипотезы потребуются следующие величины:

$$y_{..} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij}, \quad y_{i\cdot} = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij}$$

$$S_A = \sum_{i=1}^p n_i (y_{i\cdot} - y_{\cdot\cdot})^2 \quad (5)$$

$$S_G = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - y_{\cdot\cdot})^2,$$

$$S_R = S_G - S_A.$$

Если справедлива гипотеза H_A , то отношение

$$F = \frac{S_A^2}{S_R^2}, \quad (6)$$

где

$$s_A^2 = \frac{S_A}{(p-1)} \quad (7)$$

$$s_R^2 = \frac{S_R}{(n-p)}$$

имеет F-распределение с числами степеней свободы $\phi_1 = p-1, \phi_2 = n-p$. Здесь s_R^2 – несмещенная оценка дисперсии экспериментальной ошибки. Гипотеза H_A отвергается при выбранном уровне значимости α , если $F > F_{kp}$, где F_{kp} критическое значение F-распределения. В противном случае гипотеза принимается, т. е. делается вывод о том, что результаты наблюдений не зависят от того, каковы значения фактора A и, следовательно, фактор A практически не влияет на выходную величину y .

Применение однофакторной классификации при исследовании степени влияния факторов на формирование пассажиропотоков. Методом однофакторной классификации установлена степень влияния объясняющих признаков на пассажиропотоки железнодорожного и воздушного транспорта. На основе анализа произведенных расчетов и их объединения получены результирующие дисперсионные таблицы по видам транспорта.

Таблица 3 – Дисперсионная таблица по железнодорожному транспорту

Факторы	SG = 410388	SA/SG	F-отношение	Степени свободы
Дальность	SA = 365754.667	0.891241	19.667	5
				12
Год	SA = 35803	0.087242	0.71685	2
				15

Сравнивая полученные значения F-отношения с критическими значениями таблицы Фишера, несложно установить, что фактор года не значимо влияет на величину пассажиропотока по железнодорожному транспорту, в то время как фактор дальности поездки весьма значим.

Были составлены также аналогичные дисперсионные таблицы для пассажиропотока по воздушному транспорту, а также по суммарному пассажиропотоку по двум видам транспорта. Составленные таблицы позволяют судить о степени значимости влияния соответствующих факторов и их взаимодействий на изменение пассажиропотока. Для установления этого факта достаточно найти соответствующие рассчитанным по дисперсионным таблицам степеням свободы критические значения F-распределения и сравнить их с полученными расчетными F-отношениями.

Расчёты значимости влияния факторов показали, что по воздушному транспорту на пассажиропоток оказывают значимое влияние оба фактора – дальность перелёта и год поездки, а на суммарный пассажиропоток значимо влияют все три фактора – дальность поездки, год поездки и вид транспорта.

Применение методов регрессионного анализа при исследовании транспортных пассажиропотоков. Были построены регрессионные модели [1], [2], [4], которые могут быть применены при прогнозировании пассажиропотоков (переменная y) в зависимости от вышеперечисленных факторов:

x_1 – «кода» зоны дальности поездки;

x_2 – «кода» вида транспорта (железнодорожный или воздушный);

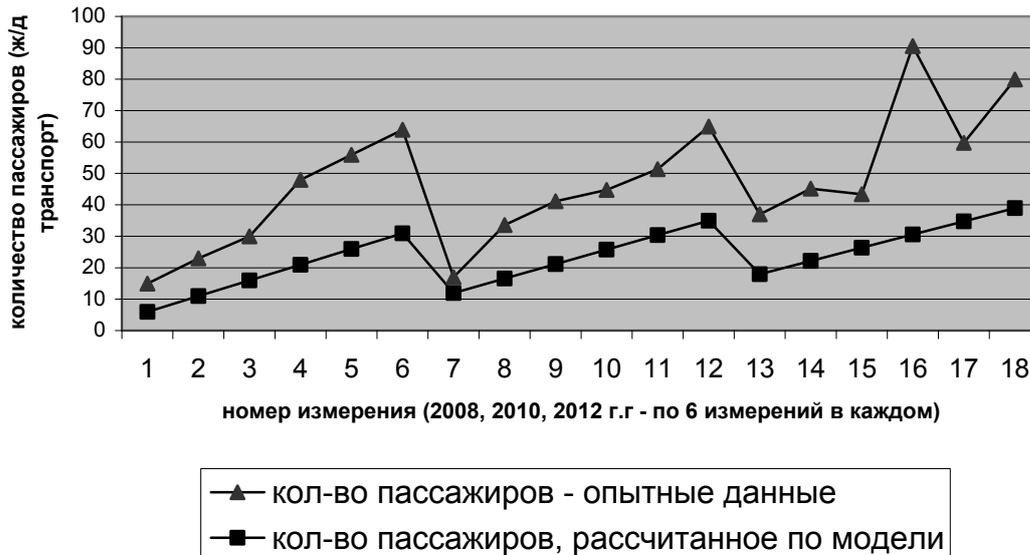
x_3 – «кода» года совершения поездки.

Регрессионная модель по воздушным пассажиропотокам:

$$y = -5,422 + 5,39x_1 + 6,4x_3 - 0,4x_1x_3, \quad (8)$$

R-Sq (ADJ.) = 0,7849 – степень объяснения поведения фактора y посредством регрессионной модели (8) составляет 78,49 %.

Эмпирические и рассчитанные по регрессионной модели (8) пассажиропотоки (воздушный транспорт)

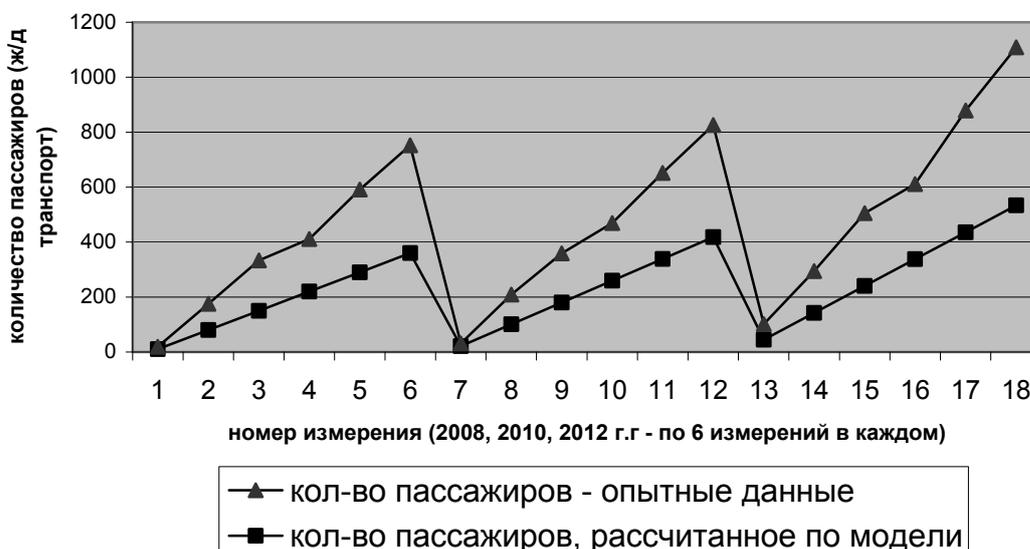


Регрессионная модель по железнодорожным пассажиропотокам:

$$y = -61,933 + 60,671x_1 + 2,143x_3 + 9,296x_1x_3, \quad (9)$$

R-Sq (ADJ.) = 0,8695 – степень объяснения поведения фактора y посредством регрессионной модели (9) составляет 86,95 %.

Эмпирические и рассчитанные по регрессионной модели (9) пассажиропотоки (ж/д транспорт)



Общая регрессионная модель по воздушному и железнодорожному пассажиропотокам:

$$y = -14,283 + 29,414x_1 + 79,85x_2 - 0,798x_3 - 40,457x_1x_2 + 4,969x_1x_3 - 18,063x_2x_3 \quad (10)$$

R-Sq (ADJ.) = 0,6834 – степень объяснения поведения фактора y посредством общей регрессионной модели (10) составляет 68,34 %.

Заключение. Построенные регрессионные зависимости могут быть эффективными при принятии стратегических решений по модернизации транспортных маршрутов, целесообразности введения в эксплуатацию на исследуемых направлениях скоростных железнодорожных магистралей.

Литература

1. Правдин, Н.В., Дыканюк, М.Л., Негрей, В.Я. Прогнозирование грузовых потоков / Н.В. Правдин, М.Л. Дыканюк, В.Я. Негрей. – М. : Транспорт, 1987. – 247 с.
2. Жогаль, С.П., Жогаль, С.И., Максимей, И.В. Основы регрессионного анализа и планирования эксперимента : Учебное пособие / С.П. Жогаль, С.И. Жогаль, И.В. Максимей. – Гомель, 1997. – 92 с.
3. Невзорова, А.Б., Жогаль, С.И., Скойбеда, А.Т. Исследование статистическими методами влияния влажности древесины на её прочностные свойства / А.Б. Невзорова, С.И. Жогаль, А.Т. Скойбеда // Вести Национальной Академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2002. – № 1. – С. 89–92.
4. Тюрин, Ю.Н., Макаров, А.А. Анализ данных на компьютере / Ю.Н. Тюрин, А.А. Макаров. – М. : ИНФРА-М, 2003. – 544 с.

¹Белорусский государственный университет транспорта

²Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины

Поступила в редакцию 15.09.2015

On GNA -subgroups in locally finite groups

A.A. PYPKA, N.A. TURBAY

A new generalization of pronormal subgroups, namely GNA -subgroups is introduced. It is proved that if G is a locally finite group with all subgroups GNA -subgroups then G is a \bar{T} -group.

Keywords: abnormal subgroup, pronormal subgroup, GNA -subgroup, locally finite group, \bar{T} -group.

Вводится новое обобщение пронормальных подгрупп, а именно GNA -подгрупп. Также было доказано, что если в локально конечной группе G все подгруппы являются GNA -подгруппами, то G является \bar{T} -группой.

Ключевые слова: абнормальная подгруппа, пронормальная подгруппа, GNA -подгруппа, локально конечная группа, \bar{T} -группа.

1. Introduction. The investigation of influence of some important systems of subgroups on the structure of the whole group is one of the classical questions in Group Theory. Normal subgroups and their generalizations (subnormal subgroups, ascendant subgroups, almost normal subgroups, nearly normal subgroups and others) have a strong influence on the group structure, a question studied by many past and recent researchers (S.N. Chernikov, R. Baer, P. Hall, L.A. Kurdachenko, B.H. Neumann, S.E. Stonehewer, J. Wiegold, D.J.S. Robinson, D.I. Zaitsev, M.R. Dixon, H. Smith, C. Casolo, I.Ya. Subbotin, N.F. Kuzennyi, N.N. Semko, F.N. Liman and many others). Another important subgroups that have a significant effect on the group structure are antipodes of normal and generalized normal subgroups. Some of the most common types of such subgroups are abnormal, self-normalizing, contranormal subgroups and their generalizations. Recall that a subgroup H of a group G is called *abnormal* in G if $g \in \langle H, H^g \rangle$ for each element $g \in G$. Note also that a subgroup H of a group G is both normal and abnormal in G if $H = G$. A very important generalization of normal and abnormal subgroups is pronormal subgroups. A subgroup H of a group G is called *pronormal* in G if for each element $g \in G$ the subgroups H and H^g are conjugate in $\langle H, H^g \rangle$, i. e. $H^g = H^u$ for some element $u \in \langle H, H^g \rangle$. The investigation of pronormal subgroups was initiated by P. Hall more than 75 years ago. The first non-trivial results about pronormal subgroups in finite groups were obtained by T.A. Peng [1], [2], J.S. Rose [3], A. Mann [4] and G.J. Wood [5]. With [6] M.S. Ba and Z.I. Borevich began the study of pronormal subgroups in infinite groups.

It was natural to consider the groups with all subgroups pronormal. In [1] T.A. Peng investigated some finite groups of such type. In particular, he proved that if G is a finite group whose subgroups of prime power order are all pronormal in G then G is a soluble T -group. Recall that a group G is called a T -group if every subnormal subgroup of G is normal. A group G is called a \bar{T} -group if every subgroup of G is a T -group. Note that W. Gaschütz [7] proved that every finite soluble T -group is a \bar{T} -group. In [8] N.F. Kuzennyi and I.Ya. Subbotin studied infinite groups with all subgroups pronormal. In particular, they described locally soluble non-periodic and locally graded periodic groups with all subgroups pronormal. A special case of the above situation is the investigation of groups' structure whose all subgroups are normal. R. Dedekind in [9] obtained a description of the finite groups with all normal subgroups. Later, R. Baer in [10] obtained a description of all infinite groups of such type. Note that a group (not necessarily finite) with all subgroups normal is called a *Dedekind group*.

On the other hand, as we noted above, every normal subgroup and abnormal subgroup is pronormal. It is interesting to consider the situation when a group has only subgroups with certain property and the antipode of this property. Many articles are devoted to the discussion of this problem with one of the first ones written by A. Fattahi [11]. A. Fattahi obtained the description of finite groups with all subgroups normal and abnormal. For infinite groups this situation was studied by I.Ya. Subbotin in [12] and L.A. Kurdachenko and I.Ya. Subbotin in [13].

In this paper we consider the «local version» of pronormality. It is well-known that a normalizer of pronormal subgroup is abnormal. Also note that every abnormal subgroup is self-normalizing (i. e. coin-

cides with its normalizer). Let H be a pronormal subgroup of a group G . If $x \in N_G(H)$ then, obviously, $H^x = H$. On the other hand $N_G(H)$ is abnormal in G , and then it is self-normalizing in G . Therefore, $N_G(N_G(H)) = N_G(H)$. Thus, we naturally obtain the following generalization of pronormal subgroups.

Definition. Let G be a group and H be a subgroup of G . A subgroup H of a group G is called *GNA-subgroup* (generalized normal and abnormal) of G if for every element $x \in G$ either $H^x = H$ or $N_K(N_K(H)) = N_K(H)$, where $K = \langle H, x \rangle$, $x \in G$.

As we see from the definition, every pronormal subgroup is a *GNA-subgroup*, but the converse is not true in general. The following example shows this.

Example. Let G be a symmetric group of degree 6. Suppose that H is a subgroup of G , which is generated by the elements (4, 5, 6) and (2, 3). A subgroup H is a *GNA-subgroup* of G , but it is not pronormal in G . Note also, that H has order 6, and H is nilpotent.

Thus, *GNA-subgroups* are a non-trivial generalization of pronormal subgroups. It is natural to consider the groups with all subgroups *GNA-subgroups*. In this paper we investigate locally finite groups of such type. The following theorem is the main result of this paper.

Theorem. *Let G be a locally finite group such that every subgroup of G is *GNA-subgroup*. Then G is a \bar{T} -group.*

2. Preliminaries and lemmas.

Lemma 2.1. *Let G be a group such that every subgroup of G is *GNA-subgroup*.*

1) *If H is a subgroup of G , then every subgroup of H is *GNA-subgroup*.*

2) *If H is a normal subgroup of G , then every subgroup of the factor-group G/H is *GNA-subgroup*.*

Proof. The assertion follows from the definition.

Lemma 2.2. *Let G be a group such that every subgroup of G is *GNA-subgroup*. If H is a nilpotent subgroup of G then H is a Dedekind group.*

Proof. Let H be a nilpotent subgroup of G and $x, y \in H$. Put $K = \langle x, y \rangle$. Since K is nilpotent, K has no proper self-normalizing subgroups, therefore, $N_K(N_K(\langle x \rangle)) \neq N_K(\langle x \rangle)$. Thus, $\langle x \rangle^y = \langle x \rangle$, which means that every cyclic subgroup of H is normal in H . Therefore every subgroup of H is normal in H . Thus H is a Dedekind group.

Corollary 2.3. *Let G be a group such that every subgroup of G is *GNA-subgroup*. If H is a locally nilpotent subgroup of G then H is a Dedekind group.*

Proof. Let H be a locally nilpotent subgroup of G and $x, y \in H$. Put $K = \langle x, y \rangle$. Since H is a locally nilpotent subgroup, K is nilpotent. By Lemma 2.2 $\langle x \rangle^y = \langle x \rangle$. It follows that H is a Dedekind group.

Lemma 2.4. *Let G be a group such that every subgroup of G is *GNA-subgroup*. Suppose that H be a subgroup of G and A be a normal abelian subgroup of H . Then every subgroup of A is G -invariant.*

Proof. Let $a \in A$. If $A = \langle a \rangle$ then the proof is obvious. Let $\langle a \rangle$ be a proper subgroup of A (i.e. $\langle a \rangle \ll A$). Put $K = \langle A, y \rangle$, where $y \in H \setminus A$. Obviously, in this case $A \leq N_K(\langle a \rangle)$ and the factor-group K/A is abelian. This means that $N_K(\langle a \rangle)$ is normal subgroup of K . Thus $N_K(\langle a \rangle) = K$, since every subgroup of G is *GNA-subgroup*. Therefore every proper cyclic subgroup $\langle a \rangle$ is H -invariant and then G -invariant, since H is an arbitrary subgroup of G . Hence every subgroup of A is G -invariant.

Corollary 2.5. *Let G be a group such that every subgroup of G is *GNA-subgroup*. Suppose that H be a nilpotent subgroup of G and A be an abelian minimal H -invariant subgroup of H . Then A is a cyclic subgroup of prime order.*

Let G be a group, H, K be normal subgroups of G such that $H \leq K$. The factor K/H is called *central* (respectively, *eccentric*), if $C_G(K/H) = G$ (respectively, $C_G(K/H) \neq G$).

Lemma 2.6. *Let G be a finite group such that every subgroup of G is *GNA-subgroup*. Then G is supersoluble.*

Proof. Let S_p be a Sylow p -subgroup of G , where p is the smallest prime dividing the order of G . Put $L = N_G(S_p)$. By Corollary 2.5 S_p has a chief series with cyclic factors of prime order. Denote by A/B an arbitrary chief factor of S_p . The order of the factor-group $L/C_L(A/B)$ divides $p-1$. But p is the smallest prime number, which implies $C_L(A/B) = N_G(S_p) = L$. Thus the chief

factor A/B is central. Hence $N_G(S_p) = S_p \times S_{p'}$. If $p > 2$ then S_p is abelian and $S_p \leq \zeta(N_G(S_p))$. Then by Burnside's Theorem S_p has a normal complement in G . If $p = 2$ then by Lemma 2.2 S_2 is Dedekind and by Theorem 1 from [14] S_2 also has a normal complement in G . Thus in both cases there is a normal subgroup H such that $G = H \rtimes S_p$. Using the similar arguments we choose a Sylow q -subgroup S_q in H , where q is the smallest prime dividing the order of H . Thus we obtain that S_q has a normal complement K in H , i. e. $H = K \rtimes S_q$. After a finite number of steps we obtain a Sylow series with cyclic factors of prime order. It follows that G is supersoluble.

Corollary 2.7. *Let G be a locally finite group such that every subgroup of G is GNA-subgroup. Then G is locally supersoluble.*

Proof. Let H be a finitely generated subgroup of G . Since G is locally finite, H is finite. Note that by Lemma 2.1 every subgroup of H is GNA-subgroup. By Lemma 2.6 a subgroup H is supersoluble. Thus every finitely generated subgroup of G is supersoluble. Therefore G is locally supersoluble.

Further we need the following result due to R. Baer.

Theorem 2.8 [15]. *Let G be a finite group and A be an abelian normal subgroup of G . If the factor-group $G/C_G(A)$ is nilpotent then*

$$A = Z \times E,$$

where all chief factors of Z are central and all chief factors of E are eccentric.

In this case we will say that a subgroup A has a Z -decomposition in G .

Let G be a group. Recall that the locally nilpotent residual L of G is the intersection of all normal subgroups H of G such that G/H is locally nilpotent.

Lemma 2.9. *Let G be a locally finite group such that every subgroup of G is GNA-subgroup. Then all G -chief factors of locally nilpotent residual L are eccentric.*

Proof. Suppose that the locally nilpotent residual L of G has central factors. Let A be an abelian normal subgroup of L . Denote by \mathfrak{S} the set of all finite subgroups of G . Let $H \in \mathfrak{S}$ and denote by \mathfrak{H} the set of all finite H -invariant subgroups of A . Let $B \in \mathfrak{H}$. By Theorem 2.8 a subgroup B has a Z -decomposition $B = Z_B \times E_B$, where all chief factors of Z_B are central and all chief factors of E_B are eccentric. Note that if $B \leq C$ for some finite subgroup $C \in \mathfrak{S}$ then $Z_B \geq Z_C$, $E_B \leq E_C$. Put $E = \bigcup_{H \in \mathfrak{S}} E_H$.

Note that E is a normal subgroup of G . All chief factors of E are eccentric and all chief factors of the factor-group A/E are central. Thus $A/E \leq \zeta_\infty(G/E)$. The factor-group G/A is locally nilpotent, then G/E is also locally nilpotent. A subgroup E is a proper subgroup of A , i.e. $A \neq E$. On the other hand G/E is nilpotent and then $A \leq E$. And we obtain a contradiction. Thus L doesn't has central factors.

3. Proof of the main result. Since G is a locally finite group such that every subgroup of G is GNA-subgroup, by Corollary 2.7 G is locally supersoluble. This means that G has a descending Sylow series (not necessarily finite)

$$G = G_0 \geq G_1 \geq G_2 \geq \dots,$$

where G/G_1 is a Sylow p_1 -subgroup, G_1/G_2 is a Sylow p_2 -subgroup etc., where $p_1 < p_2 < \dots$. In particular, the factor-group G/G_1 can be a 2-group. Let L be a locally nilpotent residual of G . Since G/G_1 is a locally nilpotent 2-group, $G_1 \geq L$, and then $2 \notin \Pi(L)$. Thus Sylow p -subgroups of L are abelian.

Since G is a supersoluble group, the derived subgroup $[G, G]$ is locally nilpotent. This means that L is also locally nilpotent, because $[G, G]$ contains L . Since $2 \notin \Pi(L)$, a locally nilpotent residual L is abelian.

Since the factor-group G/L is locally nilpotent, then by Corollary 2.3 it is Dedekind. A subgroup L is abelian and normal in G , then by Lemma 2.4 every subgroup of L is G -invariant.

Finally, we need to show that $\Pi(L) \cap \Pi(G/L) = \emptyset$. Suppose that it is not true. Then there is a prime number p such that $p \in \Pi(L) \cap \Pi(G/L)$. Note that from $p \in \Pi(L)$ and $2 \notin \Pi(L)$ implies that $p \neq 2$. Since L is abelian, $L = S_p \times S_{p'}$. Put $H = G/S_{p'}$ and $K = L/H$. Then K is a p -subgroup and H/K is nilpotent. Choose in H/K a Sylow p -subgroup P (i. e. $P \in \text{Syl}_p(H/K)$). Note that P contains K . Since H/K is nilpotent, $\zeta(P/K) \neq \langle 1 \rangle$. By Lemma 2.9 all G -chief factors of L are eccen-

tric. Put $Z = \langle zK \rangle \leq \zeta(P/K)$. Since the factor P/K is central, $[H, Z] \leq K$. By Theorem 2.8 and last inclusion we have $Z = C \times K$ for some subgroup C . On the other hand by Lemma 2.4 every subgroup of Z is G -invariant. Pick an element $x \in \Omega_1(K) = \{x \in K \mid x^p = 1\}$. Then there is an integer k such that $(k, p) = 1$ and $x^g = x^k$, $g \in G$. If $c \in C$ then $c^g = c$. Thus we have $(xc)^g = x^g c^g = x^k c \neq (xc)^g$ for some s . Therefore Z has an element which is not G -invariant. And we obtain a contradiction. Applying the results of the paper [16] we obtain that G is a \bar{T} -group.

Note that the last Theorem can't be generalized to the case of arbitrary periodic groups. The following example illustrates this.

Example. Let G be a Tarski monster group, i. e. G is an infinite group such that every proper non-identity subgroup is cyclic of prime order p . Note that A.Yu. Ol'shanskii proved the existence of such groups for any prime number $p > 10^{75}$ [17, § 28]. Every element of G generates cyclic subgroup of prime order p and every two non-commuting elements generate the whole group G . If $y \in \langle x \rangle$ then $\langle x \rangle^y = \langle x \rangle$. If $y \notin \langle x \rangle$ then $\langle x, y \rangle = G$ and $\langle x \rangle = N_G(\langle x \rangle)$. Thus $N_G(\langle x \rangle) = N_G(N_G(\langle x \rangle))$. Therefore G is a periodic group such that every subgroup of G is GNA -subgroup, but G is not a \bar{T} -group.

References

1. Peng, T.A. Finite groups with pronormal subgroups / T.A. Peng // Proc. Amer. Math. Soc. – 1969. – Vol. 20. – P. 232–234.
2. Peng, T.A. Pronormality in finite groups / T.A. Peng // J. London Math. Soc. – 1971. – Vol. 3. – P. 301–306.
3. Rose, J.S. Finite soluble groups with pronormal system normalizers / J.S. Rose // Proc. London Math. Soc. – 1969. – Vol. 17. – P. 447–469.
4. Mann, A. A criterion for pronormality / A. Mann // Proc. London Math. Soc. – 1969. – Vol. 44. – P. 175–176.
5. Wood, G.J. On pronormal subgroups of finite soluble groups / G.J. Wood // Arch. Math. – 1974. – Vol. 25. – P. 578–585.
6. Ba, M.S. On arrangement of intermediate subgroups / M.S. Ba, Z.I. Borevich // Rings and Linear Groups, Kubanskij Univ., Krasnodar. – 1988. – P. 14–41.
7. Gaschütz, W. Gruppen, in denen das Normalteilersein transitiv ist / W. Gaschütz // J. Reine Angew. Math. – 1957. – Vol. 198. – P. 87–92.
8. Kuzennyi, N.F. Groups in which all subgroups are pronormal / N.F. Kuzennyi, I.Ya. Subbotin // Ukrainian Math. J. – 1987. – Vol. 39. – P. 325–329.
9. Dedekind, R. Ueber Gruppen, deren sämtliche Theiler Normalteiler sind / R. Dedekind // Math. Ann. – 1897. – Vol. 48. – P. 548–561.
10. Baer, R. Situation der Untergruppen und Struktur der Gruppe / R. Baer // Sitz.-Ber. Heidelberg Akad. Wiss. – 1933. – Vol. 2. – P. 12–17.
11. Fattahi, A. Groups with only normal and abnormal subgroups / A. Fattahi // J. Algebra. – 1974. – Vol. 28. – P. 15–19.
12. Subbotin, I.Ya. Groups with alternatively normal subgroups / I.Ya. Subbotin // Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Mat. – 1992. – Vol. 3. – P. 86–88.
13. Kurdachenko, L.A. On U-normal subgroups / L.A. Kurdachenko, I.Ya. Subbotin // Southeast Asian Bull. Math. – 2002. – Vol. 26. – P. 789–801.
14. Ballester-Boliches, A. Sylow permutable subnormal subgroups of finite groups / A. Ballester-Boliches, R. Esteban-Romero // J. Algebra. – 2002. – Vol. 251. – P. 727–738.
15. Baer, R. Durch Formationen bestimmte Zerlegungen von Normalteilern endlicher Gruppen / R. Baer // J. Algebra. – 1972. – Vol. 20. – P. 38–56.
16. Robinson, D.J.S. Groups in which normality is a transitive relation / D.J.S. Robinson // Math. Proc. Cambridge Philos. Soc. – 1964. – Vol. 60. – P. 21–38.
17. Ol'shanskii, A.Yu. Geometry of defining relations in groups / A.Yu. Ol'shanskii. – Kluwer Acad. Publishers, 1991. – 505 p.

Об \mathfrak{F} -цоколе в группах с операторами

М.В. СЕЛЬКИН, Р.В. БОРОДИЧ, С.Н. БЫКОВ

Устанавливаются свойства \mathfrak{F} -цокола в конечной группе с заданной на ней группой операторов.

Ключевые слова: локальная формация, \mathfrak{F} -достижимая подгруппа.

Properties of a \mathfrak{F} -socle in the final group with a given group of operators are determined.

Keywords: local formation, \mathfrak{F} -accessible subgroup.

Все рассматриваемые группы конечны. В работе Г. Фраттини [1] впервые обратил внимание на пересечения максимальных подгрупп. Полученные им результаты в дальнейшем развивались в работах многих авторов (см. монографию [2]). Одно из уже ставших классическим направлений является исследование свойств пересечений некоторых систем максимальных подгрупп и влияние этих свойств на строение группы. Эта задача рассматривалась в работах Л.А. Шеметкова [3], М.В. Селькина [2], А. Баллестера-Болинше [4], Д. Бейдлемана и Ш. Смита [5] и других авторов. В данной работе приводятся некоторые новые свойства \mathfrak{F} -достижимых подгрупп. Так, например, в работе Д. Бейдлемана и Ш. Смита [5] был поставлен следующий вопрос: «Пусть H – субнормальная подгруппа группы G , содержащая подгруппу $\Phi(G)$. Будет ли H сверхразрешимой, если сверхразрешима группа $H / \Phi(G)$?» Нами этот вопрос исследуется в общем виде: вместо формации всех сверхразрешимых групп рассматривается произвольная локальная нормально наследственная формация \mathfrak{F} , а вместо подгруппы Фраттини её операторно-формационное обобщение.

1. Определения и обозначения. Пусть \mathfrak{F} – непустая формация. Тогда подгруппа H конечной группы G называется \mathfrak{F} -достижимой, если имеется такая цепь подгрупп

$$H = H_0 \subseteq H_1 \subseteq \dots \subseteq H_n = G,$$

что для каждого $i = 1, 2, \dots, n$ выполняется одно из условий: 1) подгруппа H_{i-1} нормальна в H_i ; 2) \mathfrak{F} -корадикал подгруппы H_i содержится в H_{i-1} . Если выполняется только условие 2), то такую подгруппу называют \mathfrak{F} -субнормальной.

