

---

Федеральное агентство по образованию

Научный журнал  
**УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ**  
**ПЕТРОЗАВОДСКОГО**  
**ГОСУДАРСТВЕННОГО**  
**УНИВЕРСИТЕТА**  
(продолжение журнала 1947–1975 гг.)

**№ 2 (107). Март, 2010**

---

**Серия: Естественные и технические науки**

---

Главный редактор

*А. В. Воронин*, доктор технических наук, профессор

Зам. главного редактора

*Н. В. Доршакова*, доктор медицинских наук, профессор

*Э. В. Ивантер*, доктор биологических наук, профессор,  
член-корреспондент РАН

*Н. В. Ровенко*, кандидат филологических наук,  
ответственный секретарь журнала

Перепечатка материалов, опубликованных  
в журнале, без разрешения редакции запрещена.

Статьи журнала рецензируются.

Адрес редакции журнала

185910, Республика Карелия,

г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33. Каб. 272.

Тел. (8142) 76-97-11

E-mail: uchzap@mail.ru

**uchzap.petrso.ru**

## Редакционный совет

- |   |   |
|---|---|
| <b>В. Н. БОЛЬШАКОВ</b><br>доктор биологических наук,<br>профессор, академик РАН (Екатеринбург)  | <b>ПААВО ПЕЛКОНЕН</b><br>доктор технических наук,<br>профессор (г. Йюенсуу, Финляндия)                  |
| <b>И. П. ДУДАНОВ</b><br>доктор медицинских наук, профессор,<br>член-корреспондент РАМН (Петрозаводск)   | <b>И. В. РОМАНОВСКИЙ</b><br>доктор физико-математических наук,<br>профессор (Санкт-Петербург)           |
| <b>В. Н. ЗАХАРОВ</b><br>доктор филологических наук,<br>профессор (Москва)   | <b>Е. С. СЕНЯВСКАЯ</b><br>доктор исторических наук, профессор (Москва)                                  |
| <b>А. С. ИСАЕВ</b><br>доктор биологических наук,<br>профессор, академик РАН (Москва)  | <b>СУЛКАЛА ВУОККО ХЕЛЕНА</b><br>доктор философии, профессор (г. Оулу, Финляндия)                        |
| <b>Н. Н. МЕЛЬНИКОВ</b><br>доктор технических наук,<br>профессор, академик РАН (Апатиты)   | <b>Л. Н. ТИМОФЕЕВА</b><br>доктор политических наук, профессор (Москва)                                  |
| <b>И. И. МУЛЛОНЕН</b><br>доктор филологических наук,<br>профессор (Петрозаводск)  | <b>А. Ф. ТИТОВ</b><br>доктор биологических наук, профессор,<br>член-корреспондент РАН (Петрозаводск)    |
| <b>В. П. ОРФИНСКИЙ</b><br>доктор архитектуры, профессор,<br>действительный член Российской академии<br>архитектуры и строительных наук (Петрозаводск) | <b>МИЛОСАВ Ж. ЧАРКИЧ</b><br>ведущий профессор Сербской<br>Академии наук и искусств (г. Белград, Сербия) |
|   | <b>Р. М. ЮСУПОВ</b><br>доктор технических наук, профессор,<br>член-корреспондент РАН (Санкт-Петербург)  |

Редакционная коллегия серии  
«Естественные и технические науки»

- |  |  |
|--|--|
| <b>А. Е. БОЛГОВ</b><br>доктор сельскохозяйственных наук,<br>профессор (Петрозаводск)                     | <b>В. И. СЫСУН</b><br>доктор физико-математических наук,<br>профессор (Петрозаводск)     |
| <b>Н. Н. НЕМОВА</b><br>доктор биологических наук,<br>профессор, член-корреспондент<br>РАН (Петрозаводск) | <b>В. С. СЮНЁВ</b><br>доктор технических наук,<br>профессор (Петрозаводск)               |
| <b>В. И. ПАТЯКИН</b><br>доктор технических наук,<br>профессор (Санкт-Петербург)                          | <b>Б. М. ШИРОКОВ</b><br>кандидат физико-математических наук,<br>доцент (Петрозаводск)    |
| <b>Е. И. РАТЬКОВА</b><br>ответственный секретарь серии (Петрозаводск)                                    | <b>В. В. ЩИПЦОВ</b><br>доктор геолого-минералогических наук,<br>профессор (Петрозаводск) |

---

Federal Educational Agency

Scientific Journal  
**PROCEEDINGS**  
**OF PETROZAVODSK**  
**STATE UNIVERSITY**  
(following up 1947–1975)

**№ 2 (107). March, 2010**

---

**Natural & Engineering Sciences**

---

Chief Editor

*Anatoly V. Voronin*, Doctor of Technical Sciences, Professor

Chief Deputy Editor

*Natalia V. Dorshakova*, Doctor of Medical Sciences, Professor

*Ernest V. Ivanter*, Doctor of Biological Sciences, Professor,  
The RAS Corresponding Member

*Nadezhda V. Rovenko*, Candidate of Philological Sciences,  
Executive Secretary

All rights reserved. No part of this journal may be used  
or reproduced in any manner whatsoever without written permission.  
The articles are reviewed.

The Editor's Office Address

185910, Lenin Avenue, 33. Tel. +7 (8142) 769711

Petrozavodsk, Republic of Karelia

E-mail: uchzap@mail.ru

**uchzap.petrSU.ru**

# Editorial Council

- |  |  |
|--|--|
| <p><b>V. BOLSHAKOV</b><br/>Doctor of Biological Sciences,<br/>Professor, the RAS Member (Ekaterinburg)</p> <p><b>I. DUDANOV</b><br/>Doctor of Medical Sciences, Professor,<br/>the RAMS Corresponding Member (Petrozavodsk)</p> <p><b>V. ZAKHAROV</b><br/>Doctor of Philological Sciences,<br/>Professor (Moscow)</p> <p><b>A. ISAYEV</b><br/>Doctor of Biological Sciences,<br/>Professor, the RAS Member (Moscow)</p> <p><b>N. MEL'NIKOV</b><br/>Doctor of Technical Sciences,<br/>Professor, the RAS Member (Apatiti)</p> <p><b>I. MULLONEN</b><br/>Doctor of Philological Sciences,<br/>Professor (Petrozavodsk)</p> <p><b>V. ORPHINSKY</b><br/>Doctor of Architecture, Professor,<br/>Full Member of Russian Academy<br/>of Architectural Sciences (Petrozavodsk)</p> | <p><b>PAAVO PELKONEN</b><br/>Doctor of Technical Sciences, Professor (Joensuu, Finland)</p> <p><b>I. ROMANOVSKY</b><br/>Doctor of Physical-Mathematical Sciences,<br/>Professor (St. Petersburg)</p> <p><b>E. SENYAVSKAYA</b><br/>Doctor of Historical Sciences, Professor (Moscow)</p> <p><b>HELENA SULKALA</b><br/>Doctor of Philosophy,<br/>Professor (Oulu, Finland)</p> <p><b>L. TIMOFEEVA</b><br/>Doctor of Political Sciences, Professor (Moscow)</p> <p><b>A. TITOV</b><br/>Doctor of Biological Sciences, Professor,<br/>the RAS Corresponding Member (Petrozavodsk)</p> <p><b>M. CHARKICH</b><br/>the Leading Professor of Serbian Academy<br/>of Sciences and Arts (Belgrade, Serbia)</p> <p><b>R. YUSUPOV</b><br/>Doctor of Technical Sciences, Professor,<br/>the RAS Corresponding Member (St. Petersburg)</p> |
|--|--|

## Editorial Board of the Series “Natural & Engineering Sciences”

- |  |  |
|--|--|
| <p><b>A. BOLGOV</b><br/>Doctor of Agricultural Sciences,<br/>Professor (Petrozavodsk)</p> <p><b>N. NEMOVA</b><br/>Doctor of Biological Sciences,<br/>the RAS Corresponding Member,<br/>Professor (Petrozavodsk)</p> <p><b>V. PATYAKIN</b><br/>Doctor of Technical Sciences,<br/>Professor (St. Petersburg)</p> <p><b>E. RAT'KOVA</b><br/>Series Executive Secretary (Petrozavodsk)</p> | <p><b>V. SISUN</b><br/>Doctor of Physical-Mathematical Sciences,<br/>Professor (Petrozavodsk)</p> <p><b>V. SYUNEV</b><br/>Doctor of Physical-Mathematical Sciences,<br/>Professor (Petrozavodsk)</p> <p><b>B. SHIROKOV</b><br/>Candidate of Physical-Mathematical Sciences,<br/>Docent (Petrozavodsk)</p> <p><b>V. SCHIPTSOV</b><br/>Doctor of Geological-Mineralogical Sciences,<br/>Professor (Petrozavodsk)</p> |
|--|--|

## СОДЕРЖАНИЕ

### АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО

- Крылова О. И.*  
Формирование плана Петрозаводска на ранних этапах его развития ..... 8
- Косенков А. Ю.*  
Классификация стен в традиционном деревянном зодчестве Карелии и сопредельных территорий Русского Севера. Часть 1 ..... 13
- Рочев А. А.*  
Алгоритм нелинейного расчета круговой составной арки ..... 25