Через M_G обозначают ядро подгруппы M в группе G (то есть пересечение всех подгрупп из G , сопряженных с подгруппой M).

Пусть даны группа G , множество A и отображение $f: A \rightarrow \text{End}(G)$, где $\text{End}(G)$ – гомоморфное отображение группы G в себя или эндоморфизм группы G . Подгруппа M называется A -допустимой, если M выдерживает действие всех операторов из A , то есть $M^\alpha \subseteq M$ для любого оператора $\alpha \in A$.

Несложно заметить, что так как операторы действуют как соответствующие им эндоморфизмы, то каждая характеристическая подгруппа является A -допустимой для произвольной группы операторов.

Обозначим через $\Phi(G, A)$ пересечение ядер всех максимальных A -допустимых подгрупп.

Пусть \mathfrak{F} – формация. Через $D^{\mathfrak{F}}(G, A)$ обозначим подгруппу, равную пересечению ядер всех максимальных A -допустимых подгрупп группы G , не содержащих \mathfrak{F} -корадикал группы G .

Через $D_\pi^{\mathfrak{F}}(G, A)$ обозначим подгруппу, равную пересечению ядер всех максимальных A -допустимых подгрупп группы G с индексами, делящимися на числа из π .

В случае, когда группа операторов A единична, то подгруппы $\Phi(G, A)$, $D^{\mathfrak{S}}(G, A)$ и $D_{\pi}^{\mathfrak{S}}(G, A)$ совпадают соответственно с $\Phi(G)$ (подгруппа Фраттини), $\Delta^{\mathfrak{S}}(G)$ и $D_{\pi}^{\mathfrak{S}}(G)$. Свойства подгрупп $\Delta^F(G)$ и $D_{\pi}^{\mathfrak{S}}(G)$, а также их влияние на строение группы для различных классов групп \mathfrak{S} достаточно хорошо изучены (см. монографии [2], [3]).

В случае отсутствия в группе G указанных подгрупп будем полагать, что соответствующие пересечения совпадают с самой группой G .

Необходимо отметить, что не каждая максимальная подгруппа будет являться максимальной A -допустимой относительно некоторой группы операторов A , а также не всякая максимальная A -допустимая подгруппа группы является максимальной подгруппой в этой же группе (см. работу [6]).

Напомним, что если \mathfrak{S} – непустая формация, то произведение всех минимальных нормальных \mathfrak{S} -подгрупп группы G называют \mathfrak{S} -цоколем группы G . В дальнейшем \mathfrak{S} -цоколь группы G будем обозначать через $\text{Soc}_{\mathfrak{S}}(G)$.

Пусть A – группа операторов группы G и $\Phi(G, A) \neq G$. Определим подгруппу $\tilde{F}(G, A, \mathfrak{S})$ группы G , обладающую следующими условиями:

- 1) $\tilde{F}(G, A, \mathfrak{S}) \supseteq \Phi(G, A)$;
- 2) $\tilde{F}(G, A, \mathfrak{S}) / \Phi(G, A) = \text{Soc}_{\mathfrak{S}}(G / \Phi(G, A))$.

Если группа операторов A тривиальна, то подгруппа $\tilde{F}(G, A, \mathfrak{S})$ совпадает с подгруппой $\tilde{F}(G, \mathfrak{S})$, свойства которой изучались в работе [2].

2. Вспомогательные результаты. Теорема 2.1. [7, с. 65] Пусть \mathfrak{S} – локальная формация и группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$. Если N – нормальная A -допустимая подгруппа группы G и $N / N \cap \Phi(G, A) \in \mathfrak{S}$. Тогда N представима в виде прямого произведения $N = N_1 \times N_2$, множители которого удовлетворяют следующим условиям:

- 1) $N_1 \in \mathfrak{S}$;
- 2) $\pi(N_2) \cap \pi(\mathfrak{S}) = \emptyset$;
- 3) $N_2 \subseteq \Phi(G, A)$.

Лемма 2.2. [8, с. 57] Пусть группа G имеет группу операторов A , \mathfrak{S} – ступенчатая формация, K – некоторая нормальная подгруппа группы G . Пусть каждая максимальная A -допустимая подгруппа группы G , не содержащая K , содержит $G^{\mathfrak{S}}$. Тогда справедливы следующие утверждения:

- 1) $K \cap G^{\mathfrak{S}} \subseteq \Phi(G, A)$;
- 2) $K / K \cap \Phi(G, A) \subseteq Z_{\infty}^{\mathfrak{S}}(G / \Phi(G, A))$.

Лемма 2.3. [2, с. 90]. Пусть \mathfrak{S} – непустая наследственная формация, H , K и N – подгруппы группы G , причем подгруппа N нормальна в G . Тогда справедливы следующие утверждения:

- 1) если H – \mathfrak{S} -достижимая подгруппа группы G , то $H \cap K$ – \mathfrak{S} -достижимая подгруппа группы K , а HN / N – F -достижимая подгруппа группы G / N ;
- 2) если $H \supseteq N$, то подгруппа H \mathfrak{S} -достижима в G тогда и только тогда, когда подгруппа H / N \mathfrak{S} -достижима в G / N ;
- 3) если H – \mathfrak{S} -достижимая подгруппа группы G , то H^F – субнормальная подгруппа группы G .

Теорема 2.4. [6, с. 36]. Пусть \mathfrak{S} – наследственная локальная формация и группа G имеет группу операторов A , такую, что $(|G|, |A|) = 1$. Если H – \mathfrak{S} -достижимая подгруппа группы G и $H / H \cap \Phi(G, A) \in \mathfrak{S}$, то H представима в виде прямого произведения $H = H_1 \times H_2$, множители которого удовлетворяют следующим условиям:

- 1) $H_1 \in \mathfrak{S}$;
- 2) $\pi(H_2) \cap \pi(\mathfrak{S}) = \emptyset$;
- 3) $H_2 \subseteq \Phi(G, A)$.

3. Основной результат. Теорема 3.1. Пусть \mathfrak{S} – нормально наследственная локальная формация и группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$. Если H – нормальная A -допустимая π -подгруппа группы G и $H/H \cap D_\pi^{\mathfrak{S}}(G, A) \in \mathfrak{S}$, то $H = H_1 \times H_2$, где $H_1 \in \mathfrak{S}$, $\pi(H_2) \cap \pi(\mathfrak{S}) = \emptyset$, $H_2 \subseteq \Phi(G, A)$.

Доказательство.

Пусть G – контрпример минимального порядка, для которого теорема не выполняется.

Если $H \cap D_\pi^{\mathfrak{S}}(G, A) = 1$, то теорема верна. Пусть K – минимальная нормальная в G подгруппа, отличная от 1, содержащаяся в $H \cap D_\pi^{\mathfrak{S}}(G, A)$. Так как

$$\begin{aligned} H/K / H/K \cap D_\pi^{\mathfrak{S}}(G/K, A) &= H/K / H/K \cap D_\pi^{\mathfrak{S}}(G, A) / K = \\ &= H/K / H \cap D_\pi^{\mathfrak{S}}(G, A) / \cong H/H \cap D_\pi^{\mathfrak{S}}(G, A) \in \mathfrak{S}, \end{aligned}$$

то для фактор-группы G/K теорема справедлива, т. е. $H/K \in \mathfrak{S}$. Если $K \subseteq \Phi(G, A)$, то по лемме 2.1 подгруппа H принадлежит \mathfrak{S} , что противоречит предположению. Значит, K не содержится в $\Phi(G, A)$.

Если предположить, что всякая максимальная A -допустимая подгруппа группы G , не содержащая подгруппу K , является \mathfrak{S} -нормальной, то, используя лемму 2.2, получаем, что $H \in \mathfrak{S}$. Снова получили противоречие. Следовательно, в группе G существует такая максимальная A -допустимая подгруппа M , не содержащая \mathfrak{S} -корадикал, что $G = MK$. Если $M \in \mathfrak{S}$, то $G^{\mathfrak{S}} \subseteq K \subseteq H$, что противоречит предположению. Поэтому подгруппа M не принадлежит формации \mathfrak{S} .

Так как K – π -подгруппа, то M – максимальная A -допустимая подгруппа группы G , не содержащая \mathfrak{S} -корадикал и не принадлежащая формации \mathfrak{S} , индекс которой в G есть π -число, откуда следует, что $K \subseteq H$. Полученное противоречие полностью доказывает теорему.

Следствие 3.1.1. Пусть \mathfrak{S} – нормально наследственная локальная формация и группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$. Если H – нормальная A -допустимая π -подгруппа группы G и $H/H \cap D_\pi^{\mathfrak{S}}(G, A) \in \mathfrak{S}$, то $H \in \mathfrak{S}$.

Если A – единичная группа операторов, то из следствия 3.3.1 следуют соответствующие результаты работ [2], [9], [10].

Если $\pi = P$, то получаем

Следствие 3.1.2. Пусть \mathfrak{S} – нормально наследственная локальная формация и группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$. Если H – нормальная A -допустимая подгруппа группы G и $H/H \cap D^{\mathfrak{S}}(G, A) \in \mathfrak{S}$, то $H = H_1 \times H_2$, где $H_1 \in \mathfrak{S}$, $\pi(H_2) \cap \pi(\mathfrak{S}) = \emptyset$, $H_2 \subseteq \Phi(G, A)$.

Следствие 3.1.3. Пусть \mathfrak{S} – нормально наследственная локальная формация и группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$. Если H – нормальная A -допустимая подгруппа группы G и $H/H \cap D^{\mathfrak{S}}(G, A) \in \mathfrak{S}$, то $H \in \mathfrak{S}$.

Теорема 3.2. Пусть \mathfrak{S} – наследственная локальная формация и группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, H – максимальная \mathfrak{S} -достижимая A -допустимая \mathfrak{S} -подгруппа группы G . Тогда $O_\pi(\tilde{F}(G, A, \mathfrak{S})) \subseteq H$, где $\pi = \pi(\mathfrak{S})$.

Доказательство. Пусть G – группа наименьшего порядка, для которой теорема не верна. Предположим, что $\Phi(G, A) = \Phi \neq 1$. Рассмотрим подгруппу $H\Phi/\Phi$ группы G/Φ .

На основании леммы 2.3 $H\Phi/\Phi$ – максимальная \mathfrak{S} -достижимая A -допустимая \mathfrak{S} -подгруппа группы G/Φ . Поэтому ввиду выбора группы G имеем, что

$$O_\pi(\widetilde{F}(G/\Phi, A, \mathfrak{F})) \subseteq H\Phi/\Phi.$$

Так как

$$\widetilde{F}(G/\Phi, A, \mathfrak{F}) = \widetilde{F}(G, A, \mathfrak{F})/\Phi,$$

то $\widetilde{F}(G/\Phi, A, \mathfrak{F}) \in \mathfrak{F}$. Значит, $\widetilde{F}(G, A, \mathfrak{F}) \subseteq H\Phi$. Согласно теореме 2.4, подгруппы $\widetilde{F}(G, A, \mathfrak{F})$ и $H\Phi$ представимы в виде

$$\widetilde{F}(G, A, \mathfrak{F}) = F_1 \times F_2, H\Phi = H_1 \times H_2,$$

причем выполняются следующие условия:

- 1) $F_1 \in \mathfrak{F}$, $H_1 \in \mathfrak{F}$;
- 2) $\pi(F_2) \cap \pi(\mathfrak{F}) = \emptyset$, $\pi(H_2) \cap \pi(\mathfrak{F}) = \emptyset$;
- 3) $F_2 \subseteq \Phi(G, A)$, $H_2 \subseteq \Phi(G, A)$.

Отсюда следует, что $F_1 = O_\pi(\widetilde{F}(G, A, \mathfrak{F}))$. Кроме того, так как $H \in \mathfrak{F}$, то $H_1 = H$. Теперь из $\widetilde{F}(G, A, F) \subseteq H\Phi$ следует, что $O_\pi(\widetilde{F}(G, A, \mathfrak{F})) \subseteq H$. Противоречие.

Значит, полагаем далее, что $\Phi(G, A) = 1$. Тогда $\widetilde{F}(G, A, \mathfrak{F}) = \text{Soc}_{\mathfrak{F}}(G)$. Покажем, что любая минимальная нормальная A -допустимая подгруппа группы G , принадлежащая \mathfrak{F} , содержится в H .

Пусть L – минимальная нормальная A -допустимая подгруппа группы G , $L \in \mathfrak{F}$ и L не содержится в H . Рассмотрим подгруппу HL группы G . Так как H \mathfrak{F} -достижима в HL , то существует такая цепь подгрупп

$$H = H_0 \subseteq H_1 \subseteq \dots \subseteq H_t = HL,$$

что для любого $i = 1, 2, \dots, t$ выполняется одно из условий: 1) подгруппа H_{i-1} нормальна в H_i ; 2) \mathfrak{F} -корадикал подгруппы H_i содержится в H_{i-1} .

Ввиду леммы 2.3 подгруппа H_1 \mathfrak{F} -достижима в группе G и ее \mathfrak{F} -корадикал $H_1^{\mathfrak{F}}$ субнормален в G . Из наследственности формации \mathfrak{F} следует, что $H_1^{\mathfrak{F}} \subseteq (HL)^{\mathfrak{F}} \subseteq L$. Так как H – максимальная \mathfrak{F} -достижимая A -допустимая \mathfrak{F} -подгруппа группы G , то $H_1^{\mathfrak{F}} \neq 1$. Поэтому $H_1^{\mathfrak{F}} = L$.

Пусть T – главный фактор подгруппы H_1 , содержащейся в $H_1^{\mathfrak{F}}$. Тогда T – главный фактор группы HL . Предположим, что подгруппа $H_1^{\mathfrak{F}}$ не содержится в H . Тогда H – нормальная подгруппа группы H_1 . Не нарушая общности рассуждений, положим, что H_1/H – простая группа. Отсюда следует, что $HH_1^{\mathfrak{F}} = H_1$. Так как $H_1^{\mathfrak{F}} \subseteq L$, то $H_1^{\mathfrak{F}} \in \mathfrak{F}$. Теперь из $H_1/H \cong H_1^{\mathfrak{F}}/H_1^{\mathfrak{F}} \cap H$ следует, что $H_1/H \in \mathfrak{F}$. Значит, $H_1^{\mathfrak{F}} \subseteq H$. Получили противоречие.

Итак, $H_1^{\mathfrak{F}} \subseteq H$. Пусть f – локальный экран формации \mathfrak{F} . Так как $H \in \mathfrak{F}$, то $H/C_H(T) \in f(p)$ для любого $p \in \pi(T)$. Так как $C_L(T)T = L$, то ввиду тождества Дедекинда имеем

$$\begin{aligned} H_1 &= H_1 \cap HL = H(H_1 \cap L) = H(H_1 \cap C_L(T)T) = \\ &= H(T(H_1 \cap C_L(T))) = H(H_1 \cap C_L(T)) = HC_L(T). \end{aligned}$$

Теперь из

$$H_1/C_{H_1}(T) = HC_{H_1}(T)/C_{H_1}(T) \cong H/C_H(T)$$

следует, что $H_1/C_{H_1}(T) \in f(p)$ для любого $p \in \pi(T)$. Значит, T – \mathfrak{F} -центральный главный фактор группы H_1 . Так как главный фактор T выбран произвольно, то $H_1 \in \mathfrak{F}$. Пришли к противоречию с тем, что H – максимальная \mathfrak{F} -достижимая A -допустимая \mathfrak{F} -подгруппа группы G . Теорема доказана.

Следствие 3.2.1. Пусть \mathfrak{F} – наследственная локальная формация и группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, $\pi = \pi(\mathfrak{F})$. Тогда в группе G каждая макси-

мальная \mathfrak{S} -достижимая A -допустимая подгруппа, принадлежащая формации \mathfrak{S} , содержит подгруппу $O_\pi(\tilde{F}(G, A, \mathfrak{S}))D_\pi^{\mathfrak{S}}(G, A)$.

Литература

1. Frattini, G. Intorno alla generazione dei gruppi di operazioni / G. Frattini // Atti Acad. Dei Lincei. – 1885. – Vol. 1. – P. 281–285.
2. Селькин, М.В. Максимальные подгруппы в теории классов конечных групп / М.В. Селькин. – Мн. : Беларуская навука, 1997. – 144 с.
3. Шеметков, Л.А. Формации конечных групп / Л.А. Шеметков. – М. : Наука, 1978. – 272 с.
4. Ballester-Bolinches, A., Perez-Ramos, M.D. On \mathfrak{S} -subnormal subgroups and Frattini-like subgroups of a finite group / A. Ballester-Bolinches, M.D. Perez-Ramos // Glasgow Math. J. – 1994. – V. 36. – P. 241–247.
5. Beidleman, J.C., Smith, H. On Frattini-like subgroups / J.C. Beidleman, H. Smith // Glasgow Math. J. – 1993. – Vol. 35. – P. 95–98.
6. Бородич, Е.Н., Бородич, Р.В., Селькин, М.В. Об \mathfrak{S} -достижимых подгруппах в группах с операторами / Е.Н. Бородич, Р.В. Бородич, М.В. Селькин // Проблемы физики, математики и техники. – 2015. – № 2 (23). – С. 33–39.
7. Поляков, Л.Я. О конечных группах с заданной группой операторов / Л.Я. Поляков // Вопросы алгебры. – 1987. – Вып. 3. – С. 63–67.
8. Бородич, Р.В., Бородич, Е.Н., Селькин, М.В. О пересечении подгрупп в группах с операторами / Р.В. Бородич, Е.Н. Бородич, М.В. Селькин // Вестник БГУ. Сер. 1. – 2012. – № 1. – С. 54–62.
9. Ведерников, В.А., Дука, Н.Г. Конечные группы с обобщённой подгруппой Фраттини / В.А. Ведерников, Н.Г. Дука // IX Всесоюз. алгебраич. коллоквиум. – Гомель, 1968. – С. 44.
10. Шлык, В.В. О пересечении максимальных подгрупп в конечных группах / В.В. Шлык // Мат. заметки. – 1973. – Т. 14, № 3. – С. 429–439.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступила в редакцию 15.09.2015

УДК 539.12

Дипольные спиновые поляризуемости и гирации нуклона

В.В. АНДРЕЕВ, О.М. ДЕРЮЖКОВА, Н.В. МАКСИМЕНКО

Показано, что в предложенной модели с учетом перекрестной симметрии, калибровочной инвариантности и свойств лагранжиана относительно инверсии пространства спиновые дипольные поляризуемости и гирации вносят вклад в разложение амплитуды комптоновского рассеяния начиная с третьего порядка по энергии фотонов в соответствии с низкоэнергетическими теоремами комптоновского рассеяния на нуклоне.

Ключевые слова: поляризуемость, гирация, лагранжиан, амплитуда комптоновского рассеяния.

It is shown that in the offered model taking into account cross symmetry, gauge-invariant and properties of a Lagrangian to inversion of space spin dipole polarizabilities and a gyration make a contribution to decomposition of amplitude of Compton scattering since the third order on energy of photons according to low-energy theorems of Compton scattering on a nucleon.

Keywords: polarizabilities, gyration, Lagrangian, Compton scattering amplitude.

Введение. Важную роль в понимании взаимодействия электромагнитного поля с адронами играют низкоэнергетические теоремы, поскольку в их основе лежат общие принципы квантовой теории и разложения амплитуд комптоновского рассеяния по энергии фотонов [1]. В настоящее время одним из эффективных методов исследования электродинамических процессов является использование эффективных лагранжианов, полученных в рамках теоретико-полевых подходов и согласующихся с низкоэнергетическими теоремами [2]. С развитием стандартной модели электрослабых взаимодействий в последнее время введены новые электрослабые характеристики адронов, связанные с несохранением четности [3]–[5]. Построение эффективных релятивистски-инвариантных лагранжианов позволяет получить не только физическую интерпретацию электромагнитных и электрослабых характеристик адронов, но и информацию о механизмах фотон-адронных взаимодействий. Решение подобных задач возможно выполнить в рамках релятивистского теоретико-полевого подхода описания взаимодействия электромагнитного поля с адронами с учетом их электромагнитных и электрослабых характеристик [6], [7]. В работе [8] для построения эффективного релятивистски-инвариантного лагранжиана взаимодействия электромагнитного поля с частицами с постоянными электрическими и магнитными дипольными моментами был введен антисимметричный тензор дипольных моментов, который не зависит от тензора электромагнитного поля $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$.

В данной работе получен квантово-полевой релятивистски-инвариантный лагранжиан на основе работ [8], [9], в котором определен тензор наведенных дипольных моментов. Предложен также вариант релятивистски-инвариантного определения спиновых дипольных поляризуемостей нуклона, в основе которого лежит ковариантное построение наведенных дипольных моментов и феноменологические эффективные лагранжианы взаимодействия электромагнитного поля с этими моментами. На основе релятивистских свойств Р-преобразований, а также перекрестной симметрии, установлены ковариантные спиновые структуры амплитуды комптоновского рассеяния, согласующиеся с низкоэнергетическими теоремами. Показано, что в предложенной модели спиновые поляризуемости и характеристики нуклона, связанные с несохранением четности, вносят вклад в разложение амплитуды комптоновского рассеяния, начиная с третьего порядка по энергии фотонов.

Амплитуда рассеяния электромагнитного поля частицей спина $\frac{1}{2}$ в дипольном приближении. Чтобы получить низкоэнергетическую амплитуду рассеяния электромагнитного поля на спиновой частице с учетом поляризуемостей, будем следовать работе [10]. Однако при определении наведенных дипольных электрического \vec{d} и магнитного \vec{m} моментов через векторы электрической \vec{E} и магнитной \vec{H} напряженностей электромагнитного поля используем соотношения [11], [12]

$$\vec{d} = 4\pi \hat{\alpha} \vec{E}, \quad (1)$$

$$\vec{m} = 4\pi \hat{\beta} \vec{H}, \quad (2)$$

где $\hat{\alpha}$ и $\hat{\beta}$ – матрицы, матричные элементы которых являются тензорами электрической и магнитной поляризуемостей. Диагональные элементы этих матриц выражаются через скалярные электрическую и магнитную поляризуемости: $\alpha_{ij} = \alpha_1 \delta_{ij}$, $\beta_{ij} = \beta_1 \delta_{ij}$.

Используя (1) и (2) низкоэнергетическую амплитуду рассеяния электромагнитного поля, можно представить через матрицы $\hat{\alpha}$ и $\hat{\beta}$ следующим образом [13]:

$$\begin{aligned} M\left(\begin{array}{c} \rightarrow \\ n_2 \end{array}\right) = 4\pi\omega^2 \left\{ \left(\begin{array}{c} \rightarrow(\lambda_2)^* \\ e \end{array} \hat{\alpha} \begin{array}{c} \rightarrow(\lambda_1) \\ e \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \rightarrow(\lambda_1) \\ n_2 e \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \rightarrow(\lambda_2)^* \\ n_1 \beta e \end{array} \right) + \right. \\ \left. + \left(\begin{array}{c} \rightarrow(\lambda_2)^* \\ n_1 e \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \rightarrow(\lambda_1) \\ e \beta n_2 \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \rightarrow(\lambda_2)^* \\ e \end{array} \begin{array}{c} \rightarrow(\lambda_1) \\ e \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \rightarrow(\lambda_2)^* \\ n_1 \beta n_2 \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \rightarrow(\lambda_1) \\ n_1 n_2 \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \rightarrow(\lambda_1) \\ e \beta e \end{array} \right) + \right. \\ \left. + \left[\left(\begin{array}{c} \rightarrow \\ n_2 n_1 \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \rightarrow(\lambda_2)^* \\ e \end{array} \begin{array}{c} \rightarrow(\lambda_1) \\ e \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \rightarrow(\lambda_1) \\ n_2 e \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \rightarrow(\lambda_2)^* \\ n_1 e \end{array} \right) \right] Sp\left(\begin{array}{c} \hat{\alpha} \\ \rightarrow(\lambda_1) \\ \rightarrow(\lambda_2) \end{array}\right) \right\}. \quad (3) \end{aligned}$$

В выражении (3) введены следующие обозначения: $e_{\rightarrow(\lambda_1)}$ и $e_{\rightarrow(\lambda_2)}$ – векторы поляризации, n_1 и n_2 – единичные векторы падающего и рассеянного излучения, ω – частота излучения. Из определения \vec{d} и \vec{m} , согласно (1) и (2), следует, что $\hat{\alpha}$ и $\hat{\beta}$ должны удовлетворять условию эрмитовости. В этом случае, как показано в работе [14], тензоры α_{ij} и β_{ij} можно представить следующим образом:

$$\alpha_{ij} = \alpha_1 \delta_{ij} + i\alpha_2 \varepsilon_{ijk} C_k, \quad \beta_{ij} = \beta_1 \delta_{ij} + i\beta_2 \varepsilon_{ijk} C_k,$$

где α_1 , α_2 , β_1 и β_2 – вещественные величины, ε_{ijk} – тензор Леви-Чивита, C_k – компоненты

псевдовектора. В случае спиновой частицы в качестве такого псевдовектора можно выбрать

псевдовектор – оператор спина частицы \hat{S} . Если считать, что матрицы $\hat{\alpha}$ и $\hat{\beta}$ зависят от \hat{S} , то, используя алгебру операторов спина, половина:

$$\left[\hat{S}_i, \hat{S}_j \right] = i\varepsilon_{ijk} \hat{S}_k, \quad \hat{S}_i \hat{S}_j = \frac{1}{4} \delta_{ij} + \frac{i}{2} \varepsilon_{ijk} \hat{S}_k,$$

эти тензоры можно представить следующим образом

$$\alpha_{ij} = \alpha_1 \delta_{ij} + i\alpha_2 \varepsilon_{ijk} \hat{S}_k, \quad (4)$$

$$\beta_{ij} = \beta_1 \delta_{ij} + i\beta_2 \varepsilon_{ijk} \hat{S}_k. \quad (5)$$

Подставляя (4) и (5) в уравнение (3), получим:

$$\begin{aligned} M\left(\begin{array}{c} \rightarrow \\ n_2 \end{array}\right) = 4\pi\omega^2 \chi_f^+ \left\{ \alpha_1 \left(\begin{array}{c} \rightarrow(\lambda_2)^* \\ e \end{array} \begin{array}{c} \rightarrow(\lambda_1) \\ e \end{array} \right) + \beta_1 \left(\left[\begin{array}{c} \rightarrow(\lambda_2)^* \\ e \end{array} \begin{array}{c} \rightarrow \\ n_2 \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{c} \rightarrow(\lambda_1) \\ e \end{array} \begin{array}{c} \rightarrow \\ n_1 \end{array} \right] \right) + \right. \\ \left. + i\alpha_2 \left(\hat{S} \cdot \left[\begin{array}{c} \rightarrow(\lambda_2)^* \\ e \end{array} \begin{array}{c} \rightarrow(\lambda_1) \\ e \end{array} \right] \right) + i\beta_2 \left(\hat{S} \cdot \left[\left[\begin{array}{c} \rightarrow(\lambda_2)^* \\ e \end{array} \begin{array}{c} \rightarrow \\ n_2 \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{c} \rightarrow(\lambda_1) \\ e \end{array} \begin{array}{c} \rightarrow \\ n_1 \end{array} \right] \right] \right) \right\} \chi_i, \quad (6) \end{aligned}$$

где χ_i и χ_f – спиноры начальной и конечной частицы. Если в амплитуде (6) потребовать условие перекрестной симметрии, то в (6) останутся только два первых слагаемых

$$M\left(\begin{array}{c} \rightarrow \\ n_2 \end{array}\right) = 4\pi\omega^2 \left\{ \alpha_1 \left(\begin{array}{c} \rightarrow(\lambda_2)^* \\ e \end{array} \begin{array}{c} \rightarrow(\lambda_1) \\ e \end{array} \right) + \beta_1 \left(\left[\begin{array}{c} \rightarrow(\lambda_2)^* \\ e \end{array} \begin{array}{c} \rightarrow \\ n_2 \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{c} \rightarrow(\lambda_1) \\ e \end{array} \begin{array}{c} \rightarrow \\ n_1 \end{array} \right] \right) \right\}, \quad (7)$$

что согласуется со спиновой структурой низкоэнергетической амплитуды комптоновского рассеяния с учетом электрической и магнитной поляризуемостей [15]. В случае комптоновского рассеяния вперед амплитуда имеет общую спиновую структуру вида [16]:

$$M = g(\omega) \begin{pmatrix} \rightarrow(\lambda_2)^* & \rightarrow(\lambda_1) \\ e & e \end{pmatrix} + ih(\omega) \left(\vec{S} \cdot \begin{bmatrix} \rightarrow(\lambda_2)^* & \rightarrow(\lambda_1) \\ e & e \end{bmatrix} \right) \quad (8)$$

В этом определении амплитуды скалярная функция $g(\omega)$ является четной, а $h(\omega)$ – нечетной относительно перекрестной симметрии. Следовательно, поскольку поляризуемости вносят вклад в амплитуду (8), начиная со второго порядка по ω и выше, то спиновая структура второго слагаемого в (8) определяется вкладами поляризуемостей, начиная с третьего порядка по ω .

Амплитуда низкоэнергетического комптоновского рассеяния в ковариантном дипольном представлении. В работе [8] для построения эффективного релятивистски-инвариантного лагранжиана взаимодействия электромагнитного поля с частицами с постоянными электрическими и магнитными дипольными моментами был введен антисимметричный тензор дипольных моментов, который не зависит от тензора электромагнитного поля $F_{\mu\nu}$:

$$G^{\mu\nu} = (d^\mu u^\nu - u^\mu d^\nu) + \varepsilon^{\mu\nu\rho\sigma} m_\rho u_\sigma, \quad (9)$$

где d^μ и m^μ – компоненты электрического и магнитного моментов, представленные в ковариантной форме; u^μ – компоненты 4-х-скорости частицы, $\varepsilon^{\mu\nu\rho\sigma}$ – 4-х-мерный тензор Леви-Чивита. Эффективный лагранжиан взаимодействия электромагнитного поля с частицами с постоянными дипольными моментами принимает вид:

$$L = -\frac{1}{2} (e_\mu d^\mu + h_\mu m^\mu) = -\frac{1}{2} (D_\mu U^\mu + M_\mu U^\mu), \quad (10)$$

где $e_\mu = F_{\mu\nu} u^\nu$, $h_\mu = \tilde{F}_{\mu\nu} u^\nu$, $\tilde{F}_{\mu\nu} = \frac{1}{2} \varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma} F^{\rho\sigma}$, $D_\mu = d^\nu F_{\nu\mu}$, $M_\mu = m^\nu \tilde{F}_{\nu\mu}$.

Будем считать, что форма тензора (9) справедлива и для наведенных дипольных моментов. Запишем в ковариантной форме с учетом закона сохранения четности и определения вектора Паули-Любанского W^μ компоненты векторов электрического и магнитного моментов

$$d_e^\mu = 4\pi\alpha^{\mu\nu} e_\nu + 4\pi\kappa^{\mu\nu\delta} (\partial_\delta) e_\nu, \quad (11)$$

$$m_h^\mu = 4\pi\beta^{\mu\nu} h_\nu + 4\pi\tilde{\kappa}^{\mu\nu\delta} (\partial_\delta) h_\nu. \quad (12)$$

В представлениях (11) и (12) введены обозначения:

$$\alpha^{\mu\nu} = \alpha_1 g^{\mu\nu}, \quad \kappa^{\mu\nu\delta} = \kappa \varepsilon^{\mu\nu\rho\delta} W_\rho, \quad \beta^{\mu\nu} = \beta_1 g^{\mu\nu}, \quad \tilde{\kappa}^{\mu\nu\delta} = \tilde{\kappa} \varepsilon^{\mu\nu\rho\delta} W_\rho.$$

В случае частицы спина $\frac{1}{2}$ вектор \hat{W}^μ имеет вид:

$$\hat{W}^\mu = \frac{(-1)}{2m} \gamma^5 \left(\gamma^\mu \hat{p} - p^\mu \right),$$

где $\hat{p} = \gamma_\mu p^\mu$, p^μ – 4-х-импульс частицы, γ^μ – матрицы, удовлетворяющие перестановочным соотношениям $\gamma^\mu \gamma^\nu + \gamma^\nu \gamma^\mu = 2g^{\mu\nu}$. Из выражений (11) и (12) следует, что d^μ и m^μ состоят из симметричной и антисимметричной частей относительно перестановки индексов μ и ν . Как будет показано далее, такое представление согласуется с условием перекрестной симметрии амплитуды комптоновского рассеяния.

Лагранжиан (10), с помощью которого можно получить амплитуду комптоновского рассеяния и согласовать ее с низкоэнергетическими теоремами, в рамках теоретико-полевого ковариантного подхода имеет вид [17]:

$$L(x) = \frac{i\pi}{4m} \left[\bar{\Psi} \gamma^\nu \hat{L}_{\nu\sigma} \overset{\leftrightarrow}{\partial}^\sigma \Psi + \bar{\Psi} \hat{L}_{\nu\sigma} \gamma^\nu \overset{\leftrightarrow}{\partial}^\sigma \Psi + \bar{\Psi} \gamma^\sigma \hat{L}_{\nu\sigma} \overset{\leftrightarrow}{\partial}^\nu \Psi + \bar{\Psi} \hat{L}_{\nu\sigma} \gamma^\sigma \overset{\leftrightarrow}{\partial}^\nu \Psi \right], \quad (13)$$

где $\Psi(x)$ – биспиноры поля Дирака, $\overset{\leftrightarrow}{\partial}^{\nu} = \overset{\rightarrow}{\partial}^{\nu} - \overset{\leftarrow}{\partial}^{\nu}$, стрелки указывают направления действия производных. Как было показано в работе [13], тензор $\hat{L}_{\nu\sigma}$ в выражении (13) должен быть представлен определенным образом, чтобы лагранжиан $L(x)$ удовлетворял закону сохранения четности, а спиновые структуры амплитуды комптоновского рассеяния – перекрестной симметрии:

$$\hat{L}_{\nu\sigma} = \hat{L}_{\nu\sigma}^{(\alpha_1)} + \hat{L}_{\nu\sigma}^{(\beta_1)} + \hat{L}_{\nu\sigma}^{(\kappa)} + \hat{L}_{\nu\sigma}^{(\tilde{\kappa})}. \quad (14)$$

В свою очередь тензоры выражения (14) согласуются с определениями (11) и (12) и имеют следующий вид:

$$\hat{L}_{\nu\sigma}^{(\alpha_1)} = F_{\nu\mu} \overset{\wedge}{\alpha}^{\mu\rho} (\alpha_1) F_{\rho\sigma}, \quad (15)$$

$$\hat{L}_{\nu\sigma}^{(\kappa)} = F_{\nu\mu} \overset{\leftrightarrow}{\partial}_{\delta} F_{\rho\sigma} \overset{\wedge}{\kappa}^{\mu\rho\delta} (\kappa), \quad (16)$$

где введены следующие обозначения $\overset{\wedge}{\alpha}^{\mu\nu} = \alpha_1 g^{\mu\nu}$, $\overset{\wedge}{\kappa}^{\mu\nu\delta}(\kappa) = \kappa \varepsilon^{\mu\nu\rho\delta} \hat{W}_{\rho}$. Производная $\overset{\leftrightarrow}{\partial}_{\delta}$ действует только на тензоры электромагнитного поля $F_{\mu\nu}$, а оператор \hat{W}_{ρ} действует на волновые функции Ψ и $\bar{\Psi}$. Если в тензорах (15) и (16) сделать замену $F_{\mu\nu} \rightarrow \tilde{F}_{\mu\nu}$, то получим выражения для $\hat{L}_{\nu\sigma}^{(\beta_1)}$ и $\hat{L}_{\nu\sigma}^{(\tilde{\kappa})}$. Таким образом, эффективный релятивистски-инвариантный лагранжиан, позволяющий учесть скалярные электрические и магнитные дипольные поляризуемости нуклона, можно представить в виде:

$$L^{(\alpha_1)} + L^{(\beta_1)} = \frac{2\pi}{m} \left(\alpha_1 F_{\nu\mu} F_{\sigma}^{\mu} + \beta_1 \tilde{F}_{\nu\mu} \tilde{F}_{\sigma}^{\mu} \right) \theta^{\nu\sigma}, \quad \theta^{\nu\sigma} = \frac{i}{2} \bar{\Psi} \gamma^{\nu} \overset{\leftrightarrow}{\partial}^{\sigma} \Psi. \quad (17)$$

Амплитуда комптоновского рассеяния с учетом лагранжиана (17) имеет вид [18]:

$$M^{(\alpha_1)} + M^{(\beta_1)} = \left(\frac{2\pi}{m} \right) \left[\alpha_1 \left(F_{\nu\mu}^{(2)} F_{\sigma}^{(1)\mu} + F_{\nu\mu}^{(1)} F_{\sigma}^{(2)\mu} \right) + \beta_1 \left(\tilde{F}_{\nu\mu}^{(2)} \tilde{F}_{\sigma}^{(1)\mu} + \tilde{F}_{\nu\mu}^{(1)} \tilde{F}_{\sigma}^{(2)\mu} \right) \right] \bar{U}^{(r_2)} \left(\vec{p}_2 \right) \gamma^{\nu} P^{\sigma} U^{(r_1)} \left(\vec{p}_1 \right). \quad (18)$$

В уравнении (18) введены обозначения $F_{\mu\nu}^{(n)} = \left(k_{(n)\mu} e_{\nu}^{(\lambda_n)} - k_{(n)\nu} e_{\mu}^{(\lambda_n)} \right)$, $\tilde{F}_{\mu\nu}^{(n)} = \frac{1}{2} \varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma} F^{(n)\rho\sigma}$, n принимает значения 1 и 2, а также $e_{\mu}^{(\lambda_1)}$ и $e_{\mu}^{(\lambda_2)*}$ – векторы поляризации начального и конечного фотонов, $P = \frac{1}{2} (p_1 + p_2)$, k_1, p_1 и k_2, p_2 – импульсы начальных и конечных фотонов и нуклонов, $U^{(r_1)} \left(\vec{p}_1 \right)$ и $\bar{U}^{(r_2)} \left(\vec{p}_2 \right)$ – биспиноры начальных и конечных нуклонов. Из соотношения (18) следует, что часть амплитуды комптоновского рассеяния, обусловленная электрической α_1 и магнитной β_1 скалярными поляризуемостями, удовлетворяет условию перекрестной симметрии и вносит вклад, начиная со второго порядка по энергии фотонов. В системе покоя мишени и во втором порядке по энергии фотонов из (18) следует соотношение:

$$M^{(\alpha_1)} + M^{(\beta_1)} = 4\pi\omega_1\omega_2\chi_f^+ \left[\alpha_1 \left(e^{\rightarrow(\lambda_2)*} \rightarrow(\lambda_1) \right) + \beta_1 \left(\left[e^{\rightarrow(\lambda_2)*} \rightarrow \right] \cdot \left[e^{\rightarrow(\lambda_1)} \rightarrow \right] \right) \right] \chi_i,$$

которое согласуется с (7).

Дипольные спиновые поляризуемости и характеристики нуклона, связанные с несохранением четности. Электромагнитные характеристики адронов, связанные с несохранением четности [3], [4], обладают свойствами гирации, используемой в оптике [11]. В данном разделе рассмотрим релятивистски-инвариантные определения дипольной спиновой поляризуемости и гираций нуклона, связанных с несохранением четности, а также обратим внимание на различие их

вкладов в амплитуду комптоновского рассеяния. Из соотношения (14) следует, что эффективный лагранжиан, соответствующий вкладам спиновых дипольных поляризуемостей κ и $\tilde{\kappa}$, имеет вид:

$$L^{(\kappa)} + L^{(\tilde{\kappa})} = \frac{i\pi}{4m} (\varepsilon^{\mu\rho\kappa\delta}) \left[\kappa F_{\nu\mu} \overset{\leftrightarrow}{\partial}_\delta F_{\rho\sigma} + \tilde{\kappa} \tilde{F}_{\nu\mu} \overset{\leftrightarrow}{\partial}_\delta \tilde{F}_{\rho\sigma} \right] \times \\ \times \bar{\Psi} \left[\left(\gamma^\nu \hat{W}_\kappa + \hat{W}_\kappa \gamma^\nu \right) \overset{\leftrightarrow}{\partial}^\sigma + \left(\gamma^\sigma \hat{W}_\kappa + \hat{W}_\kappa \gamma^\sigma \right) \overset{\leftrightarrow}{\partial}^\nu \right] \Psi. \quad (19)$$

Часть амплитуды комптоновского рассеяния, вычисленная на основе этого лагранжиана, определяется следующим образом:

$$M^{(\kappa)} + M^{(\tilde{\kappa})} = \frac{i\pi}{4m^2} (\varepsilon^{\mu\rho\kappa\delta}) (k_1 + k_2)_\delta \left[\kappa (F_{\nu\mu}^{(2)} F_{\rho\sigma}^{(1)} - F_{\sigma\rho}^{(2)} F_{\mu\nu}^{(1)}) + \tilde{\kappa} (\tilde{F}_{\nu\mu}^{(2)} \tilde{F}_{\rho\sigma}^{(1)} - \tilde{F}_{\sigma\rho}^{(2)} \tilde{F}_{\mu\nu}^{(1)}) \right] \times \\ \times \bar{U}^{(\nu_2)} \left(\vec{p}_2 \right) \gamma^5 + \left[(\delta_\tau^\nu \gamma_\kappa - \delta_\kappa^\nu \gamma_\tau) P^\sigma + (\delta_\tau^\sigma \gamma_\kappa - \delta_\kappa^\sigma \gamma_\tau) P^\nu \right] P_\tau U^{(\eta_1)} \left(\vec{p}_1 \right). \quad (20)$$

Выражение (20) свидетельствует о том, что амплитуда $M^{(\kappa)} + M^{(\tilde{\kappa})}$ инвариантна относительно перекрестной симметрии. Вклад спиновых поляризуемостей κ и $\tilde{\kappa}$, начинается с третьего порядка по энергии фотонов. Если в (20) перейти в систему покоя мишени и пренебречь импульсом отдачи нуклона, то получим

$$M^{(\kappa)} + M^{(\tilde{\kappa})} = 4\pi i (\omega_1 + \omega_2) (\omega_1 \omega_2) \left\{ \kappa \left(\vec{S} \left[\vec{e} \vec{e} \overset{(\lambda_2)^*}{\rightarrow} \overset{(\lambda_1)}{\rightarrow} \right] \right) + \tilde{\kappa} \left(\vec{S} \left[\vec{e} \overset{(\lambda_2)^*}{\rightarrow} \vec{n}_2 \right] \cdot \left[\vec{e} \overset{(\lambda_1)}{\rightarrow} \vec{n}_1 \right] \right) \right\}. \quad (21)$$

Как видно из уравнений (19) и (21) лагранжиан, с помощью которого учитывается вклад спиновых дипольных поляризуемостей κ и $\tilde{\kappa}$ в амплитуду комптоновского рассеяния, является четным относительно инверсии пространства

По аналогии с лагранжианом (19) построим новый лагранжиан, с помощью которого будем определять вклады гираций (характеристик, связанных с несохранением четности) в амплитуду комптоновского рассеяния. Для этого достаточно в (19) сделать замену $\hat{W}_\kappa \rightarrow 1/m \overset{\leftrightarrow}{\partial}_\kappa$. В результате получим:

$$L = \frac{i\pi}{2m^2} (\varepsilon^{\mu\rho\kappa\delta}) \left[\delta_E F_{\nu\mu} \overset{\leftrightarrow}{\partial}_\delta F_{\rho\sigma} + \delta_M \tilde{F}_{\nu\mu} \overset{\leftrightarrow}{\partial}_\delta \tilde{F}_{\rho\sigma} \right] \bar{\Psi} \left[\left(\gamma^\nu \overset{\leftrightarrow}{\partial}_\kappa \overset{\leftrightarrow}{\partial}^\sigma + \gamma^\sigma \overset{\leftrightarrow}{\partial}_\kappa \overset{\leftrightarrow}{\partial}^\nu \right) \right] \Psi, \quad (22)$$

где δ_E и δ_M – электрическая и магнитная гирации. Амплитуда комптоновского рассеяния, которая получена на основании лагранжиана (22), в системе покоя мишени и в пренебрежении импульсом отдачи мишени, определяется так

$$M = 4\pi \omega_1 \omega_2 \chi_f^+ \left\{ \delta_E \left(\left(\vec{k}_1 + \vec{k}_2 \right) \cdot \left[\vec{e} \overset{(\lambda_2)^*}{\rightarrow} \overset{(\lambda_1)}{\rightarrow} \right] \right) + \delta_M \left(\left(\vec{k}_1 + \vec{k}_2 \right) \cdot \left[\overset{\rightarrow}{\Sigma}_2 \overset{\rightarrow}{\Sigma}_1 \right] \right) \right\} \chi_i, \quad (23)$$

где $\overset{\rightarrow}{\Sigma}_2 = \left[\vec{e} \overset{(\lambda_2)^*}{\rightarrow} \vec{n}_2 \right]$, $\overset{\rightarrow}{\Sigma}_1 = \left[\vec{e} \overset{(\lambda_1)}{\rightarrow} \vec{n}_1 \right]$. Соотношение (23) согласуется с низкоэнергетическим определением амплитуды (3), если тензоры поляризуемостей представить в виде [11]:

$$\alpha_{ij} = \alpha_1 \delta_{ij} + i \delta_E \varepsilon_{ijk} \partial_k, \quad \beta_{ij} = \beta_1 \delta_{ij} + i \delta_M \varepsilon_{ijk} \partial_k,$$

где производная ∂_κ действует на векторы напряженности электромагнитного поля.

Таким образом, из уравнений (21) и (23) следует: 1. в обеих амплитудах выполняется условие перекрестной симметрии; 2. если в соотношении (21) выполняется условие инвариантности относительно инверсии пространства, то в соотношении (23) это условие нарушается; 3. вклады гирации и спиновых дипольных поляризуемостей в амплитуду комптоновского рассеяния на нуклоне начинаются с третьего порядка по энергии фотонов.

Заключение. В данной работе предложен вариант релятивистски-инвариантного определения спиновых дипольных поляризуемостей и гираций, в основе которого лежит ковари-

антное построение наведенных дипольных моментов и феноменологические эффективные лагранжианы взаимодействия электромагнитного поля с этими моментами структурной частицы спина $\frac{1}{2}$. Показано, что в предложенной модели с учетом перекрестной симметрии, калибровочной инвариантности и свойств лагранжиана относительно инверсии пространства спиновые дипольные поляризуемости и гирации вносят вклад в разложение амплитуды комптоновского рассеяния начиная с третьего порядка по энергии фотонов в соответствии с низкоэнергетическими теоремами комптоновского рассеяния на нуклоне.

Авторы благодарны Белорусскому республиканскому фонду фундаментальных исследований за поддержку.

Литература

1. Максименко, Н.В. Низкоэнергетическое разложение амплитуды комптоновского рассеяния на адроне и одновременные коммутаторы токов / Н.В. Максименко, С.Г. Шульга // *Ядерная физика*. – 1990. – Т. 52, Вып. 2 (8). – С. 524–534.
2. Hill, R.J. The NRQED lagrangian at order $1/M$ / R.J. Hill, G. Lee, G. Paz, M.P. Solon // *Phys. Rev. D*. – 2013. – Vol. 87, № 5. – P. 053017-1-13.
3. Bedaque, P.F. Parity violation in $\gamma \vec{p}$ Compton Scattering / P.F. Bedaque, M.J. Savage // *Phys. Rev. C*. – 2000. – Vol. 62. – P. 018501-1-6.
4. Gorchtein, M. Forward Compton Scattering with weak neutral current: constraints from sum rules [Electronic resource] / M. Gorchtein, X. Zhang. – 2015. – Mode of access : <http://nucl-th/1501.0535>. – Date of access : 22.01.2015.
5. Gorchtein, M. CP-violation in Compton Scattering / M. Gorchtein // *Phys. Rev. C*. – 2008. – Vol. 77. – P. 065501-1-6.
6. Carlson, C.E. Constraining off-shell effects using low-energy Compton scattering [Electronic resource] / C.E. Carlson, M. Vanderhaeghen. – 2011. – Mode of access : <http://physics.atom-ph/1109.3779>. – Date of access : 04.10.2011.
7. Krupina, N. Separation of proton polarizabilities with the beam asymmetry of Compton scattering / N. Krupina, V. Pascalutsa // *Phys. Rev. Lett.* – 2013. – Vol. 110, № 26. – P. 262001-1-4.
8. Anandan, J.S. Classical and quantum interaction of the dipole / J.S. Anandan // *Phys. Rev. Lett.* – 2000. – Vol. 85. – P. 1354–1357.
9. Silenko, A.J. Spin precession of a particle with an electric dipole moment: contributions from classical electrodynamics and from the Thomas effect / A.J. Silenko // *Phys. Scr.* – 2015. – Vol. 90. – P. 065303 (6pp).
10. Ландау, Л.Д. Теория поля / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М. : Наука, 1967. – 460 с.
11. Федоров, Ф.И. Теория гиротропии / Ф.И. Федоров. – Минск : Наука и техника, 1976. – 456 с.
12. Барышевский, В.Г. Ядерная оптика поляризованных сред / В.Г. Барышевский. – Москва : Энергоатомиздат, 1995. – 316 с.
13. Андреев, В.В. Ковариантное представление спиновых поляризуемостей нуклона / В.В. Андреев, О.М. Дерюжкова, Н.В. Максименко // *Проблемы физики, математики и техники*. – 2014. – № 3(20). – С. 7–12.
14. Галынский, М.В. О преобразовании тензора пучка при взаимодействии света со средой / М.В. Галынский, Ф.И. Федоров // *ЖПС*. – 1986. – Т. 44, № 2. – С. 288–292.
15. Петрунькин, В.А. Электрическая и магнитная поляризуемости адронов / В.А. Петрунькин // *ЭЧАЯ*. – 1981. – Т. 12, Вып. 3. – С. 692–753.
16. Damashek, M. Forward Compton scattering / M. Damashek, F.J. Gilman // *Phys. Rev.* – 1970. – Vol. D1, № 6. – P. 1319–1332.
17. Андреев, В.В. Поляризуемость элементарных частиц в теоретико-полевого подходе / В.В. Андреев, Н.В. Максименко // *Проблемы физики, математики и техники*. – 2011. – № 4 (9). – С. 7–11.
18. Andreev, V.V. Covariant equations of motion of a spin $\frac{1}{2}$ particle in an electromagnetic field with allowance for polarizabilities / V.V. Andreev, O.M. Deryuzhkova, N.V. Maksimenko // *Russ. Phys. Journ.* – 2014. – Vol. 56, № 9. – P. 1069–1075.

Децентрированные пучки Куммера-Гаусса

С.С. ГИРГЕЛЬ

Развит формализм для описания параксиальных трехмерных децентрированных 3D световых пучков Куммера-Гаусса. Сформулированы и проанализированы условия физической реализуемости центрированных и нецентрированных пучков Куммера-Гаусса. Показано, что децентрировка приводит к значительному сужению областей квадратичной интегрируемости функций Куммера и тем самым их физической реализуемости.

Ключевые слова: децентрированные пучки, параксиальные пучки, пучки Куммера-Гаусса, пучки Эрмита-Гаусса, квадратичная интегрируемость.

The formalism for the description of the paraxial three-dimensional decentered 3D Kummer-Gauss light beams is developed. Conditions for physical feasibility of the aligned and uncentered Kummer-Gauss beams are formulated and analysed. It is shown that the decentering leads to considerable narrowing of areas of square integrability of functions of Kummer and, thereby, their physical feasibility.

Keywords: decentered beams, paraxial beams, Kummer-Gaussian beams, Hermite-Gaussian beams, square integrability.

Введение. В настоящее время продолжается [1]–[10] поиск все новых и новых решений для оптических полей, которые обладали бы новыми, интересными свойствами. Наибольший интерес представляют узконаправленные (пучковые) решения, реализуемые экспериментально [1]–[2]. Такие пучки часто можно считать параксиальными. К ним относятся гауссовы пучки [1], пучки Эрмита-Гаусса ($H-G$) [1]–[3], Лагерра-Гаусса [1], Бесселя-Гаусса [4] и многие другие [2]–[10]. В наших работах [8]–[10] был предложен формализм для описания центрированных 2D и 3D пучков Куммера-Гаусса ($K-G$). В настоящей работе проанализированы условия физической реализуемости центрированных и нецентрированных 3D пучков $K-G$.

Децентрированные 3D пучки Куммера-Гаусса. Для монохроматических волн вида $f(\mathbf{r}, t) = f \exp(-i\omega t)$ скалярное 3D параболическое уравнение, описывающие амплитуду f параксиальных световых пучков, имеет вид [1]

$$(\partial_{x,x}^2 + \partial_{y,y}^2 + 2ik\partial_z)f = 0. \quad (1)$$

Целесообразно перейти к безразмерным переменным [10]

$$X = x/x_0, \quad Y = y/x_0, \quad Z = z/z_0. \quad (2)$$

Здесь x_0 и $z = kx_0^2/2$ – некоторые характерные вещественные размеры пучка в направлениях, параллельных осям OX и OY соответственно. Теперь параболическое уравнение (1) приобретает простейшую форму

$$(\partial_{X,X}^2 + \partial_{Y,Y}^2 + 4i\partial_Z)f = 0. \quad (3)$$

В работе [10] нами было показано, что решения для 3D световых пучков $K-G$ можно представить, как произведение двух решений, описывающих 2D пучки $K-G$ для плоскостей XOZ и YOZ соответственно. Поэтому общее решение для амплитуды $f(X, Y, Z)$ астигматического 3D скалярного пучка $K-G$ имеет вид [10]

$$f(X, Y, Z) = G(X, Y, Z) \cdot h_1(X_1) \cdot h_2(Y_1) \cdot h_3(Z). \quad (4)$$

Функцию $h_3(Z)$ можно представить в форме:

$$h_3(Z) = \left(\frac{Q_{0X}P_X}{P_{0X}Q_X} \right)^{\frac{v_1}{2}} \cdot \left(\frac{Q_{0Y}P_Y}{P_{0Y}Q_Y} \right)^{\frac{v_2}{2}}, \quad (5)$$

а новые переменные X_1, Y_1 выражаются через X, Y согласно [10], как

$$X_1^2 = i(1/P_{X,Y} - 1/Q_{X,Y})X^2; \quad Y_1^2 = i(1/P_Y - 1/Q_Y)Y^2. \quad (6)$$

Параметры Q_X, Q_Y, P_X, P_Y – введенные [10] безразмерные комплексные параметры пучка:

$$Q_{X,Y} = Z - Q_{0X,0Y}, \quad \text{где } Q_{0X,0Y} = Q_{0X,0Y}' + iQ_{0X,0Y}''; \quad (6)$$

$$P_{X,Y} = Z - P_{0X,0Y}, \quad \text{где } P_{0X,0Y} = P_{0X,0Y}' + iP_{0X,0Y}'' \quad (8)$$

Здесь и далее штрихами помечаем вещественные и мнимые части различных величин. $G(X, Y, Z)$ – астигматический гауссиан [5], [10]

$$G(X, Y, Z) = \sqrt{\frac{Q_{0X}Q_{0Y}}{Q_X Q_Y}} \exp\left(i\left(\frac{X^2}{Q_X} + \frac{Y^2}{Q_Y}\right)\right), \quad (9)$$

который является также фундаментальным решением параболического уравнения (3)

Общие выражения для амплитуд $h_1(X_1)$ и $h_2(Y_1)$ 3D пучка $K-G$ можно выразить через одну конфлюэнтную гипергеометрическую функцию F_1 [11], которая эквивалентна функции Куммера M [11]–[12]:

$$h_1(X_1) = A_1 \cdot X_1 \cdot M\left(\frac{1}{2} - \frac{\nu_1}{2}, \frac{3}{2}, X_1^2\right) + B_1 \cdot M\left(-\frac{\nu_1}{2}, \frac{1}{2}, X_1^2\right) \equiv h_{1o} + h_{1e}; \quad (10)$$

$$h_2(Y_1) = A_2 \cdot Y_1 \cdot M\left(\frac{1}{2} - \frac{\nu_2}{2}, \frac{3}{2}, Y_1^2\right) + B_2 \cdot M\left(-\frac{\nu_2}{2}, \frac{1}{2}, Y_1^2\right) \equiv h_2^o + h_2^e, \quad (11)$$

где A_1, B_1, A_2, B_2 – некоторые произвольные постоянные. Индексы ν_1 и ν_2 функций Куммера M в общем случае могут быть комплексными. Пометки o и e помечают соответственно четность (*even*) и нечетность (*odd*) функций h_e и h_o относительно изменения знаков их аргументов.

Здесь мы обобщим эти результаты на случаи возможных небольших искажений пучка. Практически, пучки могут быть смещены в поперечных направлениях относительно оси распространения OZ . Их ось может быть смещена (*displacement*) параллельно оси OZ в некотором направлении и наклонена (*titled*) на некоторый угол относительно оси OZ . Такие пучки называются децентрированными (*decentered*). Эти искажения будем формально описывать добавками к поперечным координатам X и Y с помощью комплексных скаляров X_0 и Y_0 , т. е. во всех формулах (5), (8)–(10) и в (4) первоначальные переменные X и Y заменим на децентрированные переменные X_d и Y_d :

$$X_d = X - X_0, \quad \text{где } X_0 = X_0' - iX_0'' \quad (12)$$

$$Y_d = Y - Y_0, \quad \text{где } Y_0 = Y_0' - iY_0'' \quad (13)$$

Например, здесь параметр X_0' характеризует начальное поперечное смещение, а X_0'' – наклон пучка в плоскости XOZ . Смысл обозначений для параметров Y_0', Y_0'' аналогичен.

Итак, соотношения (4)–(11) с децентрированными поперечными переменными X_d и Y_d (12), (13) описывают решения для амплитуд скалярных параксиальных децентрированных астигматических 3D пучков $K-G$. Эти выражения зависят от трех переменных (X, Y, Z) и восьми ($\nu_1, \nu_2, X_0, Y_0, Q_{0X}, Q_{0Y}, P_{0X}, P_{0Y}$) свободных комплексных параметров. Они описывают восьмипараметрическое семейство решений для амплитуд скалярных параксиальных децентрированных астигматических 3D пучков $K-G$. Как уже отмечалось выше, 3D решения для пучков $K-G$ можно построить как произведения соответствующих 2D решений. При этом возможна любая комбинация четностей функций h_1 и h_2 . В итоге по четности все решения (4) делятся на четыре типа:

$$f_{ee} = Gh_e h_{2e} h_3; \quad f_{eo} = Gh_e h_{2o} h_3; \quad f_{oe} = Gh_o h_{2e} h_3; \quad f_{oo} = Gh_o h_{2o} h_3. \quad (14)$$

Пучки Эрмита-Гаусса. Пучки $K-G$ представляют обобщение пучков $H-G$, описываемых функциями Эрмита с комплексным аргументом [1]–[5], [8]–[10]. Остановимся на пучках $K-G$ с неотрицательными целочисленными индексами ν_1 и ν_2 . Тогда последние редуцируются к обобщенным пучкам $H-G$. При $\nu_1 = \nu_2 = 0$ получаем астигматический децентрированный гауссов пучок (9). При $Q_{0X}'' > 0$ и $Q_{0Y}'' > 0$ данное решение удовлетворяет физическим принципам и квадратично интегрируемо.