### БИОЛОГИЯ

- Шкляревич Г. А., Немова Н. Н.*  
Биотехнология воспроизводства и использования бурых водорослей-макрофитов ..... 30
- Горбач В. В.*  
Трофические связи имаго мнемозины *Parnassius mnemosyne* (Lepidoptera, Papilionidae) в Заонежье ..... 38
- Медведев Н. В., Морозов А. К., Сипила Т.*  
Ладожская кольчатая нерпа как показатель изменения техногенного загрязнения Ладожского озера ..... 43

### ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

- Раевский Б. В., Тарасенко В. В., Ананьев В. А.*  
К вопросу о количественной оценке степени повреждения лесов НП «Водлозерский» ..... 47

### МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ

- Белоусова Г. П., Доршакова О. В., Лупандин Ю. В., Мейгал А. Ю., Субботина Н. С.*  
Состояние вегетативной регуляции сердечного ритма у лиц с вертебрально-базилярной недостаточностью ..... 52
- Новицкая А. С., Марусенко И. М.*  
Поражение нервной системы у больных системной красной волчанкой ..... 58

### ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА

- Щепалов С. В., Кузнецов В. А.*  
Метод решения задачи линейного стохастического программирования с несовместными ограничениями ..... 62

### ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Борисов Г. А., Кукин В. Д.*  
Методы моделирования и оптимизации коммуникационных сетей ..... 66
- Питухин А. В., Петров А. Н.*  
Применение усеченного экспоненциального распределения для оценки вероятности отказа участка автомобильной дороги ..... 70
- Шиловский В. Н., Гольштейн Г. Ю.*  
Обоснование методики расчета запасных частей для устранения параметрических отказов гидропривода лесных машин ..... 73

### ФИЗИКА

- Всероссийская школа-семинар для молодых ученых России по теме «Проблемы и приложения электроразрядной обработки в индустрии наносистем и наноматериалов».**
- Брецких А. Ф., Сысун В. И.*  
Электроэрозионная обработка ..... 78
- Голубев М. С., Дзлueva Е. С., Ермоленко М. А., Иванов А. Ю., Карасев В. Ю.*  
Методы исследования структуры пылевого облака ..... 83
- Григорьев С. В., Девятков В. Н., Денисов В. В., Коваль Н. Н., Лопатин И. В., Шугуров В. В., Яковлев В. В.*  
Электроразрядное оборудование и технологии создания наноструктурных слоев и покрытий ..... 86
- Дербенев И. Н., Филиппов А. В.*  
Экранирование заряда макрочастицы в неравновесной плазме с учетом конверсии ионов ..... 96
- Рожкова Н. Н.*  
Агрегация наночастиц углерода в шунгитах и ультрадисперсных алмазах ..... 107

### Научная информация ..... 110

### Юбилей

- К 60-летию А. Ф. Титова ..... 111
- К 60-летию Н. Н. Немовой ..... 112

### Информация для авторов ..... 113

### Contents ..... 114

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук

Учредитель: ГОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет»

Редактор Г. А. Мехралиева. Корректор С. Л. Смирнова. Переводчик Н. К. Дмитриева. Дизайн, верстка И. Г. Лежнев.

Подписано в печать 23.03.2010. Формат 60х90 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
10 уч.-изд. л. Тираж 500 экз. (1-й завод – 130 экз.) Изд. № 72.

Индекс 66093. Цена свободная.  
Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77–37987  
от 2 ноября 2009 г. выд. Федеральной службой по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых коммуникаций.

Отпечатано в типографии Издательства  
Петрозаводского государственного университета  
185910, Республика Карелия,  
г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33



**ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР  
ЖУРНАЛА**

Профессор,  
доктор технических наук  
*А. В. Воронин*

**ДОРОГИЕ ДРУЗЬЯ – АВТОРЫ И ЧИТАТЕЛИ  
НАШЕГО ЖУРНАЛА!**

Решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации от 19 февраля 2010 года № 6/6 научный журнал «Ученые записки Петрозаводского государственного университета» (серии «Естественные и технические науки» и «Общественные и гуманитарные науки») включен в новую редакцию Перечня ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук. Все научные периодические издания, включенные в новую редакцию Перечня, будут рекомендованы для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени как доктора, так и кандидата наук по профилю научного периодического издания.

Поздравляю всех авторов, рецензентов, редакционный совет, редколлегии обеих серий, редакционный отдел журнала с официальным признанием «Ученых записок ПетрГУ» как авторитетного научного издания. Это успех, к которому мы целенаправленно шли. Популярность журнала растет не только среди ученых нашего вуза, но и среди коллег из вузов и научных центров Москвы, Санкт-Петербурга, Томска, Марий-Эл и др. Расширяется география авторов журнала и благодаря ученым из Финляндии, США, Канады. Это способствует популярности журнала не только у авторов, публикующих свои исследования, но и у читателей, число подписчиков которых увеличивается.

С этого года на платформе Научной электронной библиотеки (Москва) будет размещена электронная версия обеих серий журнала (включая архивные выпуски за 2008–2009 годы), что поспособствует повышению импакт-фактора журнала и индекса цитирования ученых, который сегодня является одним из важных критериев международного университетского рейтинга.

Мы еще более активно будем сотрудничать и с крупнейшими учеными, и с талантливой молодежью – докторантами, аспирантами, соискателями и студентами. Будем совершенствоваться! Успехов и удачи на новом витке развития нашего журнала, а значит, и университета!

УДК 72.03

**ОЛЬГА ИВАНОВНА КРЫЛОВА**

кандидат технических наук, доцент кафедры архитектуры,  
строительных конструкций и геотехники строительного  
факультета ПетрГУ  
*kro@sampo.ru*

### ФОРМИРОВАНИЕ ПЛАНА ПЕТРОЗАВОДСКА НА РАННИХ ЭТАПАХ ЕГО РАЗВИТИЯ

В статье проанализированы первые планы Петрозаводска, выявлены устойчивые характеристики планировки города и их соответствие традициям российского градостроительства, градоформирующая роль Александровского завода. Планировка района с созданной к настоящему времени застройкой представляют собой цельную среду, являющуюся историческим наследием.

Ключевые слова: лучевая система, масштаб, кварталы, застройка, ансамбль, историческое наследие

Общеизвестно, что Петрозаводск как поселение возник в связи со строительством Петровского пушечного завода в устье р. Лососинки в 1703 году. Населенный пункт назывался Петровская слобода. С развитием Демидовских заводов на Урале надобность в Петровском заводе отпала. «Петровский завод действием доменные плавильные печи и сделание железа и разных материалов по силе указу из Коммерц-коллегии в 1733 году остановлен» [1; 401]. Сам населенный пункт остановился в своем развитии, но уже в период Русско-турецкой войны Уральские заводы были отрезаны повстанцами Е. Пугачева и вследствие этого было принято решение заложить на р. Лососинке завод корабельных пушек. «1772 года, апреля 5... От его превосходительства правительствующего Сената г-на обер-прокурора и кавалера Михайлы Федоровича Соймонова данным ему, г-ну бергмейстеру, ордером февраля от 28-го дня сего года 7 и 8-м пунктами повелевая строить повыше французского заводу в 316 саженях совсем новый завод и при том определяет все потребные к построению того завода материалы... Аникита

Ярцов, Федор Гаврилов» [2; 337]. В связи со строительством завода слобода получает статус города: «1777 г., марта 21. Олонецкой области Петрозаводскую слободу переименовать городом, назвав оный город Петрозаводск, которому и быть на основании прочих Новгородского наместничества новых городов» [3; 514]. Эволюцию планировочного решения города в его начальном периоде характеризуют 3 плана – 1778 года, 1785 года и 1854 года. Для композиции планов характерна популярная в градостроительстве XVIII века лучевая система.

В плане 1778 года (рис. 1) пунктирной линией показана существующая планировочная структура Петровской слободы. Проектные решения разработаны без учета существующей планировки. Завод и круглая площадь для административного центра размещены на незастроенной территории выше Петровской слободы по р. Лососинке. На плане представлены наиболее значимые здания, уже построенные каменные на круглой площади и деревянные на 5 лучевых улицах. Площадка завода территориально и композиционно замыкает



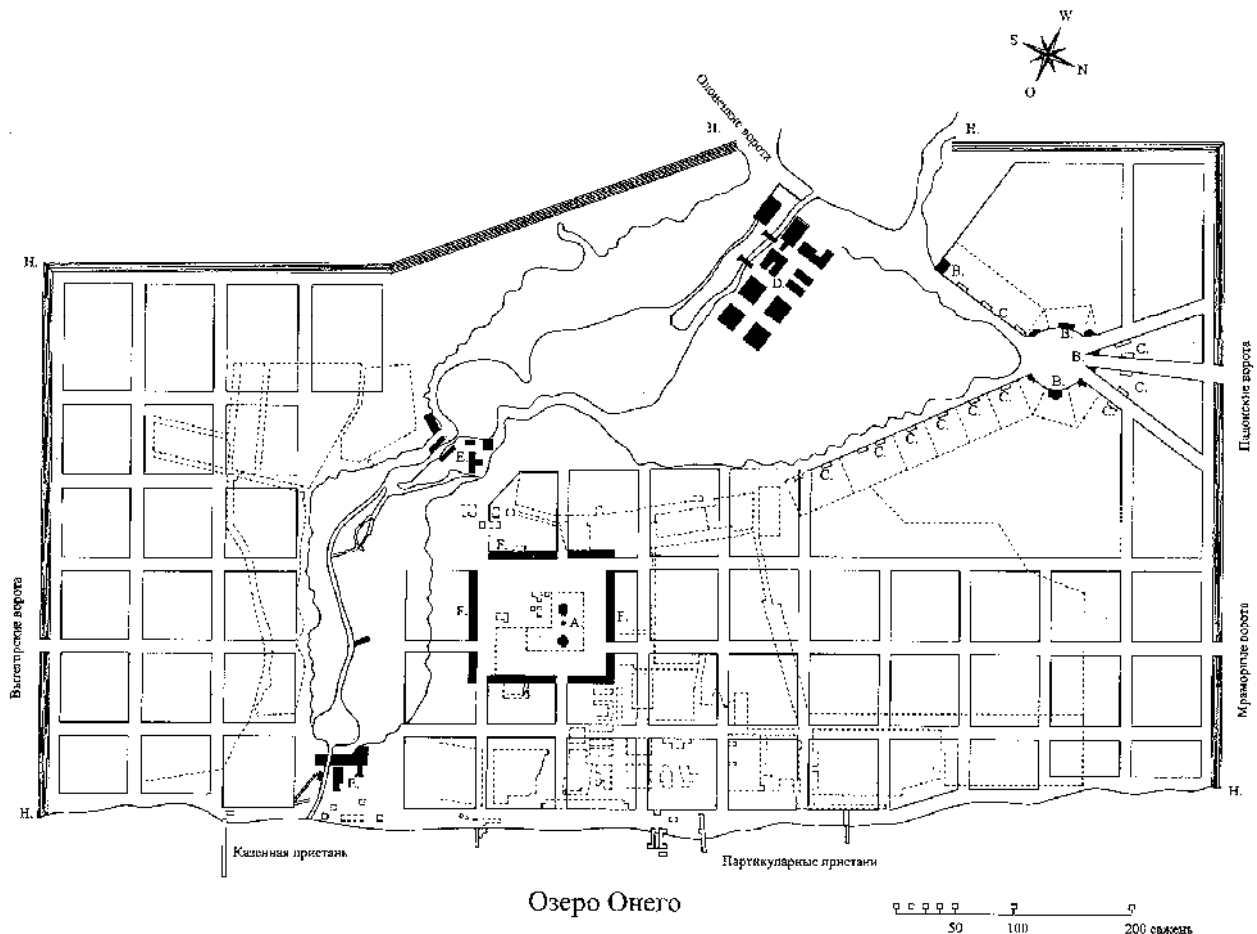


Рис. 1. План г. Петрозаводска 1778 года

Пунктирными линиями обозначены деревянные строения.

А. Две каменные церкви. В. Построенные каменные дома. С. Деревянные дома. Д. Казенные заводы. Е. Французские фабрики.

Вновь прожектировано:

F. Под казенное и обывательское каменное строение. G. Каменные торговые лавки. H. Вал и ров к ограничению [7].

пространство между лучами в пойме р. Лососинки. Лучевая композиция и завод расположены в южной окраинной зоне городской территории. Территория города развита вдоль берега озера. Сеть улиц квадратная и никак не увязана с лучевой системой. В геометрическом центре запроектирована площадь с двумя каменными церквями, окруженная каменной застройкой.

Представляет интерес указ по реализации генплана, в котором оказывается внимание точности исполнения плана и бережному отношению к природе: «Наместническое правление, имея рассуждение, что городу Петрозаводску план ее императорским величеством высочайше опробован и с него копии в тамошний магистрат и к городничему отосланы... приказали для разбития по тому высочайше опробованному плану кварталов и мест в г. Петрозаводск по способности командировать вас, г-на Качалова, предписав вам указом, чтобы, отправясь туда ныне ж, приступили ко исполнению сего и жителям, желающим строиться по плану, места по просьбам их того ж самого времени, как оные поступать будут, отводить и к строению по плану домов лес из

принадлежащих им дач рубить не воспрещать, но наблюдать нижнему земскому суду и городничему, дабы никто под видом своей надобности на сторону и для продажи отнюдь не рубил под опасением штрафа. А со стороны Канцелярии Петровских заводов как в отводе мест в застраивании оных по плану домам, так и в рубке потребных на сие строение лесов препятствия не делать. Ежели ж по разбитию плана к начатию какого-либо нового строения будет помешательство от старого казенного ведомства Берг-коллегии строения, в таком тогда случае с показанием на плане пунктирных линий представить в правление на рассмотрение...» [4; 2–20б].

При формировании застройки применялось зонирование по масштабу и характеру домов с учетом норм пожарной безопасности, то есть в соответствии с социальным положением застройщиков: «Градской голова Лукин... представлял: из петрозаводских-де мастеровых людей многие строят себе самые малые домишки между строением купцов и мещан, и иные так теснятся, что от купецких домов до их такого строения в промежутке нет трех и двух сажен, из

чего немалая опасность настает для пожарных случаев. А по наступающему надлежало бы им жить близ заводов в построенных казенных казармах, при том же кому и вновь построиться надобно, то за городом у завода довольно для их на то места сыскаться может, и просил, чтоб городничему те вновь построенные у мастеровых домишки близ купецких и мещанских домов заставить снести на другие места и впредь им такого тесного строения между ими чинить запретить.... Бургомистр Василий Викулин, бургомистр Павел Коротяев, ратман Иван Кайдалов, ратман Федор Песельников [5; 979–981].

На плане 1785 года (рис. 2) лучевая система несколько трансформирована и по-прежнему является композиционной основой плана города. В сторону поймы р. Лососинки от круглой площади предложена дополнительная третья лучевая связь, и как ее продолжение за площадью в северо-западном направлении оставлен один луч. Таким образом, композиционным решением плана явилась распространенная в XVII веке лучевая система. Наиболее известное подобное решение – трезубец в Санкт-Петербурге. Подобно Адмиралтейству в Санкт-Петербурге, пространство между двумя лучами замыкает Александровский завод. Территория города была увеличена и получила развитие вдоль поймы р. Лососинки. Селитебная территория разделена на кварталы заводских мастеровых, ныне район Голиковка, и на кварталы обывателей, ныне центральный район. Членение территории на кварталы укрупнено в сравнении с предыдущими решениями. Сеть улиц прямоугольная и планировочно увязана с лучевой композицией. Пространство города предлагается обогатить ансамблем площадей: круглая площадь, являющаяся композиционным центром, связана визуально и функционально: а) с площадью, предусмотренной на въезде в город с Санкт-Петербургского тракта; б) с площадью, предусмотренной за р. Лососинкой перед приходской церковью заводских служащих; в) с площадью перед существовавшей соборной церковью. В проекте указывается характер застройки в наиболее важных местах, что, несомненно, направлено на повышение эстетического уровня городской среды. Так, каменные корпуса на круглой площади предусмотрены «по высочайшему указу к перестройке для жительства генерал-губернатора, губернатора, вице-губернатора и коменданта». На «въездной площади» предложены губернский замок, рабочий дом и почтмейстерский дом. Перед соборной церковью – «место, назначенное по высочайшему именному указу к построению дома епископа олонецкого и для училища и консистории». Площадь приходской церкви окружена домами для присутственных мест. На улицах с видом на перспективу указаны линии застройки обывательскими домами «на арках с лавками в нижнем этаже».

При реализации генплана активно использовалась существующая застройка. Сооружения бывшего медеплавильного завода в устье р. Лососинки использовал под «косную и стальную» фабрику граф Гарш. В сохранившихся зданиях «французских фабрик», расположенных выше по течению, размещались казармы для строителей Александровского завода. Для реконструкции и строительства новой застройки широко использовались ссуды: «Новый план губернского города Петрозаводска представить в Комиссию о строении столичных и других городов. А впрочем, приемля за благо представление ваше об употреблении тамошних казенных домов с перестройкою для генерал-губернатора и вице-губернатора, позволяем из суммы, на публичные строения в Олонецкой губернии определенной, отчисляя деньги, сколько употреблено было на построение сих домов, обратить оные на ссуду городовым обывателям, кои пожелают выстроить по плану городскому каменные дома... Из деревянных заводских домов те, кои признаны будут неудобными к помещению мастеровых, поелику они живут большею частию семействами, обратить в пользу приказа общественного призрения, а для мастеровых отвести особую часть или квартал по способности и, сделав планы домам их и сметы, нам представить...

Подлинный подписан собственною ее императорского величества рукою тако: Екатерина» [6; 6].