Пусть переменная X_1 будет быть вещественной при любых Z . Тогда параметр $P_X = Q_X^*$, откуда $P_{0X}'' = -Q_{0X}''$ и поэтому

$$X_1 = \sqrt{2}X/W_X. \quad (15)$$

Здесь $W_X = \sqrt{1 + (Z - Q'_{0X})^2 / Q''_{0X}{}^2} = w_x / x_0$ – нормированный поперечный размер пучка вдоль оси ОХ. Выражения для вещественных Y_1 аналогичны. Получаем 3D астигматические стандартные пучки $H - G$ с вещественным аргументом [1], [2], [5].

При $P_{0X} \rightarrow \infty, P_{0Y} \rightarrow \infty$ пучки $K - G$ комплексного аргумента сводятся к элегантным пучкам $K - G$. Если далее ν_1 и ν_2 – целые, то последние редуцируются к элегантными пучкам $H - G$, впервые введенным Сигманом [3].

Условия квадратичной интегрируемости децентрированных пучков Куммера-Гаусса. Наибольший практический интерес представляют физически реализуемые пучки конечной мощности. Рассмотрим 2D пучки $K - G$, соответствующие плоскости ОХ. Амплитуда такого пучка должна быть ограниченной при всех X . Более того, при $|X| > 0$ амплитуда f

должна стремиться к нулю и быть квадратично интегрируемой (КИ), т. е. интеграл $\int_{-\infty}^{\infty} |f|^2 dX$ должен сходиться. Чтобы гауссов пучок был физически реализуем, как известно, достаточно одного простого ограничения: $Q''_0 > 0$.

Проведем анализ условий КИ для 2D пучков $K - G$, соответствующих плоскости ХОZ. Для этого исследуем поведение функций f при $|f| \rightarrow \infty$. Асимптотическое поведение конфлюэнтной гипергеометрической функции $F_1(a, b, \Phi)$ при $|\Phi| \rightarrow \infty$ описывается формулой [11], [12]

$$F_1(a, b, \Phi) = \frac{\exp(-i\pi a) \cdot \Gamma(b)}{\Gamma(b-a)} \Phi^{-a} + \frac{\exp(\Phi) \cdot \Gamma(b)}{\Gamma(a)} \Phi^{a-b}, \tag{16}$$

где Γ – гамма-функция и $a \neq 0, -1, -3, \dots$. Учитывая (16), получим условия КИ для пучков, соответствующие различным частным ситуациям, рассмотренным ниже. Результаты проведенного анализа представлены в таблице 1. Они соответствуют центрированным пучкам $K - G$, когда $X''_0 \neq 0$. В последних двух столбцах таблицы 1 в скобках приведены итоги анализа КИ для децентрированных пучков $K - G$. Видно, что во всех случаях децентровка пучка может только ухудшить условия КИ.

Таблица 1 – Условия КИ для 2D световых пучков Куммера-Гаусса

№	Ограничения на параметры Q''_0	Ограничения на параметры P''_0	Ограничения на индекс $\nu = \nu' + i\nu''$ ($m = 0, 1, 2, \dots$)	Предел $|f|$ при $|x| \rightarrow \infty$	Выполнение условий КИ
1	$Q''_0 > 0$	$P''_0 \geq 0$	нет	$|f^e| \rightarrow 0; |f^o| \rightarrow 0$	да; да
2	$Q''_0 > 0$	$P''_0 \leq 0$	$2m$	$|f^e| \rightarrow 0; |f^o| \rightarrow \infty$	только для f^e
3	$Q''_0 > 0$	$P''_0 \leq 0$	$2m + 1$	$|f^o| \rightarrow 0; |f^e| \rightarrow \infty$	только для f^o
4	$Q''_0 \leq 0$	$P''_0 > 0$	$-2m - 2$	$|f^o| \rightarrow 0; |f^e| \rightarrow \infty$	только для f^o
5	$Q''_0 \leq 0$	$P''_0 > 0$	$-2m - 1$	$|f^e| \rightarrow 0; |f^o| \rightarrow \infty$	только для f^e
6	$Q''_0 > 0$	$P''_0 = 0$	$\nu' > -1/2$	$|f| \rightarrow 0 \quad (\infty)$	да (нет)
7	$Q''_0 > 0$	$|P''_0| \rightarrow \infty$	$\nu' > -1/2$	$|f| \rightarrow 0$	да
8	$Q''_0 > 0$	$P''_0 = 0$	$\nu' \in (-1; -1/2]$	$|f| \rightarrow 0 \quad (\infty)$	нет
9	$Q''_0 > 0$	$|P''_0| \rightarrow \infty$	$\nu' \in (-1; -1/2]$	$|f| \rightarrow 0$	нет
10	$Q''_0 > 0$	$P''_0 = 0$	$\nu' = -1$	$|f| \rightarrow \text{const} \quad (\infty)$	нет
11	$Q''_0 > 0$	$|P''_0| \rightarrow \infty$	$\nu' = -1$	$|f| \rightarrow \text{const}$	нет

Окончание таблицы 1

12	$Q_0'' > 0$	$P_0'' = 0$ или $|P_0''| \rightarrow \infty$	$\nu' < -1$	$|f| \rightarrow \infty$	нет
13	$Q_0'' = 0$	$P_0'' > 0$	$\nu' < -1/2$	$|f| \rightarrow 0$ (∞)	да (нет)
14	$|Q_0''| \rightarrow \infty$	$P_0'' > 0$	$\nu' < -1/2$	$|f| \rightarrow 0$	да
15	$Q_0'' = 0$	$P_0'' > 0$	$\nu' \in [-1/2; 0)$	$|f| \rightarrow 0$ (∞)	да (нет)
16	$|Q_0''| \rightarrow \infty$	$P_0'' > 0$	$\nu' \in [-1/2; 0)$	$|f| \rightarrow 0$	нет
17	$Q_0'' = 0$	$P_0'' > 0$	$\nu' = 0$	$|f| \rightarrow \text{const}$ (∞)	нет
18	$|Q_0''| \rightarrow \infty$	$P_0'' > 0$	$\nu' > 0$	$|f| \rightarrow \text{const}$	нет
19	$Q_0'' = 0$ или $|Q_0''| \rightarrow \infty$	$P_0'' > 0$	$\nu' > 0$	$|f| \rightarrow \infty$	нет
20	$Q_0'' = 0$	$P_0'' = 0$ или $|P_0''| \rightarrow \infty$	$\nu' \in (-1; 0)$	$|f| \rightarrow 0$ (∞)	нет
21	$|Q_0''| \rightarrow \infty$	$P_0'' = 0$	$\nu' \in (-1; 0)$	$|f| \rightarrow 0$ (∞)	нет
22	$Q_0'' = 0$	$P_0'' = 0$ или $|P_0''| \rightarrow \infty$	$\nu'_1 = -1$ или $\nu' = 0$	$|f| \rightarrow 0$ (∞)	нет
23	$|Q_0''| \rightarrow \infty$	$P_0'' = 0$	$\nu' = -1$ или $\nu' = 0$	$|f| \rightarrow \text{const}$ (∞)	нет
24	$Q_0'' = 0$	$P_0'' = 0$ или $|P_0''| \rightarrow \infty$	$\nu' < -1$ или $\nu' > 0$	$|f| \rightarrow \infty$	нет
25	$|Q_0''| \rightarrow \infty$	$P_0'' = 0$	$\nu' < -1$ или $\nu' > 0$	$|f| \rightarrow \infty$	нет

Чтобы 2D гауссов пучок был физически реализуем, как отмечалось выше, достаточно одного простого ограничения $Q_0'' > 0$. В [9], [10] нами исследовались условия КИ для 2D пучков $K-G$. Здесь мы добавили также анализ ситуаций, когда $|P_0''| \rightarrow \infty$ или $|Q_0''| \rightarrow \infty$.

Анализ информации таблицы 1 приводит к следующим выводам для 2D пучков $K-G$. Основной вклад в условия их КИ вносит гауссиан, поэтому необходимые условия КИ для 2D пучков $K-G$ – $Q_0'' > 0$ либо $P_0'' > 0$.

Если одно из предыдущих необходимых условий выполнено, то при целочисленном индексе ν одна из функций f^e или f^o обязательно будет КИ. При этом, если $\nu \geq 0$, то, в общем случае, имеем обобщенный пучок $H-G$ комплексного аргумента, который может редуцироваться к стандартному или элегантному пучку $H-G$. Здесь условия КИ для центрированных и децентрированных пучков совпадают. Если же $\nu < 0$, то имеем тип пучков $K-G$ с целочисленным отрицательным индексом ν , который обсуждался нами ранее [9], [10].

Пусть индекс ν не является целочисленным и может быть комплексным. Тогда возможные условия КИ для функций f^e и f^o становятся одинаковыми. КИ может также реализоваться при условиях ($Q_0'' > 0$ и $P_0'' = 0$) либо при ($P_0'' > 0$ и $Q_0'' = 0$). При этом начинает играть существенную роль вещественная часть ν' комплексного индекса ν функции Куммера и КИ может существовать только при определенных значениях условия ν' . Мнимая часть ν'' при этом не оказывает влияния на КИ.

При децентровке пучка, т. е. при $X_0'' \neq 0$ резко сужаются возможные области изменения параметров (X_0'' , Q_0'' , P_0'' , ν') для выполнения условий КИ. Так, при $P_0'' = 0$ или $Q_0'' = 0$ КИ пучков невозможна ни при каких значениях параметра ν' . Поэтому центрированные пучки $K-G$ с $P_0'' = 0$ или $Q_0'' = 0$ являются структурно неустойчивыми, поскольку после их децентровки их КИ исчезает.

В работе Бандреса [5] фактически приведены условия КИ только для центрированных пучков (по терминологии Бандреса – декартовых), хотя рассматриваются и децентрированные пучки. Показательно, что в последующей работе [6] авторы условиями КИ называют

уже только условия ($Q_0'' > 0$ и $P_0'' = 0$) с некорректным замечанием, что только **второе** условие не необходимо для обобщенных пучков $H-G$. На самом деле, как видно из таблицы 1 (строки 4 и 5), при $Q_0'' \leq 0$ и $P_0'' > 0$ одна из функций f^e или будет обладать КИ при целочисленных отрицательных значениях индекса ν , вопреки мнениям работ [5], [6].

Мы обсуждали условия выполнения КИ для 2D пучков $K-G$, соответствующих плоскости XZ . Аналогичные рассуждения справедливы также для функций, описывающих 2D пучки $K-G$, соответствующих плоскости YZ . Общая функция f для 3D пучка $K-G$, как отмечалось выше, может быть представлена как произведение двух функций для двух 2D пучков $K-G$. Поэтому общие условия КИ 3D пучков получаются путем наложения условий КИ двух 2D пучков. Это обусловлено тем обстоятельством, что рассматриваемые нами астигматические пучки обладают простым астигматизмом.

Заключение. В данной работе формализм для описания 3D параксиальных световых пучков, предложенный ранее нами в [10], был распространен на децентрированные 3D астигматические пучки $K-G$. Показано, что выражения, характеризующие 3D децентрированные астигматические пучки $K-G$, являются произведением функций, описывающих 2D световые пучки. Поэтому число свободных комплексных параметров для 3D астигматических пучков $K-G$ удваивается и равно восьми.

Выявлены взаимосвязи пучков $K-G$ с обобщенными, стандартными и элегантными пучками $H-G$.

Обсуждены ограничения на параметры, чтобы полученные решения соответствовали 3D пучкам с конечной переносимой мощностью или, как говорят, физически реализуемым. Условия физической реализуемости, т. е. КИ должны независимо выполняться для 2D полей во взаимно перпендикулярных плоскостях.

Установлено, что при децентровке пучка резко сужаются возможные области изменения восьми свободных параметров для выполнения условий КИ, т. е. физической реализуемости. Так, при $P_0'' = 0$ или $Q_0'' = 0$ КИ пучков невозможна ни при каких значениях параметра ν' . Поэтому децентрированные пучки $K-G$ с $P_0'' = 0$ или $Q_0'' = 0$ являются структурно неустойчивыми.

Литература

1. Ананьев, Ю.А. Оптические резонаторы и лазерные пучки / Ю.А. Ананьев. – М. : Наука, 1990. – 264 с.
2. Гончаренко, А.М. Гауссовы пучки света / А.М. Гончаренко. – Мн. : Наука и техника, 1977. – 142 с.
3. Siegman, A.E. Hermite-gaussian function of complex argument as optical-beam eigenfunction / A.E. Siegman // JOSA. – 1973. – Vol. 63, № 9. – P. 1093–1094.
4. Gori, F. Bessel-Gaussian beams / F. Gori, G. Guattari, C. Padovani // Opt. Commun. – 1987. – Vol. 64. – P. 491–495.
5. Bandres, M.A. Cartesian beams / M.A. Bandres, J.C. Gutierrez-Vega // Optics Letters. – 2007. – Vol. 32, № 23. – P. 3459–3461.
6. Bandres, M.A. Higher-order moments and overlaps of Cartesian beams / M.A. Bandres, D. Lopez-Mago, J.C. Gutierrez-Vega // Journ. of Optics. – 2010. – Vol. 12. – P. 065702(9pp).
7. Lü, Baida. Beam propagation factor of decentred Gaussian and cosine-Gaussian beams // Baida Lü, Hong Ma // Journal of Modern Optics. – 2000. – Vol. 47, № 4. – P. 719–723.
8. Гиргель, С.С. Скалярные параксиальные двумерные гауссовоподобные пучки / С.С. Гиргель // Проблемы, физики, математики и техники. – 2010. – № 1 (2). – С. 7–11.
9. Гиргель, С.С. Физические свойства скалярных 2D пучков Куммера-Гаусса / С.С. Гиргель // Проблемы, физики, математики и техники. – 2011. – № 4 (9). – С. 19–23.
10. Гиргель, С.С. Скалярные астигматические 3D световые пучки Куммера-Гаусса / С.С. Гиргель // Проблемы, физики, математики и техники. – 2013. – № 1 (14). – С. 19–23.
11. Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовица, И. Стиган. – М. : Наука, 1979. – 830 с.
12. Флюгге, З. Задачи по квантовой механике / З. Флюгге. – М. : Мир, 1974. – Т. 2. – 418 с.

Кривые инверсии эффекта Джоуля-Томсона для обобщенного уравнения Ван-дер-Ваальса

Е.А. ДЕЙ, Г.Ю. ТЮМЕНКОВ

Для обобщенного уравнения Ван-дер-Ваальса выполнен теоретический анализ эффекта Джоуля-Томсона в приведенных переменных и построены кривые инверсии. Найдены значения параметров уравнения, обеспечивающие близость теоретической кривой инверсии к обобщенной экспериментальной кривой.

Ключевые слова: реальный газ, полуэмпирическое уравнение состояния, приведенные переменные, эффект Джоуля-Томсона, кривая инверсии.

All the necessary relations for the generalized equation of Van-der-Waals obtained. Curves inversions of Joule-Thomson effect in the above variables are constructed. The parameters of the equation to ensure the proximity to the theoretical curve inversion with generalized experimental curve are found.

Keywords: semi-empirical equation of state, given variables, Joule-Thomson process, curve inversion.

Введение. Теоретическое описание свойств реальных газов имеет существенное практическое значение для многочисленных инженерных приложений [1]–[3]. Классическим полуэмпирическим уравнением, описывающим свойства реальных газов, является уравнение Ван-дер-Ваальса [1]–[4], позволившее качественно предсказать ряд экспериментально подтвержденных результатов, однако, применимое только для ограниченной области изменения параметров. Поиск уравнения, наиболее адекватно описывающего свойства реальных газов, и в настоящее время представляет актуальную задачу. При этом работа ведется как в направлении увеличения числа свободных параметров уравнения, что приближает его к подбору эмпирической формулы, так и в направлении наилучшего сочетания малого числа параметров.

В работе [5] было рассмотрено молярное уравнение состояния реального газа, содержащее пять параметров и имеющее смысл обобщения уравнения Ван-дер-Ваальса

$$\left(P + \frac{a}{(V+c)^k T^m} \right) (V-b) = RT. \quad (1)$$

Авторами работы [5] было показано, что уравнение хорошо передает количественные соотношения между параметрами реальных газов. Рассчитанные путем обработки табличных данных для значений P , V , T критические параметры большинства газов оказались близкими по величине к экспериментальным параметрам.

Частными случаями уравнения (1) оказываются [3]: уравнение Ван-дер-Ваальса ($c = 0$, $k = 2$, $m = 0$), уравнение Берто (с = 0, $k = 2$, $m = 1$), уравнение Клаузиуса ($k = 2$, $m = 1$).

В данной работе выполнен вывод теоретических соотношений, определяющих эффект Джоуля-Томсона для уравнения (1) в приведенных переменных, реализовано вычисление точек инверсионной кривой, выполнен анализ согласованности теоретических результатов с обобщенными экспериментальными данными для кривой инверсии реальных газов.

Описание процесса Джоуля-Томсона в приведенных переменных наиболее удобно, так как в силу принципа соответственных состояний теоретические результаты в рамках выбранного уравнения состояния являются общими для всех термодинамически подобных веществ [6].

Обобщенное уравнение Ван-дер-Ваальса в приведенных переменных. Рассмотрим связь параметров уравнения (1) и параметров критического состояния вещества, определяемых экспериментально. На изотерме при критической температуре этому состоянию соответствует единственная (критическая) точка, являющаяся одновременно точкой схождения локальных экстремумов и точкой перегиба изотермы. Математически это означает равенство нулю частных производных

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial P}{\partial V} \right)_T &= -\frac{RT}{(V-b)^2} + k \frac{a}{(V+c)^{k+1} T^m} = 0; \\ \left(\frac{\partial^2 P}{\partial V^2} \right)_T &= \frac{2RT}{(V-b)^3} - \frac{k(k+1)a}{(V+c)^{k+2} T^m} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Соотношения (2) позволяют выразить характеристики критического состояния (критическую температуру T_{kp} , критическое давление P_{kp} и критический объем V_{kp}) через параметры уравнения состояния:

$$V_{kp} = \frac{(k+1)b + 2c}{k-1}; \quad P_{kp} = \frac{RT_{kp}(k-1)^2}{4k(b+c)};$$

$$T_{kp}^{m+1} = \frac{4ka(k-1)^{k-1}}{R(k+1)^{k+1}(b+c)^{k-1}}. \quad (3)$$

Из выражений (3) несложно получить формулы, связывающие значения некоторых параметров уравнения состояния

$$a = \frac{(k+1)^{k+1}(b+c)^{k-1}}{4k(k-1)^{k-1}} RT_{kp}^{m+1}; \quad b+c = \frac{(k-1)^2}{4k} \frac{RT_{kp}}{P_{kp}};$$

$$(k+1)(V_{kp} - b) = 2(V_{kp} + c). \quad (4)$$

Из (4) следует, в частности, что параметры a , b и c для уравнения, корректно описывающего критическое состояние вещества, не являются независимыми.

Уравнения состояния реальных газов и выражения для коэффициента инверсии будем записывать с использованием приведенных термодинамических переменных, определенных по отношению к параметрам критического состояния. Так как параметры b и c имеют размерность объема, для них также удобно определить приведенные значения.

$$\tilde{P} = \frac{P}{P_{kp}}, \quad \tilde{V} = \frac{V}{V_{kp}}, \quad \tilde{T} = \frac{T}{T_{kp}}, \quad \tilde{b} = \frac{b}{V_{kp}}, \quad \tilde{c} = \frac{c}{V_{kp}}. \quad (5)$$

В приведенных переменных (5) уравнение (1) принимает вид, соответствующий исходному

$$\left[\tilde{P} + \frac{A}{(\tilde{V} + \tilde{c})^k \tilde{T}^m} \right] (\tilde{V} - \tilde{b}) = B \tilde{T}, \quad (6)$$

где использованы обозначения

$$A = \frac{(k+1)(1+\tilde{c})^k}{(k-1)}, \quad B = \frac{4k(1+\tilde{c})}{k^2-1}.$$

Используя соотношения (4) и определив величины

$$\tilde{W} = \frac{\tilde{V} + \tilde{c}}{1 + \tilde{c}}, \quad \alpha = \frac{k+1}{k-1}, \quad \beta = \frac{4k}{(k-1)^2},$$

приведенное уравнение для (1) можно записать и в виде, полученном в работе [5]:

$$\left(\tilde{P} + \frac{\alpha}{\tilde{W}^k \tilde{T}^m} \right) (\alpha \tilde{W} - 1) = \frac{4k}{(k-1)^2} \tilde{T} = \beta \tilde{T}. \quad (7)$$

Соотношения (4), (5) позволяют выразить через параметры обобщенного уравнения Ван-дер-Ваальса такую важную экспериментально измеряемую характеристику реального газа, как критический коэффициент сжимаемости:

$$Z_{kp} = \frac{P_{kp} V_{kp}}{RT_{kp}} = \frac{k^2 - 1}{4k(1 + \tilde{c})}.$$

Приведенный параметр Джоуля-Томсона. Применим обобщенное уравнение Ван-дер-Ваальса для исследования подсистемно-равновесного изохорического ($dW = 0$) процесса прокачки реального газа сквозь пористую перегородку [1]–[5]. В этом процессе наблюдается изменение температуры реального газа (эффект Джоуля-Томсона), которое характеризуется коэффициентом Джоуля-Томсона

$$\mu_{J-T} = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_W = \frac{1}{C_P} \left[T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P - V \right] = -\tilde{\lambda} \frac{P_{kp}}{C_P} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T. \quad (8)$$

В формуле (8) C_p – изобарная теплоемкость системы, а безразмерная величина $\tilde{\lambda}$, которую будем называть приведенным параметром Джоуля-Томсона, выражается в терминах приведенных переменных (5)

$$\tilde{\lambda} = \tilde{V} \left(\frac{\partial \tilde{P}}{\partial \tilde{V}} \right)_{\tilde{T}} + \tilde{T} \left(\frac{\partial \tilde{P}}{\partial \tilde{T}} \right)_{\tilde{V}} \quad (9)$$

и имеет одинаковое значение для газов, находящихся в соответственных состояниях. В физических областях значений производная $(\partial V / \partial P)_T < 0$, а теплоемкость $C_p > 0$, что означает одинаковость знаков μ_{J-T} и $\tilde{\lambda}$ в (8). При уменьшении давления ($d\tilde{P} < 0$), следующем из условия протекания процесса Джоуля-Томсона, возможны два варианта изменения температуры в зависимости от знака параметра: $\tilde{\lambda} > 0 \rightarrow d\tilde{T} < 0$, $\tilde{\lambda} < 0 \rightarrow d\tilde{T} > 0$. Первый вариант соответствует положительному эффекту Джоуля-Томсона (газ остывает), второй – отрицательному (газ нагревается). Условием же $\tilde{\lambda} = 0$ задаются точки инверсии, в которых изменяется знак эффекта, поэтому данному условию можно сопоставить приведенную температуру инверсии \tilde{T}_i и получить выражение для ее расчета.

С учетом выражения для приведенного давления, следующего из (7)

$$\tilde{P} = \frac{\beta \tilde{T}}{\alpha \tilde{W} - 1} - \frac{\alpha}{\tilde{W}^k \tilde{T}^m},$$

и определения (9) получаем соотношение для приведенного параметра Джоуля-Томсона

$$\tilde{\lambda}(\tilde{V}, \tilde{T}) = \frac{(\alpha\gamma - 1)\beta\tilde{T}}{(\alpha\tilde{W} - 1)^2} + \frac{\alpha[(m+k)\tilde{W} - k\gamma]}{\tilde{W}^{k+1}\tilde{T}^m}; \quad \gamma = \frac{\tilde{c}}{1 + \tilde{c}}. \quad (10)$$

Из условия $\tilde{\lambda} = 0$ на основании (10) получим выражение для приведенной температуры инверсии

$$\tilde{T}_i(\tilde{V}_i) = \left[\frac{\alpha(\alpha\tilde{W}_i - 1)^2 (m\tilde{W}_i + k\tilde{W}_i - k\gamma)}{\beta(1 - \alpha\gamma)\tilde{W}_i^{k+1}} \right]^{1/(m+1)}, \quad (11)$$

где для удобства записи формул введена величина, связанная с приведенным объемом

$$\tilde{W}_i = \frac{\tilde{V}_i + \tilde{c}}{1 + \tilde{c}}.$$

При известных значениях \tilde{V}_i , \tilde{T}_i давление в точках кривой инверсии эффекта Джоуля-Томсона вычисляется по формуле

$$\tilde{P}_i(\tilde{V}_i) = \frac{\beta\tilde{T}_i}{\alpha\tilde{W}_i - 1} - \frac{\alpha}{\tilde{W}_i^k \tilde{T}_i^m}. \quad (12)$$

Отметим, что формулы (10)-(12) в частных случаях уравнения Ван-дер-Ваальса и уравнения Бертло принимают вид, совпадающий с известными результатами [1], [3].

Для вычисления координат $(\tilde{T}_i, \tilde{P}_i)$ точек кривой инверсии нами была использована методика, подробно описанная в работе [6]. Численный расчет кривой инверсии состоял в регулярном изменении значений приведенного объема и вычислении соответствующих значений температуры и давления.

По результатам вычислений были определены параметры уравнения (1), обеспечивающие наилучшее совпадение результатов с обобщенной экспериментальной кривой инверсии, полученной в работе [7] на основе обработки большого числа экспериментов методом наименьших квадратов для веществ с малым фактором ацентричности (аргона, метана, азота, кислорода, ксенона, криптона, окиси углерода).

Графики кривых инверсии в приведенных термодинамических переменных для различных случаев приведены на рисунке 1. Область положительного эффекта ограничивается сверху кривой инверсии, а снизу осью приведенных температур, что очевидно из поведения $\tilde{\lambda}$ при больших значениях \tilde{T} . \tilde{P}

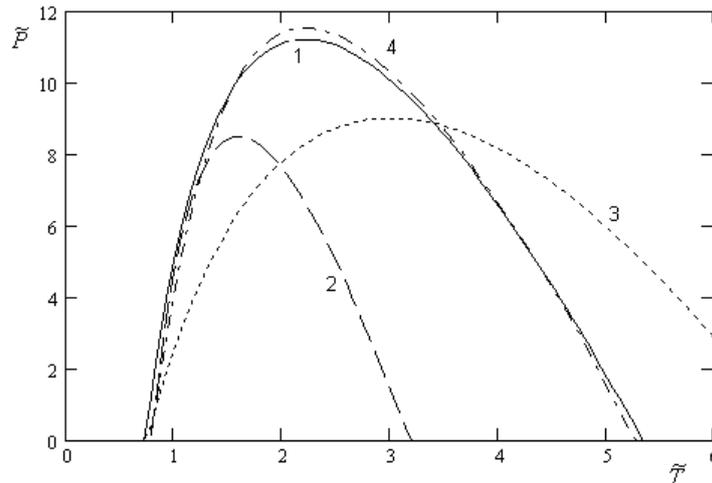


Рисунок 1 – графики кривых инверсии: 1 - для обобщенного уравнения Ван-дер-Ваальса (1), 2 – для уравнения Бертло, 3 – для уравнения Ван-дер-Ваальса, 4 – по результатам обработки экспериментальных данных [7].

Полиномиальная аппроксимация обобщенной кривой имеет вид

$$\tilde{P} = \sum_{k=0}^6 \beta_k \tilde{T}^k.$$

Значения параметров аппроксимации: $\beta_0 = -32.5209374$, $\beta_1 = 65.6922312$, $\beta_2 = -39.738430$, $\beta_3 = 12.9300299$, $\beta_4 = -2.46176904$, $\beta_5 = 0.25378553$, $\beta_6 = -0.0109865$.

Вычисленные значения оптимальных параметров уравнения (1): $k = 2$, $m = 0.5365$, $c = 0.1309$.

Заключение. В работе получены соотношения для точек кривых инверсии знака эффекта Джоуля-Томсона в приведенных переменных и выполнено графическое сопоставление инверсионных кривых и областей положительности эффекта.

Важно отметить, что степень достоверности уравнения при описании не только критических параметров и изотерм, но и эффекта Джоуля-Томсона можно рассматривать как согласованный критерий адекватности уравнения.

Полученные результаты могут быть использованы при выборе уравнения состояния для описания конкретных газов в заданных диапазонах температур и давлений.

Литература

1. Румер, Ю.Б. Термодинамика, статистическая физика и кинетика / Ю.Б. Румер, М.Ш. Рывкин. – Новосибирск : Издательство Новосибирского университета, 2000. – 608 с.
2. Кириченко, П.А. Термодинамика, статистическая и молекулярная физика / П.А. Кириченко. – М. : Физматкнига, 2005. – 176 с.
3. Кудинов, В.А. Техническая термодинамика / В.А. Кудинов, Э.М. Карташов. – М. : Высшая школа, 2001. – 261 с.
4. Castillo, M.G. Three-Parameter Corresponding States Correlations for Joule-Thomson Inversion Curves / M.G. Castillo // Int. J. Thermophys. – 1999. – V. 20, № 6. – P. 1737–1751.
5. Фогельсон, Р.Л. Уравнение состояния реального газа. / Р.Л. Фогельсон, Е.Р. Лихачев // ЖТФ. – 2004. – Т. 74, Вып. 7. – С. 129–130.
6. Дей, Е.А. Расчет параметров изохорического охлаждения газов Редлиха-Квонга / Е.А. Дей, О.В. Новикова, Г.Ю. Тюменков // Известия ГГУ. – 2012. – № 6. – С. 38–42.
7. Hendricks, R.C. Joule-Thomson Inversion Curves and Related Coefficients for Several Simple Fluids / R.C. Hendricks, I.C. Peller, A.K. Baron // NASA Technical Note TN D-6807. – NASA, 1972. – 59 p.