На плане Олонецкой губернии города Петрозаводска 1854 года (рис. 3) видно, что город по сравнению с предыдущим планом получает территориальное развитие в западно-северо-западной его части. Улично-дорожная сеть прямоугольная в сочетании со сложившейся лучевой системой. Завод теперь находится на правом берегу р. Лососинки, так как русло реки изменилось при наводнении в 1801 году. На берегу озера Онега показаны причалы общественной пристани, частных пристаней и пристани явно промышленного значения. Место для приходской церкви заводских служащих располагается ближе к геометрическому центру Зарецкого района, а связь круглой площади с церковью убрана. Въездная площадь Санкт-Петербургского тракта усложнена, разделена на 2 зоны. В створе лучевой улицы, исходящей от круглой площади, предполагается поместить собор, который и в планировочном отношении, и по высотным отметкам рельефа занимает доминирующее относительно городской территории положение. На плане указаны наиболее значимые общественные здания, в том числе каменный гостинный двор. Застройка круглой площади окончательно сложилась: сформированы два полукруглых каменных казенных корпуса и два каменных казенных флигеля. Здания Александровского завода, в соответствии с технологией, объединены и образуют два двора – литейный и двор с шихтарником.

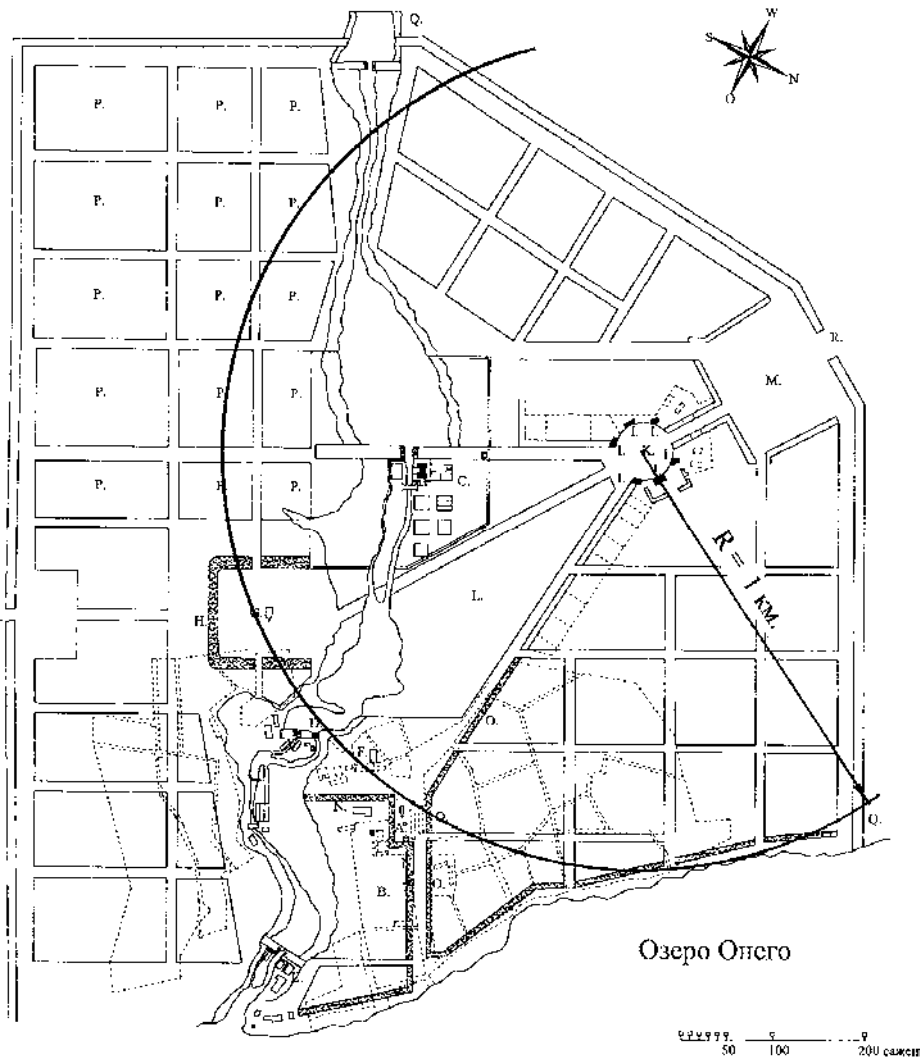


Рис. 2. План г. Петрозаводска 1785 года

Строение в пунктирных линиях деревянное, покрытое темно-кармином каменное.

А. Старые деревянные соборные церкви. В. Березовая роща, посаженная Петром I. С. Пушечный литейный дом. D. В секвестре фабрика, на которой делалось белое листовое железо. Е. Медеплавильный завод.

Кварталы под каменные, деревянные казенные здания, публичные и обывательские строения:

Ф. Для соборной церкви. G. Для приходской церкви заводских служащих. Н. Присутственным местам. I. Шесть каменных корпусов.

К. Площадь перед домами генерал-губернатора, губернатора, вице-губернатора и коменданта. L. Низкое и неудобное под строение место под городское гульбище. М. Въезжая площадь, на которой будет строиться губернский замок, рабочий дом и почтмейстерский дом. N. Место для постройки дома олонецкого епископа, училища и консистории. О. Кварталы для обывательских домов на арках с лавками в нижнем этаже.

Р. Для постройки домов заводских мастеровых. Q. Вал к ограничению города. R. Въезд от Санкт-Петербурга. S. Въезд от Вытегры [7].

В современном центре Петрозаводска (в границах плана 1851 года) сохранились элементы регулярного плана XIX века: лучевая система, прямоугольная квартальная сеть улиц, объекты водного транспорта, принцип ансамбля площадей, наиболее представительная застройка тех лет. В настоящее время Петрозаводск территориально непомерно вырос и план города 1854 года является частью центрального и Заречко-Голиковского районов. При восстановлении города после Гражданской и Великой Отечественной войн планировочное решение было сохранено. Застройка района включает уцелевшие здания, она сформирована с учетом масштаба и административного статуса города. Для цен-

трального района характерно единство решения застройки. К сожалению, в последние годы появились опасные тенденции ввода крупных современных объектов, разрушающих целостность сложившейся среды. Кроме того, происходит распродажа Онежского тракторного (бывшего Александровского) завода, который находится в центральной зоне города и является историческим наследием.

Таким образом, планировка, которая до XX века решалась как «образцовый план» города, и застройка центрального района, выросшая на этой основе и представляющая цельное решение, являются историческим наследием, которое подлежит сохранению.

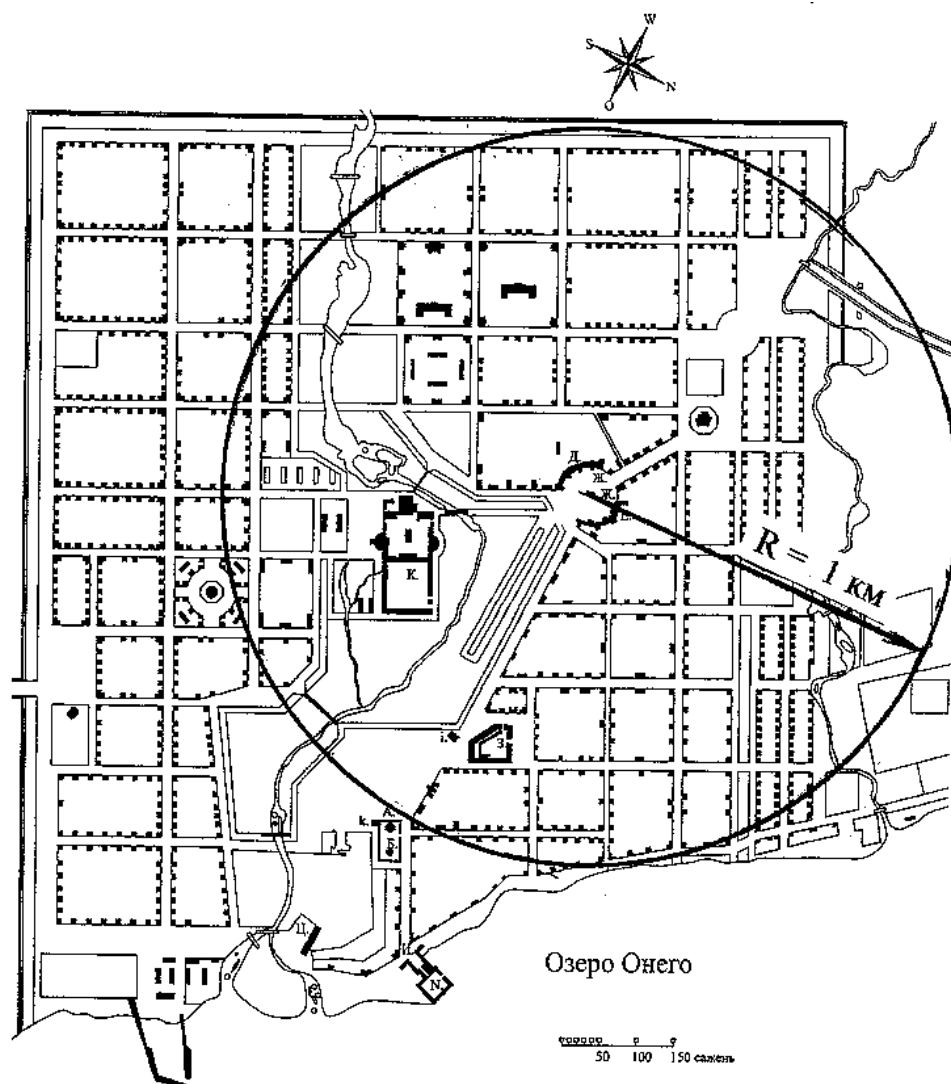


Рис. 3. Образцовый план г. Петрозаводска 1851 года

Существующие строения:

А. Кафедральная каменная церковь Успения Пресвятой Богородицы. Б. Деревянная церковь Святых Апостолов Петра и Павла.  
 Д. Каменный казенный корпус, занимаемый гражданским губернатором. Е. Каменный казенный корпус. Ж. Два каменных казенных флигеля.  
 З. Каменный гостиный двор. И. Каменный двор Олонецкой семинарии. К. Александровский пушечный завод. Ц. Казенный каменный винный магазин. N. Общественная пристань. Предполагаемые строения: к. Каменный дом для управления библиотекой. I. Каменная годштвахта [7].

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Национальный архив Республики Карелия (далее НА РК). Ф. 445. Оп. 1. Д. 53.
2. НА РК. Ф. 445. Оп. 1. Д. 262.
3. ПЗРИ. Т. XX. 1830.
4. НА РК. Ф. 63. Оп. 3. Д. 11/92.
5. НА РК. Ф. 63. Оп. 3. Д. 28/238.
6. НА РК. Ф. 2. Оп. 61. Д. 3/46.
7. НА РК. Ф. 754. Оп. 2. Д. 38.

УДК 72.03 (470.2)

АЛЕКСАНДР ЮРЬЕВИЧ КОСЕНКОВ

инженер Научно-исследовательского института историко-теоретических проблем народного зодчества ПетрГУ  
*ole-kosenkov@rkmail.ru*

## КЛАССИФИКАЦИЯ СТЕН В ТРАДИЦИОННОМ ДЕРЕВЯННОМ ЗОДЧЕСТВЕ КАРЕЛИИ И СОПРЕДЕЛЬНЫХ ТЕРРИТОРИЙ РУССКОГО СЕВЕРА

### Часть 1\*

В статье впервые представлены структура классификации стеновых конструкций в традиционном деревянном зодчестве Русского Севера и детальная разработка одного из ее «типологических деревьев», посвященного венчатым стенам. Рассмотрены параметры используемого лесоматериала, этапы формирования развитого сруба, приемы, обеспечивающие совместную работу венцов в пределах плоскости стены.

Ключевые слова: Русский Север, деревянное зодчество, классификация стеновых конструкций, срубные стены, эволюция конструктивных приемов

Отсутствие детальной систематизации элементов традиционных конструкций в народном деревянном зодчестве долгое время препятствовало выявлению и осмыслению их общерегиональных, локальных и этнокультурных особенностей в диапазоне от морфологических характеристик до основополагающих закономерностей и тенденций развития.

Проблема систематизации и классифицирования ключевых для деревянного зодчества стеновых конструкций определила направление наших научных исследований, а данная статья стала продолжением развития намеченного нами ранее фрагмента классификации венчатых стен [9].

Аналогом структуры предлагаемой классификации стен послужили типологические разработки В. П. Орфинского – принципы классифицирования традиционных деревянных построек и созданная на их основе типологическая система приемов, форм и деталей народного деревянного зодчества, включающая и классификацию

стен, разработанную в 1990 году [16], [19]. Однако накопившиеся в течение последних лет новые материалы, в том числе собранные нами при натурных обследованиях традиционных деревянных построек во время историко-архитектурных экспедиций НИИНаЗ ПетрГУ в 2004–2010 годах, потребовали создания новой версии классификации.

В наиболее полном виде разветвленные многоуровневые классификации традиционных построек и их элементов состоят из десяти основных типологических подразделений, включающих иерархически соподчиненные основные признаки, их варианты и подварианты (например, К-/1(1)), в своей совокупности характеризующие ведущие тенденции в развитии исследуемого объекта. Важной характеристикой всех классификаций является их открытость для возможных изменений и дополнений за счет своеобразных «накопительных емкостей» – дополнительных признаков, конкретизирующих ос-

новную типологическую информацию. Каждый дополнительный признак строится по практически не ограниченной системе и может иметь варианты, подварианты и более дробные соподчиненные им признаки (ДП-1(1)[1]<1><<1>>...). При этом их иерархия не устанавливается нумерацией дополнительных признаков [21; 14–16].

Ядро предлагаемой классификации стен образует аналогичная многоуровневая разветвленная система из семи типологических подразделений, включающих КЛАССЫ, ПОДКЛАССЫ, ТИПОЛОГИЧЕСКИЕ ГРУППЫ, ТИПЫ, ВИДЫ, ПОДВИДЫ, РАЗНОВИДНОСТИ. Особенностью предлагаемой классификации является ее расчлененно-слитный характер, то есть высший типологический уровень – КЛАССЫ – служит общей «вершиной» для «типологических деревьев», характеризующих разные конструктивные системы стен, существующие или существовавшие на Русском Севере. КЛАССЫ в соответствии с основополагающими принципами их конструктивной работы подразделяются на: К1 – стены венчатые, состоящие из горизонтальных несущих элементов (бревен или производных от них), работающих в первую очередь на сжатие поперек волокон древесины; К2 – стены из вертикальных элементов «в стояк», работающие на сжатие вдоль волокон; К3 – стены каркасные, состоящие из несущих и ограждающих элементов; К4 – стены комбинированные, возникшие в результате сочетания разнородных конструктивных систем. Варианты, подварианты и дополнительные признаки КЛАССОВ характеризуют параметры применяемого строительного материала.

На основании типологических исследований, обобщенных в настоящей статье, нами сконструировано детальное «типологическое дерево» для К1 – венчатых стен. Первые два типологических подразделения ее представлены в настоящей статье.

Венчатые стены конкретизируются на уровне вариантов (К1/-) и подвариантов (К1/(-)) в соответствии с поперечным сечением стенообразующего лесоматериала, а на уровне дополнительных признаков – в соответствии с характеристиками породы применяемой древесины (ДП1), с обработкой поверхности бревен (ДП2) и др.

Первостепенной древесиной для возведения срубных построек на Русском Севере выступала сосна, реже применялись ель и лиственница. Если использование последней было обусловлено видовым разнообразием (лиственницу выбирали как более долговечную, но более трудоемкую в обработке древесину) или отсутствием других хвойных пород в некоторых районах, то в случае ели, помимо этого, например, в карельской среде известны факты ее сакрализации [5; 333], [6; 386]. Поэтому использование еловых срубов или включение еловых бревен в сосновые срубы в культовых постройках карел может носить вовсе не случайный характер. С другой стороны, дефицит соснового леса мог вынуждать строителей использовать ель. Так, в Ильинской церкви на

Цыпинском погосте (Кирилловский район Вологодской области) в срубных сосновых стенах перекрытия встречаются еловые бревна.

Что же касается вопроса прочности и долговечности древесины, то можно отметить, что к оценке ее качества наши предки подходили со знанием дела, используя для возведения наиболее ответственной нижней части деревянных построек кондовую сосну. На Русском Севере обычно различают кондовую сосну, имеющую красное или желтовато-красное ядро, и мяндовую, ядро которой окрашено в бледно-желтоватый цвет. Кондовая сосна отличается мелкослойностью (этим обусловлены прочностные характеристики и долговечность данной древесины) и ценится гораздо выше мяндовой, древесину которой иногда расценивают наравне с еловой.

На Русском Севере часто можно встретить в срубах использование свилеватых сосновых бревен. Свилеватая сосна, «закручивающаяся по солнцу» и потому на некоторых территориях получившая название «посолонная», особенно высоко ценилась во многих районах Архангельской области, где она успешно конкурировала с лиственницей [17; 84–85].

Исходным материалом для возведения венчатых стен издревле является круглые лес – бревна (К1/1), поверхность которых обрабатывали с помощью топора и скобеля двояко: либо снимали преимущественно верхний слой коры, оставляя местами луб (ДП2/2), либо скоблили «набело» (снимали кору полностью до заболони) (ДП2/3). Видимо, первоначально поверхность бревен вообще не обрабатывалась (ДП2/1), правда, в таком виде, по нашему мнению, долговечность древесины существенно снижается. Неокоренные стены можно зачастую наблюдать в срубах хозяйственных и промысловых построек, возводимых вдали от селений. Причина тому – экономия времени и сил при их строительстве. Как известно, постройки такого рода часто сохраняют черты и приемы устройства архаичных жилищ.