Волноводная теория гирации

В.И. КОНДРАТЕНКО

В настоящее время существенное развитие получило направление, связанное с переносом результатов моделирования распространения электромагнитных волн СВЧ-диапазона в оптический диапазон и наоборот. Подобный процесс, с одной стороны, позволяет уяснить механизм взаимодействия света со средами, обладающими определенными особенностями структуры, путем перехода от феноменологических моделей к микроскопическим, а с другой стороны – позволяет определить подходы к созданию метасред, обладающих вполне определенными свойствами, отличными от свойств реальных природных структур. В настоящей работе проведено теоретическое рассмотрение возможности создания искусственных гиротропных сред с заданными параметрами на основе металлических и металло-диэлектрических структур в СВЧ диапазоне длин волн.

Ключевые слова: оптические явления, СВЧ-диапазон, коэффициент отражения, коэффициент передачи, слоистые среды, моделирование структуры.

Currently the direction associated with the transfer of the results of the simulation of electromagnetic wave propagation in the microwave range of the optical range, and vice versa has been received significant development. Such a process, on the one hand, allow to clarify the mechanism of interaction of light with the media having certain features of the structure, by moving from a phenomenological models to the microscopic, and on the other – to determine the approaches to the creation meta-media having certain characteristics, different from those of real natural structures. In this paper, a theoretical consideration of the possibility of creating artificial gyrotropic media with the specified parameters on the basis of metal and metal-dielectric structures in the microwave range of wavelengths is given.

Keywords: optical phenomena, the microwave range, the reflection coefficient, transmission coefficient, layered media, modeling of the structure.

Введение. В работе предложена модель гиротропной среды на основе описания планарной микроструктуры материала в виде слоев с выраженной анизотропией проводимости. Подобный слой может рассматриваться, как идеальный поляризатор электромагнитной волны. Моделью элементарной ячейки такой среды в СВЧ-диапазоне длин волн является совокупность последовательно размещенных двух проволочных решеток, повернутых друг относительно друга на малый угол α .

Теоретические расчеты. Если между скрещенными поляризатором и анализатором поместить еще один поляризатор, ориентированный отлично от каждого из первой пары, то такая система будет пропускать волну, несмотря на то, что начальный и конечный элементы скрещены. Такая система уже может рассматриваться как устройство для поворота поляризации на девяносто градусов. Как известно, для технических целей больший поворот не нужен. Естественно, коэффициент передачи такой системы по амплитуде в лучшем случае симметричного расположения составляет 50 % (без учета потерь на отражение), однако система может быть дополнена, при этом коэффициент передачи возрастает. Так, уже при двух симметрично расположенных промежуточных поляризаторах коэффициент передачи возрастает до 65 %, при трех – до 79 % и т. д. Как нетрудно показать, в пределе при числе промежуточных элементов, стремящемся к бесконечности, коэффициент передачи как по амплитуде, так и по мощности стремится к единице. Естественно, результат является сугубо прикидочным без учета поглощения и переотражения в структуре, но, тем не менее, позволяет судить о возможности подобного подхода к моделированию гиротропной среды в СВЧ-диапазоне, где поляризующее устройство может быть легко реализовано путем применения проводящих структур.

В качестве поляризатора в СВЧ диапазоне длин волн может быть использована среда с выраженной анизотропией проводимости либо ее модель, простейшей из которых представляется решетка из линейных элементов, расстояние между которыми существенно меньше половины длины волны. В этом случае волна поперечной поляризации экспоненциально затухает, причем показатель экспоненты определяется, как толщиной структуры, так и расстоянием между элементами. В идеале, при расстоянии между элементами равном нулю, волна окажется полностью поляризованной при нулевой толщине структуры, которая будет пред-

ставлять собой планарный поляризатор. Такое представление позволяет рассмотреть модель гиротропной среды типа холестерического кристалла, в котором каждый отдельный слой мы будем представлять, как идеальный поляризатор, а гиротропию – как поворот каждого последующего слоя на некоторый, малый в общем случае, постоянный угол. Структура обладает локальной (в пределах слоя) анизотропией и гиротропией в направлении нормали. Элементарной ячейкой структуры является пара соседних слоев, расположенных параллельно друг другу на некотором расстоянии, в общем случае, не связанном с длиной волны и развернутых на некоторый угол, меньший 90 градусов [1]. Рассмотрим прохождение волны с поляризацией, соответствующей ориентации входного слоя, и отражение от нее с учетом переотражений внутри ячейки. При учете потери полуволны при отражении от металлической поверхности для эффективных коэффициентов передачи и отражения можно получить соответственно:

$$\theta_{\text{эфф}} = \frac{-2i \cos \alpha \sin \varphi e^{i2\varphi}}{1 - \cos^2 \alpha e^{i2\varphi}} = 2iA \cos \alpha \sin \varphi, \quad (1)$$

$$\Gamma_{\text{эфф}} = -\frac{\sin^2 \alpha e^{i2\varphi}}{1 - \cos^2 \alpha e^{i2\varphi}} = A \sin^2 \alpha, \quad (2)$$

где α – угол относительного разворота слоев, а φ – фазовый набег при прохождении электромагнитной волны между слоями структуры.

$$A = \frac{-e^{i2\varphi}}{1 - \cos^2 \alpha e^{i2\varphi}}.$$

Интерес представляет соответствие модели крайним случаям. Если слои не развернуты, то структура должна быть полностью прозрачной. Действительно, если $\varphi = 0$, то

$$A = \frac{e^{i\varphi}}{2i \sin \varphi},$$

и $\theta_{\text{эфф}} = e^{i2\varphi}$. При совмещении слоев ($\varphi = 0$) $\theta_{\text{эфф}} = 1$ и $\Gamma_{\text{эфф}} = 0$, что и следовало ожидать. В другом крайнем случае, при $\alpha = \pi/2$, структура должна быть полностью отражающей. Действительно, при этом

$$A = e^{i2\varphi}$$

и $\theta_{\text{эфф}} = 0$, $\Gamma_{\text{эфф}} = -e^{i2\varphi}$.

При совмещении обоих слоев ($\varphi = 0$) структура должна вести себя, как сплошная металлическая поверхность при любом отличном от нуля $\alpha \neq 0$. Это обусловлено нашим предположением об идеальности поляризатора. Так как последний представляет собой решетку с бесконечно малым шагом, то при пересечении двух таких решеток под любым отличным от нуля углом образуется ячеистая структура с бесконечно малым размером ячейки в любом направлении, что соответствует бесконечно быстрому затуханию волны любой поляризации. В то же время, в силу требования сохранения энергии волны, коэффициент отражения должен быть равным единице. Действительно, при осуществлении предельного перехода мы получаем $\Gamma_{\text{эфф}} = 1$ и $\theta_{\text{эфф}} = 0$, что как раз и соответствует отмеченным особенностям. Следует отметить, что создание идеального поляризатора типа описанной структуры не представляется возможным. Поляризатор, созданный из конечного числа макроскопических элементов, будет иметь конечный размер расстояния между отдельными элементами. При совмещении поляризаторов будет образовываться ячеистая структура, максимальный (диагональный) размер которой будет зависеть от расстояния между дискретам и угла их разворота. Структура будет пропускать без ослабления волны тех поляризаций, для которых будет выполняться условие превышения размера сечения элементарной ячейки половины длины волны. Для остальных поляризаций при распространении в среде амплитуда будет затухать по экспоненте. В критическом случае, когда размер большой диагонали ромба будет равен половине длины волны, такую искусственную среду можно рассматривать, как совокупность скрученных одномодовых волноводов, а сам процесс вращения плоскости поляризации – как распространение волны в таком волноводе. Таким образом, описываемый механизм гирации можно рассматривать, как волноводный.

Рассмотрим прохождение волны через совокупность слоев и отражение от нее. Для этого получим рекуррентные формулы для прохождения через структуру, содержащую $n + 1$ слой, в приближении, что известны эффективные коэффициенты для структуры из n слоев. В этом случае, проводя процедуру, аналогичную проделанной выше при определении эффективных коэффициентов в случае двух слоев, заменяя параметры одного из слоев на эффективные, можно получить

$$\Gamma_{n+1} = \Gamma_n + \frac{\theta_n^2 \Gamma_{\text{эфф}}}{1 - \Gamma_n \Gamma_{\text{эфф}}}, \quad (3)$$

$$\theta_n^2 = \frac{\theta_n \theta_{\text{эфф}}}{1 - \Gamma_n \Gamma_{\text{эфф}}}. \quad (4)$$

Очевидно, что коэффициент передачи является симметричным относительно замена порядка добавления очередного слоя к структуре. Аналогичное требование должно быть применено и к эффективному коэффициенту отражения, что приводит к соотношению:

$$\Gamma_n + \frac{\theta_n^2 \Gamma_{\text{эфф}}}{1 - \Gamma_{\text{эфф}} \Gamma_n} = \Gamma_{\text{эфф}} + \frac{\theta_n^2 \Gamma_n}{1 - \Gamma_n \Gamma_{\text{эфф}}}.$$

При обращении любого из коэффициентов отражения в ноль, среда будет полностью прозрачной. Использование реальных материалов при создании модели предполагает наличие поглощения ввиду конечности значения проводимости. В этом случае выражения для коэффициентов претерпевают некоторые изменения. С учетом сказанного

$$A = -\frac{e^{i2\varphi}}{1 - \Gamma^2 \cos^2 \alpha e^{i2\varphi}},$$

где Γ – модуль коэффициента ослабления. Тогда

$$\Gamma_{\text{эфф}} = A \Gamma \sin^2 \alpha$$

и

$$\theta_{\text{эфф}} = 2iA \cos \alpha \sin \varphi.$$

Интерес представляют структуры с числом элементов, стремящимся к бесконечности, и соответственно, с α и φ , стремящимися к нулю, т. е. – модель сплошной гиротропной среды. В этом случае логичным будет предположение о том, что добавление следующего слоя при большом их числе будет приводить к малым изменениям как коэффициента передачи, так и коэффициента отражения.

$$\Gamma_{n+1} \approx \Gamma_n.$$

Тогда из выражений (3) и (4) с учетом (1) и (2) для коэффициента отражения можно получить после некоторых преобразований приближенное выражение:

$$\Gamma_n = -1 + 2 \left(\frac{\sin \varphi}{\sin \alpha} \right)^2 + 4i \frac{\sin \varphi}{\sin \alpha} \frac{\sin \left(\frac{\alpha + \varphi}{2} \right) \sin \left(\frac{\alpha - \varphi}{2} \right)}{\sin \alpha}. \quad (5)$$

При отмеченных условиях $\varphi, \alpha \rightarrow 0$ (5) может быть представлено в более простом виде

$$\Gamma_n \approx -1 + 2 \left(\frac{\varphi}{\alpha} \right)^2 + i\varphi \left(1 - \left(\frac{\varphi}{\alpha} \right)^2 \right) = -1 + 2X^2 + 2i\varphi(1 - X^2),$$

где $X = \frac{\varphi}{\alpha}$.

Поскольку $\varphi = \frac{kl}{N}$ (k – волновое число, l общая толщина структуры), а $\alpha = \frac{\Phi}{N}$, то

$X = \frac{2\pi}{\xi}$, где ξ – угол поворота на пути, равном одной длине волны. Здесь N – общее число элементов структуры, Φ – результирующий угол поворота поляризации. Коэффициент отражения имеет комплексный вид

$$\Gamma_n = |\Gamma_n| e^{i\psi} = 1 - 2\xi^2 + i\varphi(1 - \xi^2), \quad (6)$$

причем

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\varphi(1 - \xi^2)}{1 - 2\xi^2}$$

При выполнении условия $\varphi = \pm \frac{4\xi^2}{1 - \xi^2}$ происходит отражение волны. Поскольку полной прозрачности отвечает одновременное обращение в ноль как действительной, так и мнимой части выражения (6), что невозможно при φ , отличном от нуля, то коэффициент отражения никогда не обращается в ноль, и структура обладает ограниченным пропусканием.

Заключение. Проведенное теоретическое исследование показало, что в целом моделирование в области СВЧ диапазона оптических явлений является вполне перспективным направлением, позволяющим получить теоретические результаты, в целом согласующиеся с практическими. Полученные выражения для слоисто-неоднородной среды, содержащей конечное число элементов, показали, что в целом такая среда не отличается по своим оптическим свойствам от однородного элемента эквивалентной толщины при нормальном падении излучения.

Литература

1. Семченко, И.В. Преобразование поляризации электромагнитных волн при помощи спиральных излучателей / И.В. Семченко, С.А. Хахомов, А.Л. Самофалов // Радиотехника и электроника. – 2007. – Т. 52, № 8. – С. 1–6.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступила в редакцию 13.10.2015

Термооптическая генерация звука в магнитоактивных сверхрешетках

Г.С. МИТЮРИЧ¹, Е.В. ЧЕРНЕНОК¹, А.Г. МАЩЕНКО², А.Н. СЕРДЮКОВ¹

Исследован механизм управления термооптическим возбуждением звука бесселевыми световыми пучками (БСП) в поглощающих магнитоактивных сверхрешетках. Показано, что с помощью оптической системы включающую наведенный в электрооптическом кристалле аксикон с регулируемым углом конусности, можно осуществлять выбор необходимых поляризационных мод БСП и воздействовать на амплитуду фотодефлекционного отклика, возникающего в магнитоактивном образце. Также изучено влияние магнитного циркулярного дихроизма на величину угла фотодефлекции для различных промежутков времени облучения сверхрешетки модами БСП.

Ключевые слова: фотодефлекционный отклик, магнитоактивная сверхрешетка, амплитуда фотодефлекционного сигнала, бесселевые световые пучки, магнитный циркулярный дихроизм.

The mechanism of management of the thermo-optical excitation of sound by Bessel light beams (BLB) in absorbing magnetically superlattices was investigated. It is shown that using an optical system including induced in the electro-optic crystal axicon with an adjustable cone angle, one can make a choice of the necessary polarization BLB mode and affect on the amplitude of the photodeflection response occurring in a magnetoactive sample. The influence of magnetic circular dichroism on the angle of photodeflection for different periods of time of radiation of the superlattice by BLB modes is studied.

Keywords: photodeflection response, magnetoactive superlattice, amplitude of the photodeflection signal, Bessel light beams, magnetic circular dichroism.

Разработке современных методов изучения свойств сверхрешеток посвящено большое число работ [1]. К одним из наиболее чувствительных и информативных относится метод лазерной фотодефлекционной спектроскопии [2], [3]. В основе фотодефлекционного метода лежит преобразование поглощенной в объеме исследуемого образца световой энергии возбуждающего излучения в тепловую, которое приводит к появлению градиента преломления как в образце, так и в окружающей среде. По величине угла отклонения пробного лазерного луча малой мощности, при прохождении его через область с неоднородным показателем преломления, можно судить об оптических, диссипативных, теплофизических, линейных и нелинейных характеристиках образца.

Для описания свойств магнитоактивной среды воспользуемся материальными уравнениями [4]

$$\mathbf{E} = G^{-1} \mathbf{D}, \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad (1)$$

где $G^{-1} = (\varepsilon^{-1} + i\mathbf{G}^{\times})$, \mathbf{G}^{\times} – антисимметричный комплексный тензор второго ранга, дуальный вектору магнитной гирации \mathbf{G} . Реальная часть G' определяет удельное вращение плоскости поляризации, а мнимая часть G'' – ответственна за магнитный циркулярный дихроизм, $\varepsilon_{1,2} = \varepsilon'_{1,2} + i\varepsilon''_{1,2}$ – комплексный эффективный тензор диэлектрической проницаемости, мнимая часть которого ε'' определяет поглощение.

Пусть амплитудно-модулированный световой пучок нормально падает на двухслойную магнитоактивную сверхрешетку, возбуждая в нем термоакустические колебания, зондируемые пробным световым лучом [5]–[7]. В данном случае рассматривается трансверсальная геометрия взаимодействия возбуждающего фотодефлекционный отклик и пробного световых пучков (рисунок 1). Двухслойная сверхрешетка, предполагается, содержит в качестве компонентов магнитоактивные кристаллы класса 23 германат висмута $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ и силикат висмута $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$. В рамках длинноволнового приближения [8], когда период структуры $D = d_1 + d_2 \ll \lambda_1, \lambda_2$, где d_1, d_2 – толщины компонентов сверхрешеток, λ_1, λ_2 – длины оптических и тепловых волн, исследуемый образец можно рассматривать как одноосный кристалл, оптическая ось которого перпендикулярна границе слоев, а совпадающие главные значения эффективных тензоров ε и G можно представить в виде [9]

$$(\varepsilon_{ef})_{11} = (\varepsilon_{ef})_{22} = x_0 \varepsilon_1 + (1 - x_0) \varepsilon_2, \quad (2)$$

$$(G_{ef})_{11} = (G_{ef})_{22} = x_0 G_1 + (1 - x_0) G_2, \quad (3)$$

где $x_0 = d_1/D$, $D = d_1 + d_2$ – период сверхрешетки, d_1, d_2 – толщины компонентов сверхрешетки, $\varepsilon_{1,2} = \varepsilon'_{1,2} + i\varepsilon''_{1,2}$, $G_{1,2} = G'_{1,2} + iG''_{1,2}$ – комплексная диэлектрическая проницаемость и комплексный параметр магнитной гирации компонентов магнитоактивной сверхрешетки, соответственно. Причем действительная часть $G'_{1,2}$ определяет удельное вращение плоскости поляризации волны в компонентах структуры, а мнимая $G''_{1,2}$ – отвечает за магнитный циркулярный дихроизм в слоях d_1 и d_2 .

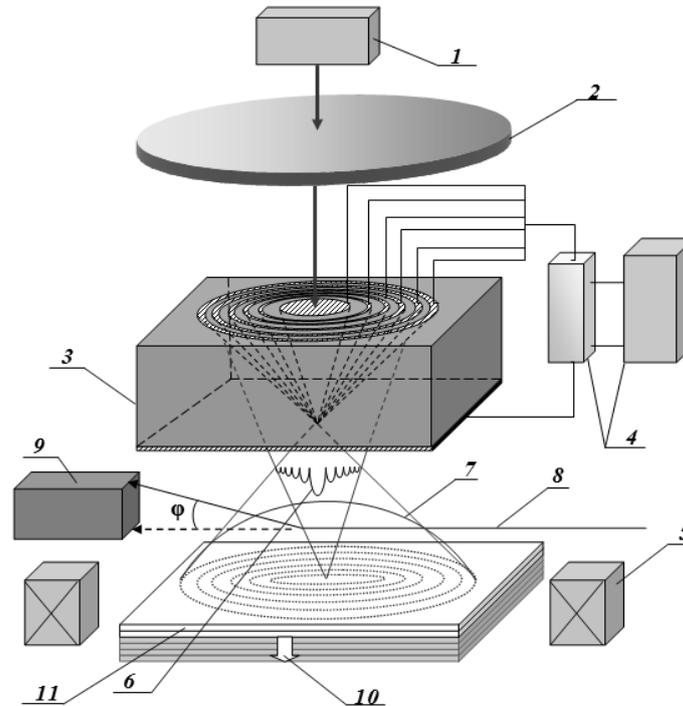


Рисунок 1 – Схема регистрации фотодефлекционного сигнала с помощью устройства управляемой термооптической генерации акустических волн: 1 – источник лазерного излучения; 2 – модулятор интенсивности излучения; 3 – оптический элемент; 4 – устройство управления оптическим элементом; 5 – катушка; 6 – бессель-гауссов световой пучок; 7 – «термическая» линза; 8 – зондирующий луч; 9 – позиционно-чувствительный фотодетектор; 10 – акустическая волна; 11 – сверхрешетка

В качестве возбуждающего световой пучок излучения будем использовать различные поляризационные моды БСП, обладающие рядом уникальных свойств [10] и широким практическим применением [11], [12].

Важной особенностью БСП является бездифракционность в определенной области пространства, возникновение радиального потока энергии, компенсирующего изменение поперечности светового пучка при экранировании его центральной зоны, а также способность высокой концентрации энергии вблизи оси светового пучка [13].

Для получения мод БСП воспользуемся устройством, содержащим оптический элемент формирования световых полей с заданным пространственным профилем распределением интенсивности. Как следует из рисунка 1, оптический элемент для формирования светового пучка с бесселевым распределением интенсивности выполнен в виде плоскопараллельной кристаллической пластины из электрооптического кристалла ниобата лития (LiNbO_3) с нанесенными на верхнюю грань концентрическими кольцами-электродами, а на нижнюю грань – прозрачным сплошным электродом. При подаче на электроды напряжения, вследствие возникновения линейного электрооптического эффекта Поккельса реализуется коническая линза-аксикон, преобразующая плоскую световую волну в пучок с бесселевым распределением интенсивности. Изменение угла конусности БСП достигается, как было предложено в [14], за счет создания зависимости показателя преломления электрооптического кристалла от радиальной координаты при выключении электрического поля. Область перестройки угла конусности можно изменять от нуля при $U = 0 \text{ V}$ до некоторого значения, определяемого пробой-

ным напряжением поля электродных промежутков либо кристалла. Например [15], для пучка света диаметром 5 мм данное оптическое устройство при управляющем напряжении $U = 10$ кВ эквивалентно аксикону с углом конусности $\alpha = 4.5^\circ$.

Пусть далее пучок с бesselевым распределением энергии модулировано поглощается двухслойной магнитоактивной сверхрешеткой. Будем считать, что векторы \mathbf{E} и \mathbf{B} пропорциональны $\exp[i(k_z z + m\varphi - \omega t)]$,

где $k_z = k_0 \sqrt{\varepsilon_{ef}} \cos \alpha$, $k_0 = \omega/c$, m – номер моды БСП, α – угол конусности. Основываясь на материальных уравнениях (1), с учетом (2) и уравнениях Максвелла

$$\text{rot } \mathbf{E} = ik_0 \mathbf{B},$$

$$\text{rot } \mathbf{H} = -ik_0 \mathbf{D},$$

получим выражение для скорости диссипации энергии ТЕ-моды БСП

$$Q^{TE} = \frac{\omega k_0^4 I_0}{8\pi} |V| \varepsilon_{ef} \left| \text{Re} \sqrt{\varepsilon_{ef}} \text{Im} \sqrt{\varepsilon_{ef}} \cdot \left(\frac{m^2}{\rho^2} J_m^2(q\rho) + J_m'^2(q\rho) \right) \exp(-2k_0' \sqrt{\varepsilon_{ef}} z) \right|,$$

где $V = \sqrt{\varepsilon_{ef}} / (k_0'^2 - [G_{ef}]^{-1} k_0^2)$, I_0 – интенсивность светового пучка, $q = k_0 \sqrt{\varepsilon_{ef}} \sin \alpha$, $k_0' = k_0 \cos \alpha = (\omega/c) \cos \alpha$, $J_m(q\rho)$ – функции Бесселя первого рода m -го порядка, $J_m'(q\rho)$ – производная по радиальной координате от функции Бесселя.

Воспользовавшись методом Грина для решения уравнения теплопроводности

$$\nabla^2 T - \frac{1}{\beta_S} \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{1}{2k_S} Q^{TE} e^{-\frac{2r^2}{w_0^2}} (1 + \cos \Omega t),$$

получим выражение для амплитуды фотодефлекционного сигнала от магнитоактивной сверхрешетки

$$\Phi(\rho, z, t) = \frac{4\sqrt{\pi}}{n_{ef}} \frac{dn_{ef}}{dT} Q^{TE} \int_0^t \frac{(\sin^2 \Omega t - 1)x}{[w_0^2 + 8\beta_S(t-\tau)]^{3/2}} e^{-\frac{x^2+y^2}{w_0^2+8\beta_S(t-\tau)}} e^{-\alpha_{ef}^2 \beta_S(t-\tau)} d\tau, \quad (3)$$

где $\beta_S = k_S / (\rho_0 C)$ – коэффициент температуропроводности, ρ_0 – плотность, C – удельная теплоемкость, $n_{ef} = \sqrt{\varepsilon_{ef}}$ – эффективный показатель преломления сверхрешетки, Ω – частота модуляции БСП, w_0 – перетяжка пучка, $r^2 = x^2 + y^2$, $\alpha_{ef} = 2k_0' \sqrt{x\varepsilon_1'' + (1-x)\varepsilon_2''}$.

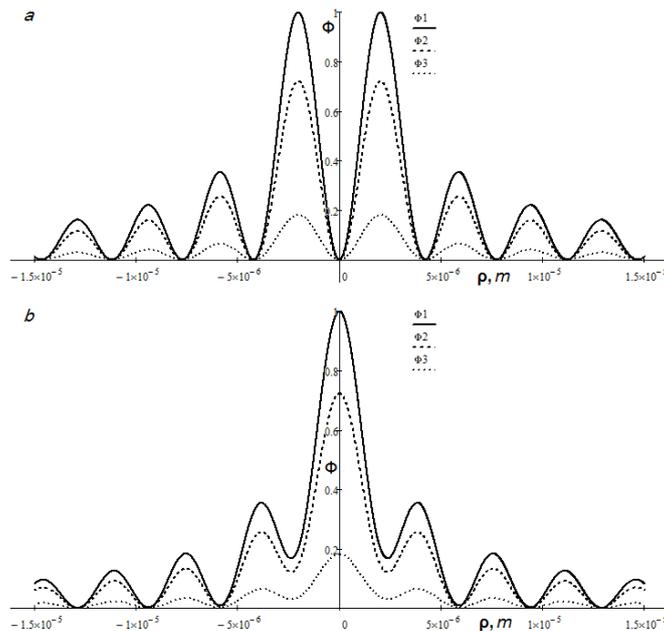


Рисунок 2 – Зависимость угла фотодефлекции от радиальной координаты ρ для ТЕ-мод БСП и разных значений времени $t_1=0.1$ с, $t_2=0.15$ с, $t_3=0.2$ с для магнитоактивной сверхрешетки (a – $m = 0$; b – $m = 0$)

Как следует из выражения (3), величина амплитудного значения фотодефлекционного отклика магнитоактивного образца сложным образом зависит от диссипативных, геометрических и теплофизических параметров сверхрешетки, а также энергетических, временных и поляризационных свойств квазибездифракционных световых пучков.

Воспользуемся численным интегрированием выражения амплитуды фотодефлекционного сигнала для проведения графического анализа.

Распределение фотодефлекционного сигнала в зависимости от радиальной координаты ρ показано на рисунке 2. Особенностью поведения функции $\Phi(\rho)$ нулевого и первого порядка является их антифазный характер. Причем, первый минимум для $\Phi(\rho)$ первого порядка (в отличие от $\Phi(\rho)$ нулевого порядка) не является нулевым. Это связано с тем, что в случае распространения тепловых потоков Q^{TE} происходит расширение приосевой зоны поглощаемой теплоты $Q^{TE}(\rho)$ для $m = 1$ [13].

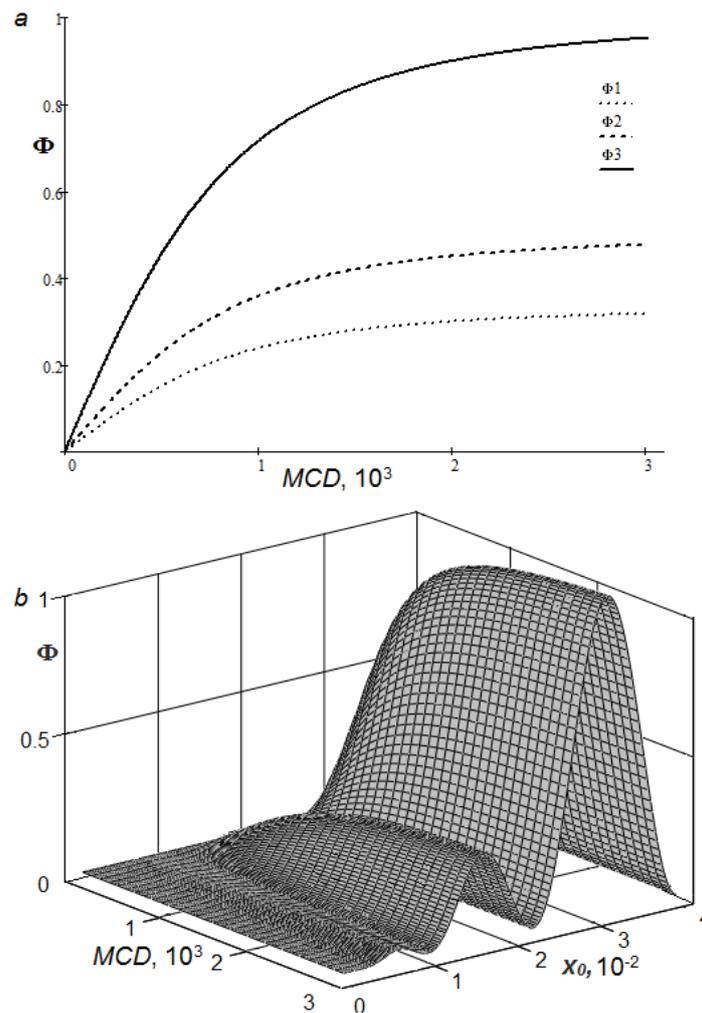


Рисунок 3 – Зависимость амплитуды фотодефлекционного отклика от магнитного циркулярного дихроизма для разных значений времени облучения: $t_1=0.1$ s, $t_2=0.15$ s, $t_3=0.2$ s; б – Зависимость амплитуды фотодефлекционного отклика от магнитного циркулярного дихроизма и параметра x_0

Воздействие внешнего магнитного поля на исследуемый образец приводит к изменению величины магнитного циркулярного дихроизма (MCD). Амплитуда фотодефлекционного отклика, как следует из рисунка 3, весьма существенно зависит от значения MCD в различные промежутки времени облучения сверхрешетки и при значениях напряженности внешнего магнитного поля более 10^3 Э стремится в область насыщения. Следует отметить, что параметр относительной толщины сверхрешетки $x_0 = d_1/D$ оказывает осциллирующее влияние на величину угла фотодефлекции, что сказывается с проявлением модулирующего воздействия функций Бесселя на распределение диссипации энергии БСП в зависимости от ρ и x_0 .