В дальнейшем, помимо обработки криволинейной поверхности бревен, для получения плоских стен бревна стали подвергать окантовке (протеске) (К1/1(2)). По всей видимости, это связано с подражанием плоским стенам каменной архитектуры. Отесать рубленую стену – задача достаточно сложная, поэтому рациональнее выполнять теску бревен одновременно с возведением сруба, хотя известно немало случаев, когда стены тесали позже, при реконструкции сооружения.

Бревна тесались по всей длине или частично, что было связано в первую очередь с характером угловых соединений (о них речь пойдет в последующих типологических подразделениях). В первом случае бревно протесывалось полностью от конца до конца (ДП3/-(1)). Во втором случае частичная отеска предполагает устройство перехода от плоской к криволинейной поверхности бревна, который достигался с помощью плавной или полуовальной подтески, сегментарной

или прямой подрезки (ДПЗ/-(2)[1], ДПЗ/-(2)[2], ДПЗ/-(2)[3], ДПЗ/-(2)[4] соответственно).

Со временем стены стали тесать не только с внутренней (ДПЗ/1), но и с наружной стороны (ДПЗ/3), а иногда – только с наружной при отсутствии отески в интерьере (ДПЗ/2). На поздних этапах эволюции два последних приема обработки поверхности рубленых стен, скорее всего, были связаны с влиянием городской архитектуры, а на ранних, по крайней мере в Карелии, возникли в результате контактов со строительной культурой Финляндии. По словам финского ученого и реставратора Пану Кайла, при «карельской» и, можно добавить, русской «манере» срубного строительства в дело шли круглые бревна, в Финляндии же заболонная часть в значительной степени стесывалась, поскольку, впитывая и долго удерживая влагу, она относительно быстро начинала гнить и подвергаться воздействию насекомых, что способствовало деструкции и ядровой части бревна [27; 254]. Удаление заболони относительно легко осуществимо при двусторонней окантовке бревен (остатки заболони в пазах между бревнами в этом случае существенно не влияют на долговечность древесины).

Ввиду ряда причин (дефицит леса, трудоемкость его заготовки, существенный вес бревен и др.) на Русском Севере для рубки стен иногда использовали производные от бревен лесоматериалы (К1/2) – плахи и тесины – распиленные или первоначально расколотые с помощью деревянных клиньев, в первом случае – половинки бревен, во втором – более тонкие продольные части бревен. Кроме того, из такого материала легко было возводить плоские стены, законодателем моды на которые в деревянном зодчестве, как уже отмечалось, по-видимому, выступала каменная архитектура. Особенно это видно в постройках из плах, расположенных горбылем в интерьер, а плоской стороной наружу (ДП4/2). Из плах, собственно, как и из бревен, возводили не только стены, но и все остальные фрагменты полноценной постройки – самцово-слеговые остовы крыш, перекрытия и даже детали интерьера (лавки, столы и прочее).

На следующем типологическом уровне классификации, в ПОДКЛАССАХ, рассматриваются способы обеспечения работы элементов стеновых венчатых конструкций. Самым примитивным из достоверно известных способов возведения срубов является прием, при котором бревна, образующие венец, лежат в одном уровне (продольные оси каждого бревна в венце фактически лежат в одной плоскости). Примитивизм такого способа возведения построек позволяет охарактеризовать последние как «протосрубы» (ПК1), для которых существуют варианты, обусловленные сбежистостью бревен и в зависимости от этого – отсутствием/наличием коренной связи (врубки – выемки в бревнах) между венцами (ПК1/-).

К наиболее архаичным известным «протосрубам» на территории Русского Севера можно отне-

сти зафиксированный Л. Е. Красноречьевым [11; 22] прием устройства «протосруба» из слабо сбежистых бревен (с незначительным изменением диаметра ствола от комля к вершине) (ПК1/1).

Второй известный прием устройства «протосруба» связан с заменой слабо сбежистого леса сильно сбежистым, что объективно способствовало конструктивному совершенствованию срубной техники. Дело в том, что из-за значительной разницы диаметров вершинной и комлевой частей бревен при описанном способе рубки неизбежно появлялись зазоры между венцами. Избежать их возникновения проще всего можно было, соединив комлевые части с помощью вырубки в нижележащих бревнах неглубоких выемок (ПК1/2). Таким образом, между соседними венцами в углах возникала коренная связь. Данный вариант «протосрубов» оказался весьма жизнеспособным и нашел применение в промысловых постройках. Например, на севере Карелии такой способ практиковался до конца 50-х годов XX века.

Общее правило, которое справедливо для всех венчатых конструкций из круглого леса, соблюдается и в «протосрубах»: бревна укладываются с чередованием комлей и вершин. Таким образом, в плане один венец образовывался из бревен, уложенных вершинами по часовой стрелке, а вершины бревен следующего венца направлялись против часовой стрелки и т. д.

Следующий ПОДКЛАСС – ПК2 – описывает стеновые конструкции, получившие массовое и широчайшее распространение не только на Русском Севере, но и далеко за его пределами. Для их обозначения мы ввели термин «развитые срубы» (далее – срубы), венцы которых образованы взаимосмещенными по высоте и связанными в углах элементами (бревнами или производными от них). Прием частичного устройства выемок на концах бревен для коренной связи между венцами, применяемый в эмбриональном виде во втором варианте «протосрубов», получает свое дальнейшее развитие. Теперь он служит не только для связи венцов между собой, но и для связи бревен в венце. В основном этим и обусловлено взаимосмещение по высоте объединенных в венец бревен (продольные оси сопрягаемых бревен лежат в разных уровнях).

У данного подкласса существует стадияльно ранний предшественник, известный в период античности и сохранившийся до XX века включительно в виде пережитка в простейших перекрытиях жилища «дарбази» в далекой от Русского Севера Грузии (рис. 1). Конструкция венца в простейших перекрытиях таких жилищ представляет собой взаимоперпендикулярное чередование параллельных укладок бревен, не соединенных в углах коренной связью, а уравновешенных лишь собственным весом и тяжестью вышележащих венцов [25; 69]. Если руководствоваться предположением итальянского архитектора эпохи Раннего Возрождения Л.-Б. Альберти о том, что первым

достижением людей в зодчестве было сооружение крыши, а затем для нее были изобретены стены [1], то можно с большой степенью вероятности говорить о переносе приема устройства такого перекрытия на стены. Правомочность существования таких стен подтверждается описанием дома в Колхиде: «У колхидян на Понте, благодаря изобилию лесов, кладут лежа на землю целные деревья справа и слева на таком расстоянии друг от друга, какое допускает длина деревьев, а на концах их помещают другие, поперечные, замыкающие внутреннее пространство жилища. Затем, скрепляя по четырем сторонам углы положенными друг на друга бревнами и таким образом выводя бревенчатые стены по отвесу к нижним бревнам, они возводят кверху башни, а промежутки, остающиеся из-за толщины леса, затыкают щепой и глиной. Так же они делают крыши...» [2; 37–38].

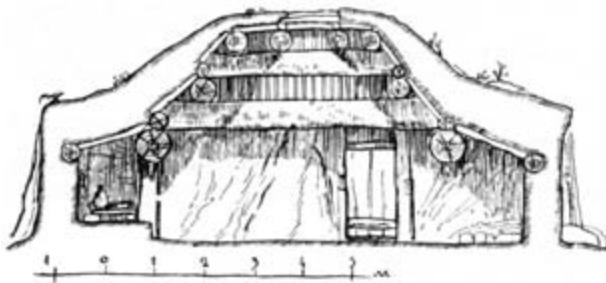


Рис. 1. Примитивное венчатое перекрытие в дарбази. Разрез фрагмента жилища-комплекса «тенот-дарбази» в деревне Хизабавра Аспиндзского района на юге Грузии (Месхети) [3; 70]

На основании вышеизложенного можно констатировать существование архаичной конструкции с венцами, образованными взаимосмещенными по высоте бревнами без коренного соединения в углах, и, по-видимому, являющейся прообразом и протоконструкцией развитых срубов. Руководствуясь введенным нами определением сруба, такой способ возведения венчатых стен еще нельзя назвать срубным в полном смысле этого слова. На Русском Севере в чистом виде стены такой конструкции нам неизвестны.

Дальнейшая эволюция от описанной протоконструкции к срубам, скорее всего, была связана со стремлением увеличить жесткость конструкции за счет устройства коренных связей в углах. В зависимости от глубины врубки выделяются срубы с зазорами (ПК2/1) и сплошные (ПК2/3). Переходным звеном между ними является рубка стен «в погон» или «пахтой», когда зазоры между бревнами заполняются жердями (ПК2/2) (рис. 2). Преимущество последнего способа рубки, по мнению А. В. Ополовникова, в том, что он, «во-первых, значительно сокращает затраты труда на подгонку бревен в пазах и углах и, во-вторых, позволяет пустить в дело весь древесный ствол без остатков и отходов» [15; 231–233]. Такой прием рубки стен применялся для возведения хозяйственных и промысловых построек.