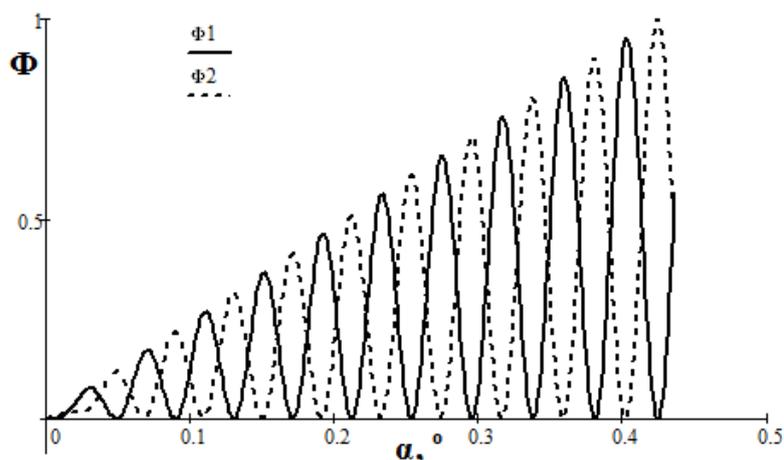


Рисунок 4 – Зависимость амплитуды фотодефлекционного отклика от угла конусности α для TE-моды бesselового светового пучка нулевого (Φ_1) и первого (Φ_2) порядков с для магнитоактивной сверхрешетки

Как показано на рисунке 4, угол конусности аксикона α , ответственный за формирование пространственной структуры бesselового светового пучка, существенно влияет на амплитуду фотодефлекционного отклика. Зависимости амплитуды фотодефлекционного сигнала от конусности $\Phi(\alpha)$ для нулевой и первой TE-мод квазибездифракционного излучения находятся в противофазе. Как следует из рисунка 4, изменение угла конусности аксикона дает возможность эффективного управления величиной фотодефлекционного отклика.

Таким образом, в работе исследована термооптическая генерация звука бesselовыми световыми пучками в поглощающих магнитоактивных сверхрешетках. Выявлены особенности механизма формирования поляризационных мод квазибездифракционных световых пучков, используя аксикон с управляемым углом конусности. На основе метода лазерной фотодефлекционной спектроскопии показана возможность неинвазивного исследования важных диссипативных характеристик магнитоактивного образца, например, таких как магнитный циркулярный дихроизм, воздействуя на вынужденно гиротропную сверхрешетку различными поляризационными модами бesselовых пучков с изменяемым углом конусности.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, грант №Ф14-047.

Литература

1. Исследование оптических свойств сверхрешеток InAs/InGaAsN/GaAsN с компенсацией напряжений / В.В. Мамутин [и др.] // Письма ЖТФ. – 2007. – Т. 33, № 9. – С. 53–59.
2. Photothermal deflection spectroscopy and detection / W.B Jackson [et al.] // *App. Opt.* – 1981. – Vol. 20, № 8. – P. 1333–1344.
3. Gallais, L. Photothermal deflection in multilayer coatings: modeling and experiment / L. Gallais, M. Commandre // *Appl. Opt.* – 1995. – Vol. 34, № 33. – P. 7670–7673.
4. Федоров, Ф.И. Теория гиротропии / Ф.И. Федоров. – Минск : Наука и техника, 1976. – 456 с.
5. Жаров, В.П. Лазерная оптико-акустическая спектроскопия / В.П. Жаров, В.С. Летохов – М. : Наука, 1984. – 320 с.
6. Mandelis, A. Frequency Modulated Impulse Response Photothermal Detection Through Optical Reflectance I: Theory / A. Mandelis, J.F. Power // *Appl. Opt.* – 1988. – Vol. 27, № 16. – 3397–3407.
7. Астахов, П.В. Фотодефлекционный отклик гиротропно-изотропного образца в условиях туннельной электромагнитной интерференции / П.В. Астахов, Г.С. Митюрин // Письма в ЖТФ. – 1998. – Т. 24, № 15. – С. 85–90.
8. Семченко, И.В. Гиротропные свойства сверхрешеток в длинноволновом приближении / И.В. Семченко // *Кристаллография.* – 1990. – Т. 35, № 5. – С. 1047–1050.

9. Гайшун, В.Е. Гиротропные свойства сверхрешеток с магнитной структурой в длинноволновом приближении / В.Е. Гайшун, И.В. Семченко, А.Н. Сердюков // Кристаллография. – 1993. – Т. 38, № 3. – С. 24–27.
10. Пятницкий, Л.Н. Волновые бесселевы пучки / Л.Н. Пятницкий. – М. : Физматлит, 2012. – 407 с.
11. Durmin, J. Exact solution for nondiffraction beams / J. Durmin // JOSA. – 1987. – Vol. 4, № 4. – P. 651–654.
12. Bessel-like beams with z-dependent cone angles / V.N. Belyi [et al] // Optics express. – 2010. – Vol. 18, № 3. – P. 1966–1973.
13. Belyi, V.N. Generation of TE- and TH-polarized Bessel beams using one-dimensional photonic crystal / V.N. Belyi, N.S. Kazak, S.N. Kurilkina, N.A. Khilo // Optics Communications. – 2009. – Vol. 282, № 10. – P. 1998–2008.
14. Лепарский, В.Е. Электроскопические конические линзы для формирования бесселевых световых пучков / В.Е. Лепарский, А.Г. Машенко // Известия ГГУ им. Ф. Скорины. – 2001. – № 6 (9). – С. 8–12.
15. Способ формирования перестраиваемого бесселева светового пучка: пат. 7243 Респ. Беларусь, МПК G 02B 27/30, 27/09, G 02F 1/03 / А.Г. Машенко, В.Е. Лепарский, А.А. Рыжевич; заявитель Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси. – № а 20020364 ; заявл. 30.04.02; опубл. 30.09.05 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2005. – № 3 (46).– Ч. 1– С. 214.

¹Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины

²Институт физики НАН Беларуси

Поступила в редакцию 14.09.2015

Кинетика граничного смазочного слоя и изнашивание поверхности металлов при фрикционном нагружении

В.Г. Пинчук¹, С.В. Короткевич², Е.А. Ковалев¹

Экспериментально установлен циклический характер изменения контактного сопротивления, напрямую связанного с физико-химическими процессами граничного смазочного слоя при фрикционном нагружении металлов (никель, молибден). Осцилляционная зависимость контактного сопротивления униполярно связана с интенсивностью изнашивания. В работе обсуждаются процессы взаимосвязи дислокационной структуры поверхностного слоя с физико-химическими процессами в смазочной среде.

Ключевые слова: смазочная среда, кинетика, изнашивание, нагружение.

The cyclical nature of contact resistance is directly related to the physical and chemical processes in the boundary layer of lubricating frictional loading of metals (nickel, molybdenum) is experimentally defined. Oscillatory dependence of the contact resistance is unipolarly related to the intensity of wear. This article discusses the process the relationship of the dislocation structure of the surface layer with of physical and chemical processes in lubricating media.

Keywords: lubricating media, kinetics, wear, loading.

Введение. В процессах граничного трения в присутствии смазочных сред в фрикционном контакте протекают множество физико-химических процессов, связанных с формированием и дальнейшим функционированием граничного смазочного слоя (ГСС).

Изнашивание материалов определяется толщиной ГСС, который эффективно разделяет сопряжённые поверхности и локализует за счёт своих высоких антифрикционных свойств поле сдвиговых напряжений в тонком поверхностном слое. В зависимости от класса шероховатости поверхности и состояния ГСС, флуктуации регистрируемого контактного сопротивления могут достигать значительной величины (сотни кОм). Существенный вклад ГСС в разделение сопряжённых поверхностей вносит именно его нижняя граница, так как именно она определяет толщину смазочного слоя на пятнах фактического контакта. Поэтому при проведении экспериментов регистрировали нижнюю границу напряжения и по ней определяли величину контактного сопротивления и толщину ГСС. Методика эксперимента основывалась на моделях поверхности раздела, которые могут иметь место с учётом наличия на поверхности металлов оксидных плёнок [1].

Согласно основным положений методов электрофизического зондирования, применяемых для оценки противоизносных и противозадирных свойств смазочных материалов, состояние и смазывающие свойства ГСС напрямую определяются отношением регистрируемого контактного сопротивления (R_c) к сопротивлению исходной поверхности ($R_{ок}$) [1].

Известно, что значение контактного сопротивления (R_c) определяется площадью фактического контакта и толщиной ГСС. Можно предположить, что при упрочнении поверхности, площадь на пятнах фактического контакта должна снижаться и контактное сопротивление должно увеличиваться, а при разрушении поверхности площадь фактического контакта должна увеличиваться, и, как следствие, контактное сопротивление должно снижаться. С целью подтверждения этой концепции и определения чувствительности метода электрофизического зондирования к структурным преобразованиям поверхностного слоя металлов, необходимо провести исследование кинетики контактного сопротивления и интенсивности изнашивания поверхностного слоя металла. Кроме того, является открытым вопрос об установлении влияния аккумуляции энергии в подповерхностном слое металла, связанного с дислокационным механизмом упрочнения и кинетикой ГСС.

Целью работы является установление влияния дислокационного механизма упрочнения подповерхностного слоя металла при трении на качество связи, триботехнические свойства граничного смазочного слоя и характер изнашивания.

Методика эксперимента. Испытание на трение проводили по схеме палец (Ni)-диск (Mo) с использованием машины трения АЕ-5 при нагрузке 170 кПа и линейной скорости $\approx 0,4$ м/с.

Объектом исследования являлся пластичный смазочный материал ЦИАТИМ-201. Испытания на трение проводились с периодическим внесением смазочной среды на молибденовый диск через 60 с и в режиме установившегося смазывания.

Измерение падения напряжения и соответствующий ему расчёт значений контактного сопротивления R_c осуществлялись с использованием четырёхпроводной электрической схемы [2]. Метод электрофизического зондирования позволяет оценивать нанометровую толщину ГСС по величине туннельного сопротивления непосредственно на пятнах фактического контакта [2]. Погрешность измерения значений контактного сопротивления составляла $\approx 3\%$.

Необходимо отметить, что в каждой точке измерения регистрировалось минимальное и максимальное значение контактного сопротивления. Материал пары трения никель-молибден подбирался с учётом того, что изнашивался более мягкий материал – Ni, кинетику которого мы и исследовали. Класс шероховатости поверхности Ni, изготовленного из цельного куска металла, составлял ≈ 10 –11 класс.

Методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) определялась величина изнашивания [3]. Пробы пластичного смазочного материала ЦИАТИМ-201 брались с молибденового диска с периодичностью через 600 оборотов или 480 с.

Результаты и обсуждения. Экспериментально установлена осцилляционная зависимость контактного сопротивления от времени (рисунок 1).

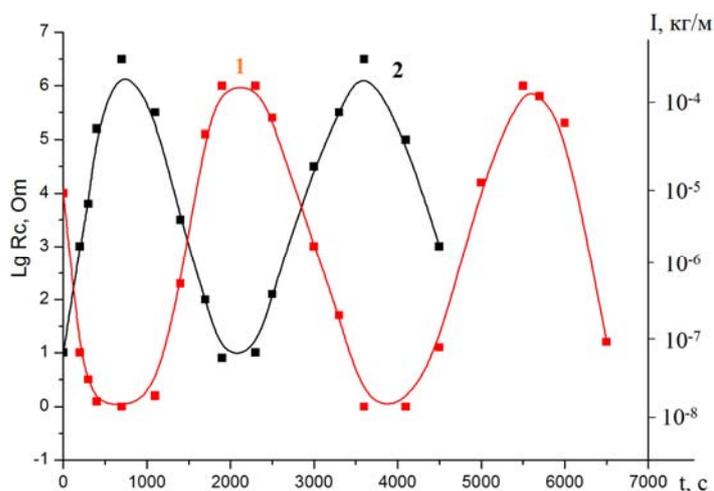


Рисунок – 1 Зависимость контактного сопротивления R_c (кривая 1) и интенсивности изнашивания I (кривая 2) от времени трения t , с.

Толщина ГСС определяется величиной контактного сопротивления и составляет ≈ 1 нм. Амплитуда значений этих параметров изменяется от 700 до 4400 Ом и составляет 3700 Ом. Верхняя граница регистрации контактного сопротивления составляет 6 МОм, что соответствует толщине сформированного ГСС $\approx 2,1$ нм [2]. Физическую сущность осцилляционного изменения контактного сопротивления необходимо рассматривать во взаимосвязи структурных изменений поверхностных слоев металлов и смазочной среды при фрикционном нагружении ввиду наличия их обоюдного влияния [4]–[6]. Воздействие смазочной среды может проявиться по двум направлениям: 1) растворением части поверхностного материала, сопровождающееся удалением части поверхностных дефектов; 2) адсорбционным облегчением пластической деформации и снижения прочности поверхностного слоя согласно эффекта П.А. Ребиндера. Влияние органических поверхностно активных веществ (ПАВ) на прочность обусловлено облегчением выхода дислокаций на поверхность ввиду понижения поверхностного натяжения [7]. В этом случае снижается скопление дислокаций в поверхностном слое и облегчается процесс транспорта их от внутренних источников, что приводит к уменьшению предела текучести и повышению пластичности материала у поверхности. Адсорбция полярных молекул ПАВ устраняет упрочняющее действие окисных пленок в поверхностном слое металла [8].

При фрикционном нагружении металла в присутствии смазочных сред на поверхности протекает множество физико-химических процессов, из которых нельзя исключить химического взаимодействия с поверхностью и образование хрупких окисных пленок. Этот процесс стимулируется дополнительно тем, что упругое поле вокруг поверхностной дислокации обладает повышенным химическим потенциалом. Необходимо отметить наиболее значимые механизмы разрушения, связанные с окислением поверхности.

1. Окисление является одним из важных факторов трещинообразования в приповерхностном слое, особенно в интрузиях активных полос скольжения [9]. В этом случае окисные пленки на поверхности интрузий являются эффективными барьерами для движущихся дислокаций, скопления которых формируют микротрещины по модели Зинера-Стро [10], соединяющиеся со слабыми местами интрузий, вероятнее всего у их вершин, где коэффициент концентрации напряжений наиболее высок и достигает нескольких десятков (~ 50). Этот параметр зависит от радиуса закругления острия интрузии и подповерхностной трещины. Согласно нашим исследованиям [11], значение скалывающих напряжений составляет $\sim 10^9$ Па, что сопоставимо с теоретической прочностью никеля, и разрушение может происходить сколом разделяющего материала.

2. Действие усталостных нагрузок при трении и неконсервативного восхождения дислокаций в соседние плоскости скольжения с возвратно-поступательным их движением при циклических нагрузках, возможно образование нарушений сплошности типа скрытых трещин у вершин интрузий [9]. Эту микротрещину авторы наблюдали при электронномикроскопических исследованиях фрикционно нагруженного никеля (рисунок 2 – стрелка).

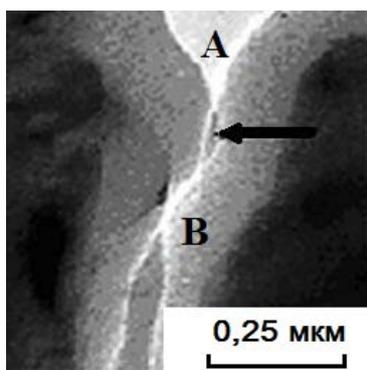


Рисунок – 2 Объединение внутренней трещины с интрузией

Такую эллипсоидальную полость, соединяющуюся затем с вершиной интрузии (А) и вершиной подповерхностной трещины (В), можно рассматривать как посредника, реализующего облегченный механизм продолжения интрузии в глубину поверхностного слоя.

3. При фрикционном нагружении поверхностей возможен третий механизм разрушения поверхностного слоя, связанный с внутренним окислением в присутствии смазочной среды. Возвратно-поступательное движение дислокаций у поверхности, обусловленное нагрузочно-скоростным фрикционным модулированием силового поля материала в силу различной высоты и разнообразия геометрических форм неровностей трущихся поверхностей, вызывает периодическое появление и исчезновение поверхностных ступенек. Это подтверждается при анализе электронномикроскопических снимков фрикционно нагруженного никеля. В поверхностном слое обнаруживается повышенная плотность мелких дислокационных петель, которые образуются в результате возвратно-поступательного перемещения винтовых дислокаций, имеющих пороги и образующие ступени скола [6]. Адсорбция поверхностно-активных составляющих смазочной среды, кислорода и водорода на ювенильной поверхности свежесформированных ступенек после механо- и термодеструкции смазки и движение этой поверхности внутрь поверхностного слоя приводят к затягиванию адсорбированных атомов и молекул по плоскости скольжения. В результате протекания этого процесса в поверхностном слое по активным полосам скольжения появляется склонность к охрупчиванию и самопроизвольному диспергированию в силу снижения свободной поверхностной энергии, образования внутренних окисных слоев и появления водородной хрупкости. Согласно [9] глущи-

на проникновения атомов кислорода внутрь активных полос скольжения, при знакопеременном нагружении составляет 100 нм, что сопоставимо с толщиной фрикционно деформируемого поверхностного слоя. Образующиеся окисные пленки являются эффективными препятствиями движущимся дислокациям в этом поверхностном слое, способствуя формированию плоских и объемных скоплений линейных дефектов, являющихся источниками трещинообразования. В результате действия перечисленных механизмов диспергирования материала в поверхностном слое, по активным полосам скольжения, формируются внутренние очаги разрыхления и расклинивания кристаллической решетки, стимулирующие склонность ее к охрупчиванию (рисунок 3).

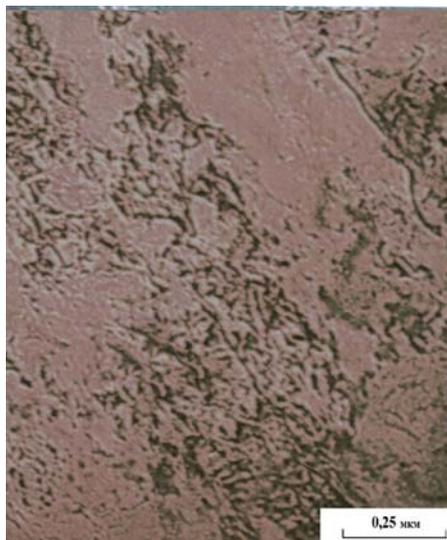


Рисунок – 3 Диспергирование и разрыхление поверхностного слоя

Конечным результатом влияния активной среды на прочностные свойства поверхностных слоев фрикционно нагруженных металлов, в плане их разрушения, сводится к снижению свободной поверхностной энергии, образованию окисных пленок и реализации водородной хрупкости.

Взаимосвязь структурных изменений в смазочной среде, прочностных и триботехнических параметров поверхностных слоев фрикционно нагруженного никеля проявляется при сопоставлении результатов исследования кинетики параметров ГСС, плотности дислокаций и интенсивности изнашивания никеля.

На рисунке 1 приведена зависимость изменения контактного сопротивления (R_c), кривая 1, и интенсивности изнашивания (I), кривая 2, от времени трения t . Анализ этих зависимостей утверждает закономерность соответствия каждому минимуму $R_c = f(t)$ циклически повторяющегося максимума интенсивности изнашивания. Наблюдаемую зависимость можно объяснить локализацией во времени процесса образования продуктов изнашивания и регуляции этого явления субструктурными и физико-химическими процессами фрикционного контактирования поверхностей. Для более полного объяснения наблюдаемой зависимости необходимо привлечь ранее полученные данные микроструктурных исследований поверхностного слоя никеля при трении. В ряде работ, в том числе [12], [13] изучены временные изменения дислокационной структуры поверхностного слоя и установлен их циклический характер. Электронномикроскопические исследования плотности дислокаций и характера их распределения в поверхностных слоях при трении подтвердили эту закономерность [12], [14]. Анализ результатов [13], [14] подтверждает закономерность соответствия минимуму плотности дислокаций циклически повторяющегося максимума интенсивности изнашивания. Эти данные свидетельствуют о локализации во времени процесса образования продуктов изнашивания и регуляции этого процесса субструктурными изменениями поверхностных слоев.

Сопоставление результатов изменения контактного сопротивления, напрямую связанных с кинетикой процессов ГСС, кинетикой дислокационной структуры и интенсивностью изнашивания, представляется возможным определить некоторые характерные закономерности их взаимовлияния.

Аккумуляция упругой энергии в подповерхностном слое никеля приводит к увеличению химического потенциала на поверхности, что обуславливает формирование прочно связанного с поверхностью граничного смазочного слоя, который эффективно разделяет сопряженные поверхности. Можно предположить, что за счёт установления ковалентной связи поверхностно-активных молекул пластичного смазочного материала ЦИАТИМ-201 с атомами поверхностного слоя никеля происходит формирование хемосорбированного слоя. В результате вышеописанного процесса сформировавшийся слой эффективно разделяет сопряженные поверхности на пятнах фактического контакта, что приводит к снижению изнашивания. Снижение контактного сопротивления свидетельствует о разрушении ГСС и появлению частиц изнашивания в контактной зоне. В результате вышеописанного процесса имеет место увеличение изнашивания ввиду разрушения тонкого поверхностного слоя составляет $\approx 0,1$ мкм.

Окислительные процессы весьма эффективно происходят в местах локализации упругих напряжений. Причиной этого процесса является повышенный химический потенциал напряженных областей, особенно в местах подповерхностных скоплений дислокаций. Важным может оказаться адсорбционный механизм, который ослабляет связи атомов в твердом теле в местах упругих напряжений, обусловленных выходом дислокаций на поверхность [15].

Кроме того, необходимо отметить влияние диффузии атомов смазочного материала вдоль дислокационной линии при выходе дислокации на поверхность. Атомы водорода, углерода и поверхностно-активных веществ (сера, фосфор, хлор и т. д.) захватываются дислокациями. В результате вышеописанного процесса формируется прочно связанный с поверхностью металла хемосорбированный слой [16]. Данный слой обладает высокой несущей способностью и антифрикционными свойствами, и эффективно разделяет сопряженные поверхности. Величина силы адгезии материалов обратно пропорциональна кубу расстояния [17]. Можно ожидать, что разрушение путём изнашивания при этом значительно снижается, что и подтверждается экспериментальными результатами.

Заключение. Таким образом, интенсивность изнашивания определяется качеством связи молекул смазочного материала с поверхностью. Доминирует фазовый переход от физической адсорбции к хемосорбции и обуславливает несущую способность и триботехнические свойства сформировавшегося слоя [1]. Установленный экспериментальный факт свидетельствует о неразрывной связи свойств подповерхностных слоёв со свойствами ГСС.

Литература

1. Пинчук, В.Г. Разработка методик для неразрушающего контроля трибосопряжения при граничном трении / В.Г. Пинчук, Е.А. Ковалёв, С.В. Короткевич // Известия ГГУ им. Ф. Скорины. – 2013. – № 6 (81). – С. 196–202.
2. Короткевич, С.В. Износостойкость металлов при граничном трении / С.В. Короткевич, В.Г. Пинчук, С.О. Бобович. – Гомель : УО ГГУ им. Ф. Скорины, 2011. – 237 с.
3. Пинчук, В.Г. Способ определения износа материалов при трении со смазкой / В.Г. Пинчук, Р.Г. Пинчук, В.В. Харитонов, Е.М. Шишкин // А.С. № 1000845 СССР МКЛ 01 №3/56. – 1982. – Бюл. № 8.
4. Пинчук, В.Г. Исследование дислокационной структуры ферромагнетиков методом ферромагнитного резонанса / В.Г. Пинчук, С.В. Короткевич, С.О. Бобович, Ю.М. Плещачевский // Приборы, инструменты, материалы. – 2010. – Т. 15, № 4. – С. 108–112.
5. Короткевич, С.В. Анализ состояния поверхности раздела подшипников качения для определения режимов их работы / С.В. Короткевич // Материаловедение. – 2013. – № 8. – С. 14–24.
6. Пинчук, В.Г. Эволюция субмикро и наноструктуры в поверхностном слое никеля при фрикционном нагружении / В.Г. Пинчук, С.В. Короткевич, Д.Н. Гаркунов // Материаловедение. – 2013. – № 6. – С. 39–44.
7. Гарбер, Р.И. Физика прочности твердых тел / Р.И. Гарбер, Н.А. Гиндин // Успехи физических наук. – 1960. – Т. LXX, вып. 1, – С. 57–110.
8. Шоршоров, М.Х., Влияние среды и состояния поверхности на процесс пластической деформации кристаллов / М.Х. Шоршоров, В.П. Алехин // Физика и химия обраб. материалов. – 1976. – № 1. – 138 с.
9. Фуджита, Ф.Е. Разрушение твердых тел / Ф.Е. Фуджита – М. : Металлургия, 1967. – 450 с.
10. Stroh, A.N. The formation of cracks in plastic flow / A.N. Stroh // proc. Royal Society. – 1955. – Vol. 232 A, № 1191. – P. 404–414.

11. Пинчук, В.Г. Кинетика упрочнения и разрушения поверхности металлов при трении / В.Г. Пинчук, С.В. Короткевич // LAP Lambert Academic Publishing. – Saarbrücken : LAP, 2014. – 180 с.
12. Пинчук, В.Г. Кинетика упрочнения поверхностного слоя металла при трении / В.Г. Пинчук // Трение и износ – 1989. – Т. 10, № 3. – С. 401–405.
13. Пинчук, В.Г. Взаимосвязь микроструктурных изменений с кинетикой износа поверхностного слоя металла при трении / В.Г. Пинчук, Е.Г. Шидловская // Трение и износ – 1989. – Т. 10, № 6. – С. 965–972.
14. Пинчук, В.Г. Особенности изменения дислокационной структуры никеля при трении / В.Г. Пинчук, Б.А. Савицкий, А.С. Булатов // Поверхность. Физика, химия, механика – 1983. – № 9. – С. 72–75.
15. Пинчук, В.Г. Микроструктурные критерии разрушения при взаимодействии поверхности металлов и смазочной среды при трении / В.Г. Пинчук, Е.А. Ковалёв, С.В. Короткевич // Известия ГГУ им. Ф. Скорины. – 2014. – № 6 (87). – С. 211–215.
16. Санин, П.И. Химические аспекты граничной смазки / П.И. Санин // Трение и износ. – 1980. – № 1. – С. 45–57.
17. Дерягин, Б.В. Адгезия твёрдых тел / Б.В. Дерягин, Н.А. Кротова, В.П. Смилга. – М. : Наука, 1973. – 277 с.

¹Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины

²РУП «Гомельэнерго»

Поступила в редакцию 13.10.2015

Формирование электрохимических покрытий в импульсном режиме электролиза с использованием лазерной активации

А.А. Хмыль¹, А.Н. Купо²

Приведены результаты экспериментального исследования электрохимического осаждения покрытий с использованием импульсного тока в условиях лазерной активации процесса. Определены скорости осаждения серебра и меди в диапазоне плотностей мощности $W = (1,0 \div 5,0) 10^{10}$ Вт/м² активирующего лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм. Установлено снижение микротвёрдости и контактного сопротивления покрытий, осаждённых с использованием активирующего лазерного излучения. Показано, что наложение активирующего воздействия на процесс импульсного электролиза не только увеличивает в $8 \div 10$ раз скорость формирования локальных структур, но и улучшает эксплуатационные свойства наносимых покрытий.

Ключевые слова: электрохимические покрытия, лазерная активация, импульсный ток.

The results of experimental studies of electrochemical deposition of coatings using a pulsed current in a laser activation process are given. The rates of deposition of silver and copper in the range of power densities $W = (1,0 \div 5,0) 10^{10}$ W/m² activating the laser radiation with a wavelength $\lambda = 1,06$ mkm are determined. Reduction in microhardness and contact resistance coatings, besieged with laser activating is defined. It is shown that the application of an activating effect on pulsed electrolysis process does not only increase $8 \div 10$ times the speed of formation of local structures, but also improves the performance of properties of the coating.

Keywords: electrochemical coating, laser activation, pulse current.

Введение. В настоящее время продолжают активные научные исследования процессов электрохимического осаждения в условиях нестационарного электролиза. Как указано в работах [1]–[5], использование импульсного катодного тока позволяет увеличить в $1,2 \div 1,5$ раза скорость роста гальванического покрытия, за счёт снятия диффузионных ограничений, без потери, а то и с улучшением его полезных свойств. Кроме того, применение метода импульсного электролиза позволяет сделать электрохимический процесс более управляемым [1]. Но при этом в указанных работах не рассмотрены другие способы активации электрохимических процессов, такие как нагрев и перемешивание электролита, введение в гальваническую ванну ультразвуковых колебаний, активация процессов рентгеновским и лазерным излучением. Поэтому представляется интересным использовать в катодных электрохимических реакциях комбинированный метод, сочетающий импульсный режим электролиза и лазерное излучение [6], [7].

Оборудование и эксперимент. Для формирования токопроводящих структур электрохимическим методом при воздействии лазерного излучения использовался специальный программно-управляемый источник импульсного тока (напряжения) сопряжённый с источником импульсного лазерного излучения. Его структурная схема приведена на рисунке 1. Источник состоит из следующих узлов и блоков: 1 – входное устройство; 2 – фильтр электромагнитной совместимости; 3 и 4 – источники питания положительной и отрицательной полярности; 5 – силовой формирователь последовательности импульсов выходного тока (напряжения) по программе; 6 – микропроцессорный узел управления; 7 – измерительное устройство; 8 – персональный компьютер; 9 – блок синхронизации с импульсами источника лазерного излучения; 10 – узел гальванической развязки по цепям управления; 11 – узел синхронизации окончания технологического цикла, 12 – блок питания лазера, 13 – импульсный лазер, 14 – электрохимическая ячейка.

Программно-управляемый источник импульсного тока питается от сети однофазного переменного тока и обеспечивает следующие характеристики: выходное напряжение (в режиме ПСТ) – прямоугольные импульсы напряжения с амплитудой, регулируемой в пределах от минус 12 В до плюс 12 В, выходной ток (в режиме ГСТ) – прямоугольные импульсы тока с амплитудой, регулируемой в пределах от минус 3 А до плюс 3 А.

Управление режимами источника питания производится от компьютера через порт USB с возможностью программирования амплитудно-частотной характеристики выходного сигнала.

Используемая лазерная установка «Квант-12» характеризуется следующими параметрами: режим работы – импульсно-периодический; энергия лазерного излучения в импульсе – 12 Дж; длительность импульса – $(1 \div 4) \cdot 10^{-3}$ с; частота следования импульсов – $(1 \div 60)$ Гц.

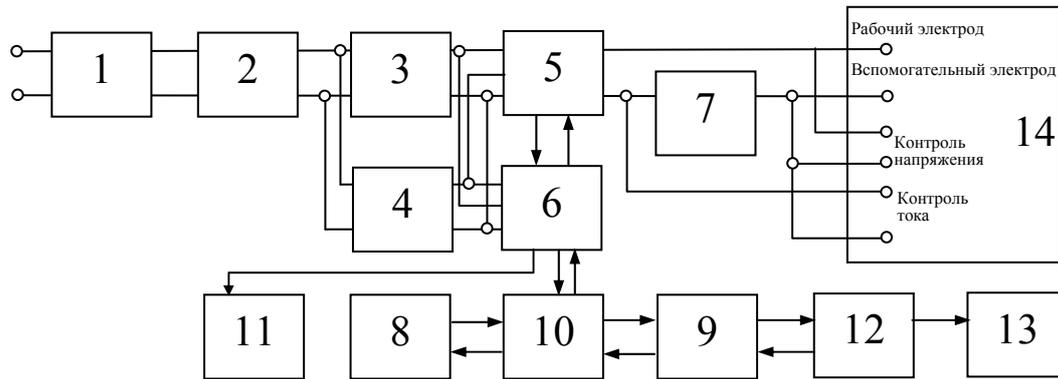


Рисунок 1 – Структурная схема импульсного источника тока

Анализ полученных результатов и их обсуждение. Исследования скорости роста электрохимического осадка серебра из железосинеродистого электролита на медные подложки проводились в трёх различных режимах электролиза при толщине слоя электролита 20 мм:

- 1) стационарный (плотность постоянного тока $i_k = (0,1 \div 0,5)$ А/дм²);
- 2) импульсный (частота следования импульсов $f = 10$ Гц, скважность импульсов составляла $n = 10$ ($\tau_{и} = 10$ мс, $\tau_{п} = 90$ мс) амплитудное значение плотности тока $i_k = (1,0 \div 5,0)$ А/дм²);

3) комбинированный (импульсный режим тока при активирующем действии лазерного излучения (плотность мощности $W = (1,0 \div 5,0) \cdot 10^{10}$ Вт/м², $\lambda = 1,06$ мкм).

На рисунке 2 представлена зависимость высоты локального осадка серебра в указанных режимах от времени осаждения.

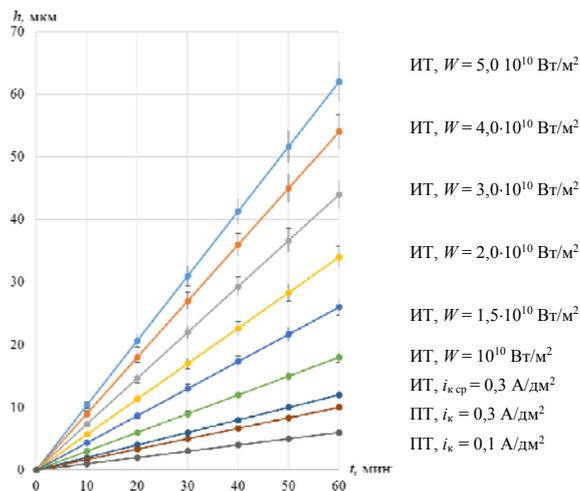


Рисунок 2 – Зависимость высоты осадка серебра от времени осаждения для различных режимов электролиза

Анализ полученных зависимостей показывает, что скорость осаждения покрытия при плотности постоянного тока $i_k = 0,1$ А/дм² составляет при катодном выходе по току равном 100 % 4,1 мкм/час. Увеличение плотности тока до 0,3 А/дм² приводит к увеличению скорости осаждения до 10,5 мкм/час, так как катодный выход металла по току снижается до 90 %, а покрытие получается со сниженной отражательной способностью. Это происходит вследствие того, что при этой плотности тока начинается параллельный процесс на катоде – выде-

ление водорода, который, естественно, приводит к дефициту ионов металла в прикатодном слое. На импульсном токе при той же средней плотности тока $i_{к\text{ ср}} = 0,3 \text{ А/дм}^2$ покрытия получают мелкокристаллическими с плотноупакованной структурой и блестящей поверхностью. При этом катодный выход по току увеличивается до 100 %, так как во время паузы происходит интенсивный процесс диффузии ионов металла из объёма электролита к поверхности катода. Это позволяет поднять рабочую плотность тока и увеличить скорость осаждения серебра до $12 \div 14 \text{ мкм/час}$. Действие лазерного излучения в паузах между импульсами (частоты генерации лазера и импульсов тока согласованы) приводит к разогреву границы раздела «катод-электролит», что, в свою очередь, приводит к микроперемешиванию и ещё в большей степени активизирует процесс транспортировки заряженных частиц к катоду. Процесс лазерной активации происходит на очень ограниченном локальном участке поверхности катода диаметром 0,2 мм. Вследствие этого происходит перераспределение средней плотности тока на катоде и на облучённом участке она может быть увеличена в $5 \div 10$ раз. Кроме того, повышение температуры подложки в процессе осаждения приводит к уменьшению поверхностной плотности микродефектов в осадке, что обеспечивает улучшение его эксплуатационных характеристик.

Аналогичные исследования проведены в сернокислом электролите меднения при изменении плотности постоянного i_k и средней плотности импульсного тока $i_{к\text{ ср}}$ в диапазоне $(1 \div 3) \text{ А/дм}^2$, длительности импульса и длительности паузы в соотношении 40:60 мс. Закономерности, установленные при исследовании процесса серебрения сохраняются и при активации лазерным излучением сернокислого электролита меднения. При этом скорость осаждения медных покрытий при одновременном воздействии импульсного тока и импульсов ЛИ может быть доведена до $100 \div 120 \text{ мкм/час}$. Оптимальное значение интенсивности лазерного ЛИ для получения качественных локальных структур с высокой скоростью осаждения составляет величину $(2 \div 3) \times 10^{10} \text{ Вт/м}^2$.

Микромеханические свойства. Определена микротвёрдость покрытий из серебра, полученных методом электрохимического осаждения при разных условиях. Варьировались плотность мощности лазерного излучения, время осаждения, режим электролиза (стационарный и импульсный).

Обобщение экспериментального материала показывает, что микротвёрдость гальванических покрытий серебра превышает аналогичный показатель для поверхностей, сформированных литьем или прокаткой, в 2–3 раза, что объясняется уменьшением размеров зёрен и высокими внутренними механическими напряжениями. Кроме того, в данной работе было показано, что увеличение микротвёрдости можно связать и с укрупнением микрозёрен, однако при этом должно наблюдаться и уменьшение межзёренных провалов. Последний эффект характерен для локальных осадков металлов, сформированных при активации процесса электролиза лазерным излучением.

Значения микротвёрдости серебряных покрытий, полученных осаждением из железосинеродистого электролита серебрения при активации процесса лазерным излучением, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения микротвёрдости H серебряных осадков, сформированных при активации осаждения лазерным излучением разной плотности мощности W

$W, \text{ Вт/м}^2$		0	1×10^{10}	2×10^{10}	3×10^{10}	4×10^{10}	5×10^{10}
ПТ	$H, \text{ МПа}$	700 ± 20	780 ± 20	710 ± 20	650 ± 20	620 ± 15	580 ± 15
	$H, \text{ МПа}$	1100 ± 25	1250 ± 25	1140 ± 20	1050 ± 25	980 ± 25	940 ± 25

Анализ полученных данных показывает, что микротвёрдость серебряных покрытий, осаждённых как на постоянном ($i_k = 0,1 \text{ А/дм}^2$), так и на импульсном токе ($i_{к\text{ max}} = 1 \text{ А/дм}^2, f = 10 \text{ Гц}, q = 10$) при воздействии лазерного излучения на процесс электролиза, сначала увеличивается на 10 % при $W = 10^{10} \text{ Вт/м}^2$, но при дальнейшем увеличении плотности мощности медленно снижается. Это происходит вследствие постепенного увеличения температуры покрытия, укрупнения его структуры, снижения внутренних напряжений в зоне рекристаллизации.

На рисунке 3 приведены значения микротвёрдости серебряных покрытий, полученных в режимах стационарного (а) и импульсного (б) электролиза при воздействии лазерного излучения с плотностью мощности 3×10^{10} Вт/м² и изменении плотности катодного тока.

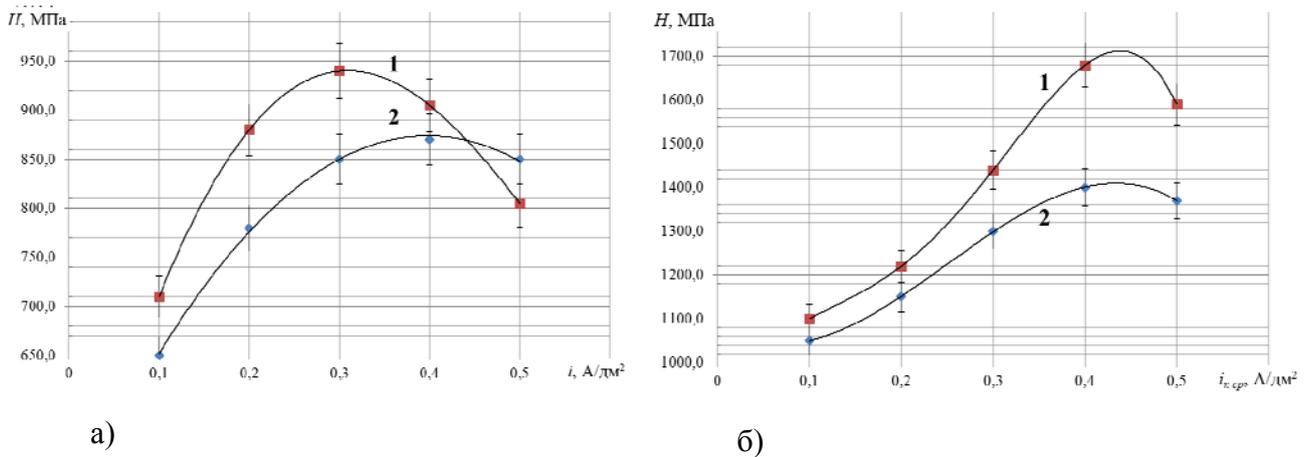


Рисунок 3 – Зависимость микротвёрдости серебряного покрытия от плотности катодного тока, полученного в режимах постоянного (а) и импульсного (б) токов без лазерной активации (1) и в присутствии активирующего лазерного излучения (2).

Как видно из представленных графиков, микротвёрдость серебряных покрытий существенно зависит от плотности и вида тока. На постоянном токе с увеличением i_k она увеличивается до определённого предела в связи с измельчением структуры осадка, а затем снижается из-за выделения водорода и ухудшения качества покрытия. Аналогичный вид имеет и зависимость микротвёрдости H от максимального значения импульсного тока, но при этом микротвёрдость серебряных покрытий почти в два раза больше, чем на постоянном токе. Это объясняется тем, что при импульсном электролизе формируется более мелкокристаллическая структура, чем в режиме постоянного тока, и с большими внутренними напряжениями.

Активация процесса серебрения лазерным излучением приводит к существенному снижению микротвёрдости покрытий. Полученные зависимости хорошо коррелируют с результатами исследования микроструктуры слоёв. Под действием введённой в систему тепловой энергии и рекристаллизации покрытия с увеличением плотности тока его структура укрупняется, снижаются внутренние микронапряжения и микротвёрдость в сравнении с данными, полученными при постоянном и импульсном токах без лазерной активации.

При осаждении медных покрытий из сернокислого электролита использованы следующие режимы: плотность тока в импульсе $i_{k \text{ max}} = 1$ А/дм², частота следования импульсов $f = 10$ Гц, соотношение длительности импульса и паузы 40:60 мс. При использовании стационарного режима плотность тока i_k варьировалась в пределах (0,5 ÷ 2,5) А/дм². На примере отдельных образцов нами была определена микротвёрдость медных покрытий, полученных при разных значениях плотности мощности ЛИ в различных режимах электролиза. Эти данные приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения микротвёрдости H медных осадков, сформированных при активации осаждения лазерным излучением различной плотности мощности W

W , Вт/м ²		0	1×10^{10}	2×10^{10}	3×10^{10}	4×10^{10}	5×10^{10}
ПТ ($i_k = 0,1$ А/дм ²)	H , МПа	850 ± 20	870 ± 20	800 ± 20	750 ± 25	700 ± 25	670 ± 15
ИТ ($i_{k \text{ max}} = 1$ А/дм ²)	H , МПа	1200 ± 30	1300 ± 30	1210 ± 30	1140 ± 30	1050 ± 50	980 ± 50

Как видно из таблицы 2, зависимость микротвёрдости электрохимических покрытий меди в исследуемых диапазонах плотностей мощности ЛИ W и плотностей постоянного и импульсного токов i_k имеет максимум, что свидетельствует об изменении структуры покрытия получаемого в различных режимах. Ход зависимости микротвёрдости от значения постоянно-

го тока, как и в случае с серебром, согласуется с тем фактом, что увеличение тока до определённого значения приводит к формированию мелкозернистой структуры, что способствует более плотной упаковке кристаллитов и росту механических напряжений в электрохимическом покрытии, однако по достижению некоего порогового значения увеличение скорости переноса ионов, приводит к выделению не только ионов металла, но и водорода и формированию более пористого («рыхлого») покрытия. Данные недостатки можно частично ликвидировать, используя импульсный режим электролиза, формируя покрытия с большей микротвёрдостью при больших (в течении импульса) значениях скорости переноса ионов, т. е. большей скорости осаждения. Зависимость микротвёрдости от интенсивности ЛИ для меди (таблица 2) указывает на тот факт, что при относительно высоких плотностях мощности происходят изменения свойств покрытий, связанных с их рекристаллизацией и возможным разрушением.

Электрические свойства. С точки зрения последующего использования исследуемых методов получения электролитических покрытий в микроэлектронной промышленности представляет интерес изучение электрических свойств покрытий. Как известно, среди исследуемых металлов серебро обладает наименьшим удельным сопротивлением $\rho = (1,5 \div 1,6) \times 10^{-8}$ Ом·м и широко применяется для покрытия деталей электрических контактов. Однако получить это значение гальваническим методом практически невозможно. Это связано с тем фактом, что с уменьшением величины зерна возрастает количество центров рассеяния электронов, что приводит к уменьшению силы тока и, как следствие, к увеличению контактного сопротивления материала в целом.

Изучение влияния режимов электрохимического осаждения серебра, меди и олова производилось также при активации процесса лазерным излучением с длиной волны 1,06 мкм. Условия, при которых реализовался процесс на используемой лазерной установке следующие: режим работы – импульсно-периодический; плотность мощности ЛИ W варьировалась в пределах $(10^{10} \div 5 \times 10^{10})$ Вт/м²; длительность импульса – $(1 \div 4) \times 10^{-3}$ с; частота следования импульсов – $(1 \div 60)$ Гц.

На катоды из латуни наносили изучаемые покрытия на постоянном и импульсном токах. При нанесении покрытий на импульсном токе соотношения длительности импульса к длительности паузы составляли: для серебра – 10:90 мс, для меди – 40:60 мс, для олова 100:60 мс. Во всех экспериментах время подбиралось таким образом, чтобы в зоне действия активирующего ЛИ получить плёнки толщиной ~ 5 мкм.

В рамках экспериментальных исследований методом лазерного электролитического осаждения получена серия образцов медных, оловянных и серебряных покрытий при толщине слоя электролита над катодом была равна 10 мм. Лазерное излучение концентрировалось на поверхности катода в пятно, диаметр поперечного сечения которого $d = 0,2$ мм.

Результаты исследования зависимости контактного сопротивления от плотности тока при стационарном ($i_k = 0,1 \div 0,5$ А/дм²) и импульсном ($i_{k \max} = 1 \div 5$ А/дм²) режимах электролиза для железосинеродистого электролита серебрения и воздействия ЛИ представлены на рисунке 4, из которого видно, что на постоянном токе $i_k = 0,1$ А/дм² серебряное покрытие формируется с самым низким значением контактного сопротивления, равным 1,8 мОм. Дальнейшее увеличение плотности тока приводит к его увеличению, достижению оптимального значения и последующему снижению.

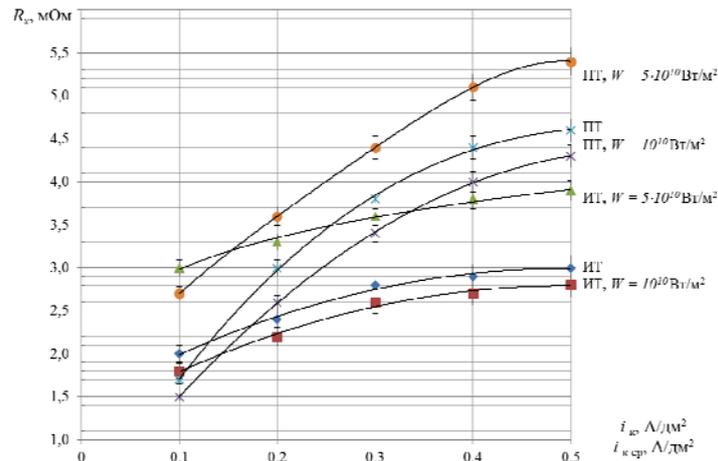


Рисунок 4 – Зависимость контактного сопротивления серебряных покрытий от плотности катодного тока и плотности мощности ЛИ

Полученные данные хорошо коррелирует с кристаллической структурой тонких пленок. На малых плотностях тока она крупно кристаллическая с минимальным количеством микродефектов. С увеличением i_k на поверхности зарождается большее количество кристаллитов, уменьшаются их размеры, появляются микродефекты и увеличиваются микронапряжения. При плотностях тока $i_k = 0,5$ А/дм² и выше на катоде происходит параллельный процесс разряда ионов водорода. Под действием выделяющегося водорода в покрытии появляются макродефекты в виде пор, микросфероидов и дендритов. Структура становится рыхлой, уменьшается количество элементарных точек контактирования, что в совокупности повышает величину контактного сопротивления, и покрытие становится некачественным.

Влияние плотности импульсного тока сказывается на величине контактного сопротивления серебряных покрытий. Она в 1,5 ÷ 2,0 раза ниже, чем контактное сопротивление слоев, сформированных на постоянном токе. Очевидно, увеличение микротвёрдости и микронапряжений, возникающих в тонких серебряных пленках на импульсном токе компенсируется их более совершенной структурой, уменьшением количества примесей в осадках и более сглаженным микрорельефом поверхности, что и приводит к снижению контактного сопротивления.

Влияние ЛИ на величину контактного сопротивления различных металлов представлено в таблице 3. Как видно из представленных данных, плотность мощности ЛИ существенно влияет на величину контактного сопротивления для всех исследованных материалов. При увеличении плотности мощности W в диапазоне ($10^{10} \div 5 \times 10^{10}$) Вт/м² в тонких пленках серебра, меди и олова происходит снижение контактного сопротивления на 20 ÷ 40 % по сравнению с покрытиями, сформированными без использования лазерной активации. По нашему мнению, это происходит вследствие того, что локальная плотность тока в зоне облучения в 5 ÷ 10 раз выше, чем локальная плотность тока на необлучённой поверхности. Это приводит к формированию мелкокристаллической, плотно упакованной, с минимальным количеством микродефектов структуры покрытия. Кроме того, с увеличением плотности мощности ЛИ в указанном диапазоне происходит нагрев покрытия за счет поглощения им лазерной энергии. Под действием описанных процессов снижается микротвёрдость тонкопленочных слоев и внутренние микронапряжения в них. Это в итоге способствует снижению контактного сопротивления с увеличением плотности мощности вследствие происходящей рекристаллизации, что хорошо согласуется с результатами исследования микротвёрдости.

Таблица 3 – Значения контактного сопротивления (мОм) электрохимических покрытий, сформированных при активации процесса осаждения в зависимости от плотности мощности W лазерного излучения

W , Вт/м ²	0	10^{10}	2×10^{10}	3×10^{10}	4×10^{10}	5×10^{10}
Ag(ПТ)	1,82	1,65	1,50	1,55	1,94	2,39
Ag(ИТ)	2,19	1,88	1,76	1,73	2,17	2,57

Cu(ПТ)	1,95	1,78	1,71	1,65	2,23	2,45
Cu(ИТ)	2,31	2,03	1,81	1,87	2,42	3,15
Sn(ПТ)	9,21	7,93	6,95	6,32	7,35	8,12
Sn(ИТ)	10,92	8,84	7,32	6,71	7,92	9,64

Однако при дальнейшем увеличении плотности мощности ЛИ, вводимой в зону термического воздействия, нарушается нормальный процесс структурообразования из-за огромной локальной плотности тока и большого количества ионов, находящихся в этой зоне. Вследствие этого нарушается стабильный процесс кристаллизации, снижается совершенство кристаллической структуры. На поверхности покрытия образуются хаотически расположенные крупные кристаллические образования, что и приводит к резкому возрастанию контактного сопротивления.

Закключение. Проведённые исследования позволяют рекомендовать для формирования локальных структур электрохимическим методом с улучшенными физико-механическими свойствами лазерное активирование в импульсно-периодическом режиме при значениях плотности мощности, находящихся в диапазоне $(2 \cdot 10^{10} \div 3 \cdot 10^{10})$ Вт/м². Применение импульсного тока для электролиза расширяет технологические возможности процесса, так как импульсное ЛИ можно подавать как в период действия импульса тока, так и в период паузы. В первом случае лазерное излучение воздействует более активно на процесс кристаллизации металла, во втором случае – на процесс диффузии ионов.

Комбинированный метод, сочетающий импульсное действие тока и лазерную активацию электрохимического процесса представляется наиболее перспективным в технологиях микроэлектроники, в том числе для формирования объёмных выводов ИМС, изготовлении микроэлектромеханических систем (МЭМС), прецизионных межслойных соединений в монтажных платах и др., так как его применение расширяет технологические возможности метода, обеспечивает локальность процесса и высокое качество изделий.

Литература

1. Cui, Z. Comparative study of AZPF514 and UV8 chemically amplified resists for electron beam nanolithography / Z. Cui, P.D. Prewett. – Microelectron. Eng. – 1999. – V. 46, № 1–4. – P. 255–258.
2. Umbach, C.P. Nanolithography with an acid catalyzed resist / C.P. Umbach, A.N. Broers, C.G. Willson, R. Koch, R.B. Laibowitz. – J. Vac. Sci. Technol. B. – 1988 – V. 6, № 1. – P. 319–322.
3. Gould, C. Advanced process control: basic functionality requirements for lithography/ C. Gould. – Proc. IEEE Advanced Semiconductor Manufacturing Conference XII, 2001 – P. 49–53.
4. Валиев, К.А. Физические основы субмикронной литографии в микроэлектронике / К.А. Валиев, А.В. Раков. – М. : Радио и связь, 1984. – 350 с.
5. Mack, C.A. PROLITH: a comprehensive optical lithography model / C.A. Mack. – Proc. SPIE. – 1985. – V. 538. – P. 207–220.
6. Хмыль, А.А. Формирование трёхмерных токопроводящих структур на поверхности кремния / А.А. Хмыль, Н.Н. Федосенко, А.Н. Купо. // Известия ГГУ им. Ф. Скорины. – 2012. – № 6 (75). – С. 94–99.
7. Хмыль, А.А. Лазерное электрохимическое осаждение серебра на медные подложки / А.А. Хмыль, Н.Н. Федосенко, В.Г. Шолох, А.Н. Купо : материалы Гомельского научного семинара по теоретической физике, посвященного 100-летию со дня рождения Ф.И. Федорова. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2011. – С 251–255.

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

²Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 512.542

О некоторых свойствах нильпотентных инъекторов

С.Ф. КАМОРНИКОВ

Пусть \mathfrak{N} – класс всех конечных нильпотентных групп. В работе доказывается, что для любого \mathfrak{N} -инъектора H в любой конечной разрешимой группе G существуют элементы $x, y \in G$ такие, что $H \cap H^x \cap H^y = F(G)$.

Ключевые слова: конечная разрешимая группа, подгруппа Фиттинга, нильпотентный инъектор.

Let \mathfrak{N} be the class of all finite nilpotent groups. In the paper it is proved that for any \mathfrak{N} -injector H in any finite soluble group G there exist elements $x, y \in G$ such that the equality $H \cap H^x \cap H^y = F(G)$ holds.

Keywords: finite soluble group, Fitting subgroup, nilpotent injector.

В работе рассматриваются только конечные разрешимые группы и термин «группа» всегда означает «конечная разрешимая группа». Нами используются определения и обозначения, принятые в [1].

В работе дается положительный ответ на следующий вопрос:

Существует ли такая абсолютная константа k , что для любого нильпотентного инъектора H любой группы G найдется k сопряженных с H подгрупп, пересечение которых равно подгруппе Фиттинга $F(G)$ группы G ?

По сути, ввиду сопряженности нильпотентных инъекторов речь идет о возможности представления подгруппы Фиттинга $F(G)$ группы G в виде пересечения ограниченного числа ее нильпотентных инъекторов.

Ниже мы показываем, что отмеченная константа k существует и равна трем. Напомним основные определения.

Пусть \mathfrak{F} – непустой класс групп. Подгруппа H группы G называется \mathfrak{F} -инъектором, если для любой субнормальной подгруппы N группы G пересечение $H \cap N$ является \mathfrak{F} -максимальной подгруппой в N . Если $\mathfrak{F} = \mathfrak{N}$ – класс всех нильпотентных групп, то \mathfrak{N} -инъектор группы G мы называем *нильпотентным инъектором*.

Концепция \mathfrak{F} -инъектора была введена в 1967 г. Фишером, Гашюцом и Хартли в работе [2]. Здесь они доказали, что класс групп \mathfrak{F} является классом Фиттинга тогда и только тогда, когда каждая группа обладает \mathfrak{F} -инъектором. Кроме того, в [2] для класса Фиттинга \mathfrak{F} установлены и другие свойства \mathfrak{F} -инъекторов; в частности, доказано, что в каждой группе любые два \mathfrak{F} -инъектора сопряжены.

Непустой класс \mathfrak{F} называется *классом Фиттинга*, если он удовлетворяет следующим требованиям:

- 1) \mathfrak{F} – нормально наследственный класс;
- 2) из $G = AB$, где $A \triangleleft G$, $B \triangleleft G$, $A \in \mathfrak{F}$, $B \in \mathfrak{F}$, всегда следует $G \in \mathfrak{F}$.

Очевидно, что класс \mathfrak{N} всех нильпотентных групп является классом Фиттинга. Поэтому в соответствии с [2] любая конечная разрешимая группа обладает единственным классом нильпотентных инъекторов.

Наша главная цель – доказательство следующей теоремы.

Теорема. Если H – нильпотентный инъектор группы G , то справедливы следующие утверждения:

1) $H \cap H^x \cap H^y = F(G)$ для некоторых элементов x и y из G ;

2) $|H| \leq \sqrt[3]{|G|^2 \cdot |F(G)|}$ и $|H / F(G)| \leq |G : H|^2$.

Доказательство. 1) Так как подгруппа H нильпотентна, то ввиду [3] в группе G найдутся элементы x и y такие, что $H \cap H^x \cap H^y \subseteq F(G)$. С другой стороны, из определения нильпотентного инъектора следует, что $H \cap F(G)$ – \mathfrak{N} -максимальная подгруппа в $F(G)$. А так как подгруппа $F(G)$ нильпотентна, то $H \cap F(G) = F(G)$ и $F(G) \subseteq H$. Очевидно, подгруппы H^x и H^y также являются нильпотентными инъекторами группы G . Поэтому аналогично имеем, что $F(G) \subseteq H^x$ и $F(G) \subseteq H^y$. Следовательно, $F(G) \subseteq H \cap H^x \cap H^y$. Утверждение 1) теоремы доказано.