Рис. 2. Нижняя половина сруба сложена из бревен «в погон». Промысловая избушка, срубленная в начале XX века (до 1929 года) в лесу на берегу оз. Светлого неподалеку от деревни Келкозеро, Пудожский район Карелии. (Архив НИИНаЗ, 1991 года)

Бытующее название для срубов с зазорами – «в реж» (реж – от слова редкий – разнесенный врозь, неплотный и др. [4; 45]). Этимология слова «реж» однозначно указывает на происхождение сруба с зазорами от сплошного сруба. Однако с точки зрения логики развития угловых соединений срубы с зазорами, по-видимому, являются исторически более древними. А появление названия «реж» уже связано с второстепенным их использованием в основном в подсобных целях. Так, срубы «в реж» благодаря зазорам хорошо проветриваются. Они нашли свое применение в некоторых хозяйственных постройках (сарай для сушки сена и снопов) и частях зданий (например, на чердаках жилых домов, шатрах церквей и др.). В гидротехнических сооружениях такую рубку используют для возведения опор мостов и пристаней.

Режевые срубы по своему устройству очень близки к вышеописанной венчатой протоконструкции. Существенное различие заключается лишь в наличии/отсутствии угловых врубок. Однако точная глубина врубки бревен друг в друга не регламентируется и поэтому варьируется в широких пределах (от трети-четверти толщины бревна до незначительной выемки или иногда даже подтески), тем самым иногда стирая различия между режевыми срубам и венчатой протоконструкцией при их совместном использовании. Примером тому могут служить конструкции основания некоторых мельниц (рис. 3), устройство оград.

Сплошные срубы – это самый распространенный вариант венчатых конструкций. Сплошной характер рубки стен достигается за счет взаимосмещения сопрягаемых в венец бревен, в идеале на половину их диаметра. Но поскольку укладываемые в сруб бревна отличаются друг от друга в определенных допусках по диаметру, сбежистости и т. д., величина превышения одного бревна над сопрягаемым в месте соединения для каждого случая своя, у плотников она именуется «застоем».



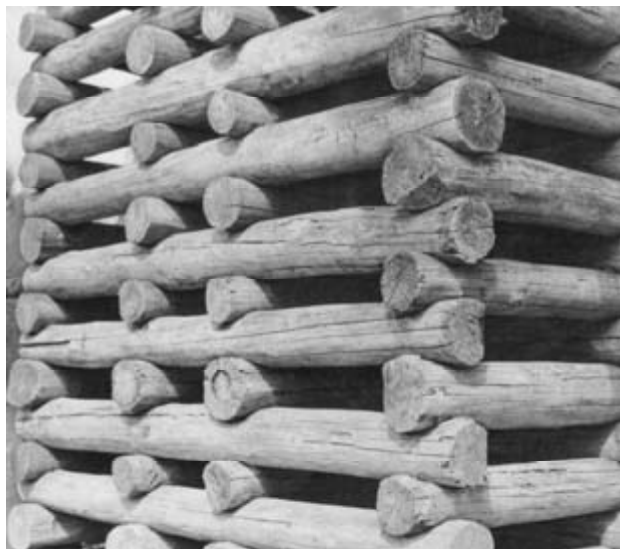


Рис. 3. Режевое основание мельницы из села Азополье Мезенского района Архангельской области [15; 205]

Плотность укладки бревен в сруб достигалась не только глубиной врубок, но и устройством продольного паза, вырубаемого вдоль каждого бревна и соответствующего форме сопрягаемой с ним поверхности другого бревна (ПК2/3(2)). Однако в наиболее архаичных вариантах таких срубов припазовка могла отсутствовать вовсе (ПК2/3(1)). Например, фрагменты такой рубки зафиксированы на одном из самых старых точно датированном сохранившемся памятнике русского деревянного зодчества – церкви Ризоположения из села Бородавы (ныне Кирилловский район Вологодской области), перенесенной в г. Кириллово на территорию Кирилло-Белозерского монастыря и датированной 1485 годом. Понятно, что при таком способе рубки наличие щелей между бревнами неизбежно.

Срубы с припазовкой конкретизируются в зависимости от местоположения последней: верхняя (ДП1/1) или нижняя (ДП1/2). По данным археологических раскопок древних поселений, известно, что первоначально, в обзоримой ретроспекции, продольный паз устраивался в бревне сверху [26]. Переход к нижней припазовке произошел, по видимому, в XV–XVI веках. Об этом можно судить по единственному сохранившемуся памятнику с верхней припазовкой бревен – церкви Воскрешения Лазаря из Муромского монастыря, датированной XIV веком и расположенной ныне в музее-заповеднике «Кижи» [18; 116]. Тем не менее нам известны случаи применения такого способа в относительно поздней часовне близ д. Шульгино (Бокситогорский район Ленинградской области) [8; 17].

Большинство исследователей деревянного зодчества признавали преимущество нижней припазовки. Однако оба приема припазовки нашли свое отражение при рубке бревенчатых стен «в разнопаз» (ДП1/3) и продолжали применяться в народном деревянном зодчестве Русского Севера до начала XX века включительно. Это было связано с рядом причин, включая зависи-

мость припазовки от степени сбежистости леса, применяемого в строительстве: при резком изменении диаметра ствола ширина нижнего продольного паза, приближаясь к вершине, сильно уменьшается или полностью сходит на нет. Таким образом, уменьшаются теплоизоляционные качества продольного паза и в целом сруба. Если же делать паз одинаковой ширины на протяжении всего бревна, то придется в вершине выбрать большую часть бревна и не удастся выдержать «застой». Поэтому в таких случаях рациональнее выбирать пазы в комле с двух сторон (рис. 4).

С учетом всего вышесказанного правомерно предположить, что разнопаз связан с утилитарной задачей – уложить в сруб сбежистые бревна. Кроме того, по нашим наблюдениям, при устройстве разнопаза в комле примерно до середины длины бревна вырубался продольный паз снизу и сверху, а вторая половина бревна вообще не пазилась. В месте перехода верхнего паза к нижнему между бревнами получалось зубчатое соединение, которое наряду с угловыми врубками обеспечивало сруб пространственную жесткость. О древности этого приема можно судить по неоднократно упоминаемой исследователями мирской рядной записи 1666 года на постройку деревянной церкви Николы Чудотворца и Страстотерпца Христова Георгия на Тавренском погосте Вельского уезда Вологодской губернии (ныне село Тавреньга Коношского района Архангельской области), в которой сказано: «А бревна пазити, комли сысподе и сверху до полубревна» [24; 317]. Из других примеров использования двойной припазовки в XVII веке можно назвать постройки в заполярном городе Мангазее [14; 44].

Визуальное обследование сохранившихся срубов с двойной припазовкой и детальное изучение самого приема рубки на руинированных постройках в Карелии и Архангельской области позволили выявить, что протяженность верхнего паза менялась в широких пределах от 1 и более метров до 15–20 см [10].



Рис. 4. Рубка стен «в разнопаз» (двойная припазовка отчетливо видна на торцах бревен). Фрагмент сруба дома-комплекса в д. Враниковская Плесецкого района Архангельской области. Фото А. Ю. Косенкова, 2009 год

Думается, что только там, где длина верхнего продольного паза существенна, можно говорить о сбежистости леса как о первопричине рубки «в разнопаз». Во всех остальных случаях прием больше похож на подражание изначальной идее «разнопаза». Подтверждение тому – наши наблюдения в Кенозерье, где только часть построек XIX–XX столетия срублена «в разнопаз» из сбежистого леса, а другая часть – из бревен с незначительной сбежистостью, хотя в последнем случае бревна проще было бы пазить только с одной стороны. Видимо, поэтому верхний паз и делался незначительной длины, чтобы только внешне уподобить углы сруба существовавшим на момент строительства постройкам.

Среди перечисленных припазовок самой распространенной является нижняя, поэтому на ее примере рассмотрим особенности, характеризующие форму паза и его заполнение.

В зависимости от будущего использования сруба как холодного или теплого продольный паз может выполняться двояко. Теплый сруб собирается на мох и предполагает отопление внутреннего помещения, поэтому продольный паз вырубается широким и округлым (в сечении – дуга), облегающим нижнее бревно (ДП1/2(1)[2]). При выборе мха плотники Русского Севера отдавали предпочтение «кукушкиному льну», но применялись и другие виды мхов. Кроме того, известны случаи, когда продольный паз утепляли с помощью соломы, мешковины или пакли, а иногда даже комбинировали слои разного утеплителя (например, мох и паклю: ДП1/2(1)[2+5]).

Холодный, неотапливаемый сруб собирается без утеплителя, и в нем зачастую продольный паз вырубается двугранным (в сечении – тупой угол) (ДП1/2(2)[1]).

Наличие продольного паза в бревнах сруба создает поверхность сопряжения двух соседних по высоте бревен. В рамках сложившейся срубной техники (речь идет о сплошных срубах) эволюционировали преимущественно способы сопряжения бревен, и припазовка здесь не исключение. Стремление увеличить пространственную жесткость сруба способствовало появлению в продольных пазах дополнительных креплений, препятствующих продольному смещению бревен (ДП2). Они подразделяются на коренные и вставные.