2) Пусть $\alpha : G \rightarrow G / F(G)$ – естественный гомоморфизм. Используя элементарное равенство $|A \cdot B| = \frac{|A| \cdot |B|}{|A \cap B|}$, где A и B – подгруппы группы G , для нильпотентного инъектора H и элементов $x, y \in G$, получаем

$$\begin{aligned} |\alpha(G)| &\geq |\alpha(H) \cdot \alpha(H^x)| = \frac{|\alpha(H)| \cdot |\alpha(H^x)|}{|\alpha(H) \cap \alpha(H^x)|} = \\ &= \frac{|\alpha(H)| \cdot |\alpha(H^x)| \cdot |\alpha(H^y)|}{|\alpha(H) \cap \alpha(H^x) \cap \alpha(H^y)| \cdot |(\alpha(H) \cap \alpha(H^x)) \cdot \alpha(H^y)|} \geq \\ &\geq \frac{|\alpha(H)| \cdot |\alpha(H^x)| \cdot |\alpha(H^y)|}{|\alpha(H) \cap \alpha(H^x) \cap \alpha(H^y)| \cdot |\alpha(G)|} = \frac{|\alpha(H)|^3}{|\alpha(G)|}. \end{aligned}$$

Отсюда имеем неравенства $|H / F(G)|^3 \leq |G / F(G)|^2$ и $|H| \leq \sqrt[3]{|G|^2 \cdot |F(G)|}$. С другой стороны, из неравенства $|H / F(G)|^3 \leq |G / F(G)|^2$ следует, что $|H / F(G)| \leq |G : H|^2$. Теорема доказана.

Замечание 1. Приведенные в утверждении 2) оценки являются точными. Равенства в них достигаются, например, если группа G является нильпотентной (в этом случае нильпотентный инъектор H совпадает с G).

Замечание 2. Приведенная теорема дополняет следующий известный результат Пассмана из [4]: в каждой группе G всегда найдутся три силовские p -подгруппы, пересечение которых равно $O_p(G)$. Отметим, что любая силовская p -подгруппа группы G является ее \mathfrak{N}_p -инъектором, где \mathfrak{N}_p – класс всех p -групп.

Следующее представление подгруппы $O_p(G)$ легко выводится из теоремы:

Пусть H – нильпотентный инъектор группы G и P – силовская p -подгруппа из H . Тогда существуют элементы $x, y \in G$ такие, что $P \cap P^x \cap P^y = O_p(G)$.

Замечание 3. Пусть $H = [V]D_8$ – полупрямое произведение элементарной абелевой группы V порядка 9 и группы диэдра D_8 , действующей точно на V . Пусть W – точный и неприводимый $F_2[H]$ -модуль над полем F_2 из двух элементов (такой модуль существует по теореме В.10.3 из [1]). Рассмотрим группу $G = [W]H$. В ней силовская 2-подгруппа $P = WD_8$ является нильпотентным инъектором. При этом $W = F(G) \subset P \cap P^x$ для любого элемента $x \in G$. Таким образом, не в каждой группе можно подобрать два нильпотентных инъектора

так, чтобы их пересечение давало подгруппу Фиттинга этой группы. Как показывает теорема, в общем случае необходимы три нильпотентных инъектора.

Замечание 4. В [5] Фёрстер доказал, что нильпотентные инъекторы существуют в любой конечной группе (а не только в разрешимой, как это следует из [2]). В связи с этим результатом возникает задача распространения приведенной теоремы на класс всех конечных групп.

Открытый вопрос: Если H – нильпотентный инъектор произвольной конечной группы G , то верно ли, что существуют элементы $x, y \in G$, для которых справедливо равенство $H \cap H^x \cap H^y = F(G)$?

Литература

1. Doerk, K. Finite soluble groups / K. Doerk, T. Hawkes. – Berlin–New-York : Walter de Gruyter, 1992. – 891 p.
2. Fischer, B. Injektoren endlicher auflösbarer Gruppen / B. Fischer, W. Gaschütz, B. Hartley // Math. Z. – 1967. – Vol. 102. – P. 337–339.
3. Зенков, В.И. О пересечениях троек нильпотентных подгрупп в разрешимых конечных группах / В.И. Зенков // Сиб. электрон. матем. изв. – 2014. – Т. 11. – С. 207–209.
4. Passman, D.S. Groups with normal solvable Hall p' -subgroups / D.S. Passman // Trans. Amer. Math. Soc. – 1966. – V. 123, № 1. – P. 99–111.
5. Förster, P. Nilpotent injectors in finite groups / P. Förster // Bull. Austral. Math. Soc. – 1985. – Vol. 32, № 4. – P. 293–297.

Гомельский филиал Международного
университета «МИТСО»

Поступила в редакцию 10.09.2015

УДК 599.323.45:[576.33 + 577.121.7].033:537.811

Реакции перитонеальных макрофагов крыс на продолжительное воздействие переменного магнитного поля низкой частоты 50 Гц

Д.Р. ПЕТРЕНЕВ

Изучаются уровни продукции активных форм кислорода (АФК) и азота (АФА) перитонеальными макрофагами половозрелых и неполовозрелых крыс-самцов в период после отмены воздействия переменного магнитного поля (50 Гц, 0,4 мТл, 14 суток, 8 ч/сут). Продемонстрированы немонотонные изменения продукции АФК и АФА, реактивности макрофагов, уровня апоптотических лимфоцитов.

Ключевые слова: активные формы кислорода и азота, макрофаги, электромагнитные поля

The production of reactive oxygen (ROS) and nitrogen (RNS) species in peritoneal macrophages of pubescent and impuberal rats was studied after stoppage of prolonged exposure to extremely low frequency fields (50 Hz, 0.4 mT, 14 days, 8 hr/day). The nonmonotonic alterations in production of ROS and RNS, macrophage reactivity and level of apoptotic lymphocytes were demonstrated.

Keywords: reactive oxygen and nitrogen forms, macrophages, electromagnetic fields.

Введение. Одной из глобальных проблем человечества является повышение уровня электромагнитного загрязнения окружающей среды, вызванное широким распространением искусственных источников электромагнитных полей (ЭМП) различных диапазонов. Знания о последствиях воздействия этого фактора на здоровье человека и биосистемы отрывочны. Некоторые исследователи сообщают об отсутствии отрицательных эффектов воздействия ЭМП на здоровье человека [1], в то же время существуют данные о повышении рисков возникновения новообразований, а также заболеваний нервной и эндокринной систем у населения и персонала, подвергающегося хроническому воздействию ЭМП промышленных частот 50 Гц, микроволнового излучения и ЭМП диапазона сотовой связи [1], [2].

Существенный вклад в ухудшение электромагнитной обстановки вносит ЭМП промышленной частоты 50 Гц, источником которого является электротехническое оборудование, линии электропередач, бытовая техника и т. д. Выявлена статистически значимая связь между увеличением рисков возникновения неоплазий у детей и хроническим воздействием МП НЧ при индукции магнитного поля свыше 0,3 мкТл [3], [4]. Эти данные были получены в результате тщательного эпидемиологического исследования, однако в связи с тем, что механизм этого феномена до сих пор не идентифицирован [5], неионизирующие ЭМП классифицированы как «потенциально канцерогенные». Также недостаточно хорошо изучены различия влияния воздействия МП НЧ на здоровье взрослого и формирующегося организма [6], [7].

Одним из предполагаемых механизмов увеличения рисков возникновения неоплазий и неонкологических заболеваний является усиление эндогенной продукции свободных радикалов [8]. В этой связи цель настоящей работы – изучить показатели продукции активных форм кислорода (АФК) и азота (АФА) тканевыми фагоцитами половозрелых и неполовозрелых крыс-самцов после продолжительного воздействия МП НЧ.

Материалы и методы. Все эксперименты проводили в соответствии с этическими нормами обращения с животными с соблюдением рекомендаций и требований «Европейской конвенции по защите экспериментальных животных» (Страсбург, 1986). В работе использовали 2-х и 7-месячных самцов белых крыс (исходный генотип «Вистар»). Животные содержались в стандартных условиях вивария ГНУ ИРБ НАН Беларуси и получали стандартный рацион и воду без ограничений.

Источником МП НЧ являлась установка, генерирующая равномерное переменное магнитное поле с частотой 50 Гц и индукцией магнитного поля 0,4 мТл, которая состояла из источника тока (31 В, 10 А), вольтметра, соединительных кабелей и двух соленоидов, расположенных на расстоянии 1 м друг от друга. В центральной области был сформирован отсек, в

котором размещали клетки с животными. Животных контрольной и экспериментальной групп выводили из эксперимента на 1, 3, 7, 10, 14, 28 и 30 сутки после окончания воздействия МП НЧ (14 суток по 8 ч, фракциями по 4 ч, с перерывом 1 ч).

Выделяли клетки крови, перитонеальные макрофаги и исследовали показатели окислительного метаболизма (метаболическая активность, продукция АФК и АФА) и функциональный резерв клеток как описано ранее [9]. Уровень апоптотических лимфоцитов мононуклеарной фракции клеток крови изучали методом проточной цитометрии с использованием набора ANNEXIN V – FITC Kit (Beckman Coulter, США) на программно-аппаратном комплексе Cytomics FC 500 (Beckman Coulter, США).

Для обработки и статистического анализа полученных данных пользовались общепринятыми методами биологической статистики [10] с использованием ПО Prism (Trial version 5.02; GraphPad Software Inc., США).

Результаты и их обсуждение. Наблюдали немонотонные изменения количества лейкоцитов крови и клеток перитонеальной полости, а также показателей окислительного метаболизма. В том числе отмечали усиление спонтанной (базальной) продукции АФА и АФК клетками в ранние сроки (1 и 3 сутки) после отмены действия МП НЧ, сопровождающееся сниженным функциональным ответом макрофагов на стимуляцию эндотоксином и форболовым эфиром (рисунок 1). В более отдалённые сроки наблюдали снижение спонтанной продукции АФК и АФА клетками перитонеальной полости с одновременным усилением способности клеток отвечать на стимуляцию форболовым эфиром и эндотоксином. Через месяц после окончания действия МП НЧ отмечали возвращение показателей нестимулированной продукции АФК и АФА к контрольным значениям. Повышенная реактивность макрофагов сохранялась в эти сроки. Описанные выше изменения в ответ на воздействие МП НЧ были одинаково выражены как у половозрелых, так и у неполовозрелых животных.

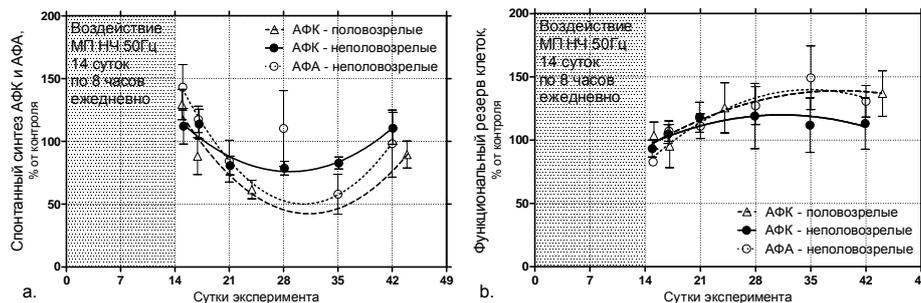


Рисунок 1 – Изменения уровня спонтанной продукции активных форм азота (АФА) и кислорода (АФК) перитонеальными макрофагами (а) и интенсивности функционального ответа клеток (б) на стимуляцию эндотоксином *E. coli 055:B5* (250 нг/мл) и форболовым эфиром (33 нМ) в различные сроки после воздействия МП НЧ (50 Гц). Данные представлены как среднее и ошибка среднего. Тёмная область до 14 суток соответствует периоду фракционированного воздействия МП НЧ, светлая область 14–49 сутки – периоду отмены действия изучаемого фактора

Полученные данные о продукции АФК и АФА в ранние сроки после отмены действия фактора (1–3 сутки) были сопоставлены с результатами сотрудника Д.Л. Якушева об уровне апоптотических лимфоцитов в этот период. Корреляционный анализ выявил слабую положительную связь между уровнем апоптотических лимфоцитов крови и суммарной базальной продукцией АФА перитонеальными макрофагами (Spearman $R = 0.3192$, $p = 0.1701$) и уровнем продукции АФК этими клетками (Spearman $R = 0.3596$, $p = 0.1194$) в эти сроки. Полученные результаты хорошо согласуются с выводами работы [11], в которой обсуждаются аналогичные эффекты, полученные на культурах клеток.

Выявленные немонотонные изменения уровней продукции АФК и АФА свидетельствуют о адаптационных процессах, происходящих в период после отмены действия изучаемого фактора и отличаются от эффектов кратковременного воздействия МП НЧ по направленности процессов. Так ранее мы установили, что через 2 часа после окончания 6-часового воздействия МП НЧ наблюдается тенденция к увеличению содержания клеток в перитонеальной полости. Также указанные режимы воздействия МП НЧ приводили к снижению уровня спонтанной

продукции АФА ($p = 0.1711$, t-test) и к усилению интенсивности ответа клеток на стимуляцию CD14/TLR4-зависимыми агентами. Эти результаты хорошо согласуются с литературными данными о противовоспалительном эффекте кратковременного воздействия МП НЧ [12], а также демонстрируют хорошую чувствительность выбранной модельной системы изучения эффектов воздействия МП НЧ на показатели тканевых фагоцитов.

Заключение. Усиление продукции АФК и АФА наблюдается в ранние сроки (1–3 сутки) после отмены действия фактора и коррелирует с увеличением уровня апоптотических лимфоцитов. Далее наступает стадия снижения этих показателей ниже нормы с одновременным увеличением реактивности клеток. Показатели продукции АФК и АФА возвращаются к контрольным значениям в течение месяца после отмены действия МП НЧ. Повышенная реактивность перитонеальных макрофагов при этом сохраняется. Существенных различий в реакции половозрелого и неполовозрелого организма на воздействие МП НЧ не выявлено.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что изменения уровней эндогенной продукции АФК и АФА являются важными в ключе поддержания окислительно-восстановительного баланса в организме. Поэтому длительное изменение этих показателей при действии МП НЧ приводит к активации компенсаторных механизмов как на клеточном, так и на организменном уровне. Воздействие фактора в течение 2-х недель по срокам превосходит продолжительность стресс-адаптационного синдрома и может быть рассмотрено как хронический стресс с развитием компенсаторных изменений, которые становятся причиной немонотонных изменений чувствительных показателей после отмены действия фактора.

Литература

1. Otto, M., K.E. von Muhlendahl. Electromagnetic fields (EMF): do they play a role in children's environmental health (CEH)? / M. Otto, K.E. von Muhlendahl // *Int J Hyg Environ Health*. – 2007. – V 210 (5). – P. 635–644.
2. Hardell, L., Sage, C. Biological effects from electromagnetic field exposure and public exposure standards / L. Hardell, C. Sage // *Biomed Pharmacother*. – 2008. – V 62 (2). – P. 104–109.
3. Ahlbom, I.C. Review of the epidemiologic literature on EMF and Health / I.C. Ahlbom [et al.] // *Environ Health Perspect*. – 2001. – 109 Suppl 6. – P. 911–33.
4. Li, C.Y., Lee, W.C., Lin, R.S. Risk of leukemia in children living near high-voltage transmission lines / C.Y. Li, W.C. Lee, R.S. Lin // *J Occup Environ Med*. – 1998. – V 40 (2). – P. 144–7.
5. SCENIHR (Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks). Health Effects of Exposure to EMF. 19 January 2009.
6. Pearce, M.S. Paternal occupational exposure to electro-magnetic fields as a risk factor for cancer in children and young adults: A case-control study from the North of England // M.S. Pearce [et al.] // *Pediatr Blood Cancer*. – 2007. – V 49 (3). – P. 280–286
7. Schuz, J., Ahlbom, A. Exposure to electromagnetic fields and the risk of childhood leukaemia: a review / J. Schuz, A. Ahlbom // *Radiat Prot Dosimetry*. – 2008. – V 132 (2). – P. 202–11.
8. Петренев, Д.Р. Электромагнитные поля и механизмы канцерогенеза / Д.Р. Петренев // *Наука и Инновации*. – 2011. – № 1. – С. 20–22.
9. Петренев, Д.Р. Изменения в окислительном метаболизме перитонеальных макрофагов у молодых крыс при длительном воздействии излучения сотовых телефонов стандарта GSM 900 Mhz / Д.Р. Петренев // *Вестник Магілёўскага Дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.А. Куляшова*. – 2010. – Серия В., № 2 (36). – С. 58–68.
10. Гланц, С. Медико-биологическая статистика / С. Гланц ; пер. с англ. – М. : Практика, 1998. – 459 с.
11. Simko, M. Effects of 50 Hz EMF exposure on micronucleus formation and apoptosis in transformed and nontransformed human cell lines / M. Simko [et al.] // *Bioelectromagnetics*. – 1998. – V 19 (2). – P. 85–91.
12. Selvam, R. Low frequency and low intensity pulsed electromagnetic field exerts its antiinflammatory effect through restoration of plasma membrane calcium ATPase activity / R. Selvam [et al.] // *Life Sci*. – 2007. – V 80 (26). – P. 2403–10.

О решетке τ -замкнутых подформаций однопорожденной формации

В.М. СЕЛЬКИН

Исследовалось строение решетки τ -одформаций однопорожденной формации. Доказано, что для любого подгруппового функтора Скибы τ справедливы следующие утверждения: а) если решетка τ -замкнутых подформаций любой однопорожденной τ -замкнутой формации конечна, то и у любой однопорожденной τ -замкнутой ω -насыщенной формации решетка всех ее τ -замкнутых ω -насыщенных подформаций конечна, б) если решетка τ -замкнутых ω -насыщенных подформаций любой однопорожденной τ -замкнутой ω -насыщенной формации $\mathfrak{F} = \tau\text{form}(G)$, где G – p' -группа для некоторого $p \in \omega$, решетка τ -замкнутых подформаций конечна.

Ключевые слова: решетка, формация, τ -замкнутая ω -насыщенная формация, однопорожденная формация, спутник.

The structure of the lattice of τ -closed subformation of one-generated formation is investigated. It is proved that for every subgroup functor of Skiba τ the following statements are true: a) if the lattice of τ -closed subformations of some one-generation τ -closed formation is finite then τ in every one-generated τ -closed ω -saturated formation has the finite lattice of owner τ -closed ω -saturated subformations, б) if the one-generated τ -closed ω -saturated formation $\mathfrak{F} = \tau\text{form}(G)$, where G – p' -group for every $p \in \omega$ has the finite lattice of owner τ -closed ω -saturated subformation then this formation has the finite lattice of owner τ -closed subformations.

Keywords: lattice, formation, τ -closed ω -saturated formations, one-generated formation, satellite.

Все рассматриваемые группы предполагаются конечными. Используется общепринятая терминология [1]–[4].

В группе G выберем некоторую систему подгрупп $\tau(G)$. Исходя из [3], τ называется подгрупповым функтором Скибы, если выполняются следующие условия:

(1) $G \in \tau(G)$ для любой группы G ;

(2) для любого эпиморфизма и любых групп $H \in \tau(A)$ и $T \in \tau(B)$ имеет место $H^\varphi \in \tau(B)$ и $T^{\varphi^{-1}} \in \tau(A)$.

Формация \mathfrak{F} называется τ -замкнутой, если $\tau(G) \subseteq \mathfrak{F}$ для любой группы $G \in \mathfrak{F}$. Для подгрупповых функторов τ_1 и τ_2 полагают $\tau_1 \leq \tau_2$, если $\tau_1(G) \subseteq \tau_2(G)$ для любой группы G . Подгрупповой функтор τ называется замкнутым, если всегда из того, что $T \in \tau(H)$, $H \in \tau(G)$, следует $T \in \tau(G)$. Символом $\bar{\tau}$ обозначается наименьший замкнутый подгрупповой функтор со свойством $\tau \leq \bar{\tau}$.

Пусть ω – произвольное непустое множество простых чисел. Всякая функция вида

$$f : \omega \cup \{\omega'\} \mapsto \{\text{формации групп}\}$$

называется ω -локальным спутником [4]. Если все значения ω -локального спутника f являются τ -замкнутыми формациями, то f называется τ -замкнутым ω -локальным спутником. Символом $LF_\omega \langle f \rangle$ обозначим класс групп $(G \mid G/O_\omega(G) \in f(\omega') \text{ и } G/F_p(G) \in f(p) \text{ для всех } p \in \omega \cap \pi(G))$ для любого произвольного ω -локального спутника f . Пусть $\mathfrak{F} = LF_\omega \langle f \rangle$, то говорим, что f – ω -локальный V -спутник формации \mathfrak{F} . В этом случае мы называем \mathfrak{F} ω -насыщенной формацией. Если при этом все значения f лежат в \mathfrak{F} , то f будем называть внутренним ω -локальным V -спутником формации \mathfrak{F} .

Пусть \mathfrak{X} – произвольная совокупность групп, p – простое число. Тогда полагают

$$\mathfrak{X}(F_p) = \begin{cases} \text{form}(G/F_p(G) \mid G \in \mathfrak{X}), & \text{если } p \in \pi(\mathfrak{X}); \\ \emptyset, & \text{если } p \notin \pi(\mathfrak{X}). \end{cases}$$

V -спутник формации \mathfrak{F} называется минимальным τ -значным ω -локальным V -спутником формации \mathfrak{F} , если $f(\omega') = \text{form}(G/O_\omega(G) \mid G \in \mathfrak{F})$ и $f(p) = \text{form}(\mathfrak{F}(F_p))$ для всех простых $p \in \omega$. Символом $\tau^\omega \text{form}(\mathfrak{X})$ обозначаем пересечение всех τ -замкнутых ω -насыщенных формаций, содержащих непустое множество групп \mathfrak{X} .

Исследование конструкций общей теории решеток при изучении внутреннего строения формаций позволяет находить более удобные решения и схемы доказательств новых результатов [2], [3]. Ряд работ таких известных авторов, как Р. Брайнт, Р. Брайс и Б. Хартли [5], Р. Брайнт и П. Фойя [6], А.Н. Скиб [7], В.П. Буриченко [8] указывает на важность изучения свойств решетки однопорожденной формации. В данной работе рассмотрим вопрос посвященный конечности решетки однопорожденной τ -замкнутой ω -насыщенной формации.

Теорема. Для любого подгруппового функтора Скибы τ справедливы следующие утверждения:

1) если решетка τ -замкнутых подформаций любой однопорожденной τ -замкнутой формации конечна, то и у любой однопорожденной τ -замкнутой ω -насыщенной формации решетка всех ее τ -замкнутых ω -насыщенных подформаций конечна;

2) если решетка τ -замкнутых ω -насыщенных подформаций любой однопорожденной τ -замкнутой ω -насыщенной формации конечна, то и у любой однопорожденной τ -замкнутой формации $\mathfrak{F} = \tau \text{form}(G)$, где G - p' -группа для некоторого $p \in \omega$, решетка τ -замкнутых подформаций конечна.

Некоторые предварительные сведения.

Лемма 1 [9]. Пусть f_i – минимальный τ значный ω -локальный V -спутник формации \mathfrak{F}_i , $i = 1, 2$. Тогда включение $\mathfrak{F}_1 \subseteq \mathfrak{F}_2$ имеет место в том и только в том случае, когда $f_1 \leq f_2$.

Лемма 2 [10]. Если $\mathfrak{F} = \tau^\omega \text{form}(\mathfrak{X})$, f – минимальный τ -значный ω -локальный V -спутник формации \mathfrak{F} , то следующие утверждения справедливы:

- 1) $f(\omega') = \tau \text{form}(G/O_\omega(G) \mid G \in \mathfrak{X})$;
- 2) $f(p) = \tau \text{form}(\mathfrak{X}(F_p))$ для всех $p \in \omega$;
- 3) $\mathfrak{F} = \text{LF}_\omega \langle g \rangle$, где $g(\omega') = \mathfrak{F}$ и $g(p) = f(p)$ при всех $p \in \omega$.

Лемма 3 [3]. Если $\mathfrak{F} = \text{LF}_\omega \langle f \rangle$ и $G/O_p(G) \in \mathfrak{F} \cap f(p)$ для некоторого $p \in \omega$, то $G \in \mathfrak{F}$.

Доказательство теоремы. Предположим прежде, что у любой однопорожденной τ -замкнутой формации решетка всех ее τ -замкнутых подформаций конечна. И пусть $\mathfrak{F} = \tau^\omega \text{form}(G)$ – произвольная однопорожденная τ -замкнутая ω -насыщенная формация. Покажем, что формация \mathfrak{F} имеет лишь конечное множество τ -замкнутых ω -насыщенных подформаций. Пусть \mathfrak{M} – произвольная τ -замкнутая ω -насыщенная подформация из \mathfrak{F} . И пусть f и h – минимальные τ -значные ω -локальные V -спутники формаций \mathfrak{F} и \mathfrak{M} соответственно. Тогда, по лемме 1, имеет место $h(a) \subseteq f(a)$ для всех $a \in \omega \cup \{\omega'\}$. Но, согласно лемме 2, имеет место $f(\omega') = \tau \text{form}(G/O_\omega(G))$, $f(p) = \text{form}(G/F_p(G))$ для всех $p \in \omega \cap \pi(G)$ и $f(p) = \emptyset$ для всех $p \in \omega \setminus \pi(G)$. Таким образом, имеется лишь конечное множество возможных вариантов для вложений $h(a) \subseteq f(a)$, и поэтому имеется лишь конечное множество возможных вариантов для вложений $\mathfrak{M} \subseteq \mathfrak{F}$.

Предположим теперь, что у любой однопорожденной τ -замкнутой ω -насыщенной формации решетка всех ее τ -замкнутых ω -насыщенных подформаций конечна. И пусть $\mathfrak{F} = \tau \text{form}(G)$ – произвольная однопорожденная τ -замкнутая формация, где G – p' -группа для некоторого $p \in \omega$. Покажем, что у формации \mathfrak{F} имеется лишь конечное множество τ -замкнутых подформаций.

Пусть $\mathfrak{F}^* = \tau^\omega \text{form}(C_p \wr G)$, где C_p – группа порядка p . Поскольку G – p' -группа, то $F_p(C_p \wr G) = K$ – база регулярного сплетения $C_p \wr G$. Поэтому

$$C_p \wr G / F_p(C_p \wr G) \cong G.$$

С каждой τ -замкнутой подформацией \mathcal{M} из \mathcal{F} сопоставим класс $\mathcal{M}(p) = \{C_p \wr A \mid A \in \mathcal{M}\}$.

Пусть $\mathcal{M}^* = \tau^\omega \text{form}(\mathcal{M}(p))$. Пусть f и h – минимальные τ -значные ω -локальные V -спутники формаций \mathcal{F}^* и \mathcal{M}^* соответственно. Ввиду лемм 2 и 3, имеет место

$$\mathcal{M}(p) \subseteq f(p) = \tau \text{form}(C_p \wr G / F_p(C_p \wr G)) = \tau \text{form}(G) = \mathcal{F}$$

и

$$m(p) = \tau \text{form}(A / F_p(A) \mid A \in \mathcal{M}(p)) = \mathcal{M}.$$

Следовательно, $\mathcal{M}^* \subseteq \mathcal{F}^*$ и имеется лишь конечное множество возможных вариантов для вложений $\mathcal{M} \subseteq \mathcal{F}$. Теорема доказана.

Литература

1. Шеметков, Л.А. Формации конечных групп / Л.А. Шеметков. – Москва : Наука, 1978, – 272 с.
2. Шеметков, Л.А. Формации алгебраических систем / Л.А. Шеметков, А.Н. Скиба. – Москва : Наука, 1989. – 253 с
3. Скиба, А.Н. Алгебра формаций / А.Н. Скиба. – Минск : Беларуская навука, 1997. – 240 с.
4. Shemetkov, L.A. Multiply ω -local formations and Fitting classes of finite groups / L.A. Shemetkov, A.N. Skiba // Matem. Trudy. – 1999. – № 2. – P. 114–147.
5. Bryant, R.M. The formation generated by a finite group / R.M. Bryant, R.A. Bryce, B. Hartley // Bull. Austral. Math. Soc. – 1970. – V. 2, № 3. – P. 346–357.
6. Bryant, R.M. The formation generated by a finite group / R.M. Bryant, P.D. Foy // Red. Sem. Math. Univ. Padova. – 1995. – V. 99. – P. 215–225.
7. Скиба, А.Н. О подформациях формаций конечных групп / А.Н. Скиба // Доклады АН БССР. – 1981. – Т. 2, № 6. – С. 492–495.
8. Буриченко, В.П. О формациях порожденных группой цокольной длины 2 / В.П. Буриченко // Сиб. мат. журнал. – 2008. – № 6. – С. 1238–1349.
9. Go, W. Factorization theory of one-generated Bear ω -local formations / W. Go, V.M. Selkin, K.P. Sham // Communications in Algebra. – 2007. – Vol. 35. – P. 2901–2931.
10. Селькин, В.М. Об одном применении теории критических формаций / В.М. Селькин // Веснік Віцебскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя П.М. Машэрава. – 2012. – № 1 (67). – С. 18–21.

Технический редактор: *И.В. Близнец*. Корректоры: *Д.Д. Павловец, Г.Н. Петухова*

Подписано в печать 04.12.2015. Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная.
Ризография. Усл. печ. л. 17,9. Уч.-изд. л. 15,6. Тираж 100 экз. Заказ № 728.
Цена свободная

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/87 от 18.11.2013.

Специальное разрешение (лицензия) № 02330/450 от 18.12.2013.

Ул. Советская, 104, 246019, Гомель.