Коренные дополнительные крепления представляют собой зубчатые соединения противоположных, которые могут работать в одном или в обоих продольных направлениях. Первый случай характерен для срубов «в разнопаз», у которых в месте перехода верхней припазовки на нижнюю между бревнами образуются зубчатые соединения (ДП2/2), причем на каждое бревно приходится пара таких соединений (сверху и снизу), зеркально подобных относительно продольной оси бревна, и поэтому препятствующих смещению лишь в одном продольном направлении. Зачастую в таких срубах возможное смещение в противоположную сторону устранялось с помощью особенностей

угловых соединений бревен, которые будут рассматриваться в последующих типологических подразделениях. Второй случай зафиксирован на срубах с нижней припазовкой и представляет собой короткие участки, на которых продольный паз вырубается наоборот (сверху бревна) (ДП2/3). Таким образом, верхняя припазовка как бы зажимается с двух сторон нижними, образуя в месте их переходов зубчатые соединения с каждой стороны, препятствующие смещениям в обоих продольных направлениях.

Так, при реставрации часовни Успения Богородицы в д. Васильево на острове Кижи, датируемой XVII–XVIII веками, методом полной переборки удалось выявить наличие таких креплений, при этом вставные крепления (ДП2/4) – пластинчатые и стержневые нагеля, повсеместно применяемые в срубах XIX века, в продольном пазе отсутствовали, что позволяет сделать заключение о последовательности их распространения. О подобном же решении говорит А. П. Мальцев на примере Ильинской церкви середины XVIII века на Цыпинском погосте (Кирилловский район Вологодской области), который он называет «засеком» [13; 30–31]. Аналогичный конструктивный прием отмечен Л. Е. Красноречьевым в Новгородской области в самцах щипцов, когда «с обоих концов бревна примерно в треть его длины паз вырубается в верхнем бревне, а в средней трети – в нижнем» [11; 13].

Таким образом, перечисленные примеры, зафиксированные на разных территориях Русского Севера, позволяют судить о широком в географическом плане бытовании «засека» в XVII–XVIII веках.

Немаловажными являются конструктивные приемы, обеспечивающие протяженность и высоту венчатых стен. Известно, что приемы сращивания бревен по длине получили широкое распространение только в XVIII веке. До этого же лимитированная длина бревен накладывала ограничения на протяженность стен и доходила до 4–5 саженей (примерно 8,5–10,7 м) [12; 24]. В случае необходимости возведения протяженной постройки использовали «колодцы» – клетки, поставленные впритык друг к другу, с прорубленными проходами (например, в ныне утраченном соборном храме св. Софии в Новгороде «о 13 верхах», срубленном в X веке «колодцами» из дуба [23; 411]). При этом тенденция стыковать срубы, несмотря на распространение способов сращивания бревен, сохранялась до XIX века включительно. Дальнейшая рационализация блокировки клеток друг с другом связана с постепенной ликвидацией одной из оказавшихся в месте стыка поперечных внутренних стен. Так, в сямозерской часовне в д. Инжунаволок к четырехстенному срубу кафоликона примыкает притвор, поперечная стена которого в месте блокировки устроена фрагментарно: в интерьере отсутствует, а имеется только в подклетке и над потолочным перекрытием [7; 77]. Следующий этап обусловлен полным отказом от одной поперечной

стены и формированием трехстенных прирубов, которые могут стыковаться со срубами двояко: либо по одной оси (стыкуемые стены имеют общую продольную ось), либо со смещением (оси стыкуемых стен параллельны). В первом случае соединение стен осуществляется торцами «впри-тык», «в паз и гребень» или через зажатую в одном из срубов стойку с вертикальным пазом (ДПЗ/2, ДПЗ/3, ДПЗ/4). Во втором случае торцами продольных стен прируб примыкает к поперечной стене сруба (ДПЗ/5). Дополнительным креплением для всех типов блокировки часто выступают «замки» в виде бруска, врезанного в наружные выпуски поперечных стен или балок (ДПЗ/-(2)).

На примере культовых построек удалось проследить, что приемы сращивания бревен по длине в Карелии стали активно применяться с конца XVIII века [22; 154]. На территориях, расположенных южнее Карелии, сращивание бревен, по-видимому, получило распространение раньше. Так, в часовнях климовских карел (Бокситогорский район Ленинградской области) зафиксировано появление таких приемов до середины XVIII века [8; 25].

Способы сращивания бревен по длине разделяются на торцевые («впри-тык», «в паз и гребень») и накладками с их множеством разновидностей (ДП4).

С появлением в арсенале севернорусских плотников таких приемов устройство протяженных стен становится легко осуществимо. Однако длинные бревенчатые стены больше подвержены разного рода деформациям (например, выпучиванию и др.) и поэтому требуют дополнительного укрепления. Самым органичным способом укрепления протяженных стен выступали перерубы из коротышей (ДП5). Их часто можно встретить в стенах хозяйственных частей домов-комплексов.

Укрепляли стены по высоте, в ослабленных местах также другими приемами (ДП6): кобылками (тот же переруб, только не из бревен коротышей, а из брусков трапециевидного сече-

ния), шпонками (бруски трапециевидного сечения, забитые вертикально в соответствующие пазы на внутренней стороне стены), клиньями, кольями, сжимами на металлических болтах.

Из-за дефицита хорошего делового леса в ряде районов Карелии применяли древесину с пороками. Один из наиболее частых подобных случаев – использование кривых или винтообразно закрученных бревен. При укладке таких бревен в сруб в них будут возникать дополнительные напряжения. Любопытным приемом нейтрализации возникающих в бревнах дополнительных напряжений является устройство компенсационно-деформационных пропилов (ДП7). Такие пропилы делают в местах наибольшей кривизны в верхней или нижней части бревен, позволяя благодаря гнету вышележащих венцов гасить возникающие перенапряжения. Во время возведения сруба для причерчивания таких бревен достаточно пригрузить их собственным весом плотника. Во время наших полевых обследований зафиксированы бревна с одним, двумя и тремя пропилами. Поскольку они портят внешний вид постройки, а сквозные щели неудобны в эксплуатации, в богатых лесом районах их обычно устраивают в срубах хозяйственных частей домов. Только в бедных деловым лесом районах они встречаются на бревнах подклетов и чердаков изб.

В основу логики построения рассмотренных типологических подразделений положена концепция о стадийном изменении деревянного зодчества от простого к сложному, применительно к венчатым стеновым конструкциям – от примитивных до технологически развитых. Однако следует отметить, что в реальности проявление элементов цикличности в эволюции деревянного зодчества [20] и длительное сосуществование разностадийных конструктивных приемов устройства венчатых стен дает возможность описывать их развитие на отдельных исторических отрезках не только в прямом, заданном в классификации возрастанием нумерации признаков, но и в обратном направлении.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### КЛАССИФИКАЦИЯ ВЕНЧАТЫХ СТЕН (КЛАССЫ И ПОДКЛАССЫ)

**КЛАССЫ** (в соответствии с основополагающими принципами их конструктивной работы и параметрам лесоматериала):

#### **К1** – стены венчатые

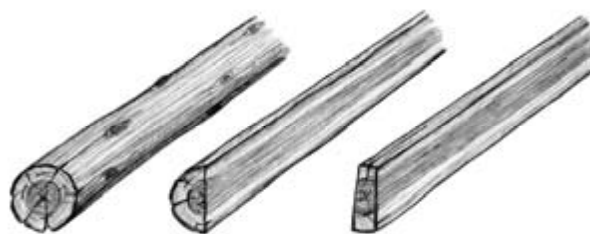
К1/1 – стены, срубленные из бревен

К1/-(1) – стены, срубленные из неокантованных бревен

К1/-(2) – то же из частично или полностью окантованных

К1/2 – стены, срубленные из производных от бревен лесоматериалов:

К1/-(1) – стены, срубленные из плах (полубревен)



К 1/1

К 1/2(1)

К 1/2(2)

К1/-(2) – то же из толстых тесин

...

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПРИЗНАКИ:

**К1:ДП1** – Характеристика применяемой древесины:

ДП1/1 – стены из однородной древесины

ДП1/2 – –"– из разнородной древесины, недифференцированной (без привязки к определенным частям сруба)

ДП1/3 – то же дифференцированной (с венцами из более долговечной древесины в основании сруба)

ДП1/-(1) – стены из сосны обыкновенной

ДП1/-(2) – –"– из ели

ДП1/-(3) – –"– из лиственницы

...

Для стен из разной древесины подварианты суммируются, например:

ДП1/2(1+2) – недифференцированные стены из сосны обыкновенной и ели;

ДП1/3(1+3) – дифференцированные стены из сосны обыкновенной и лиственницы

**К1:ДП2** – Конкретизация обработки поверхности бревен:

ДП2/1 – бревна неокоренные

ДП2/2 – –"– с удаленным верхним слоем коры до луба

ДП2/3 – –"– оскобленные «набело» (с удалением коры до заболони)

...

**К1:ДП3** – Конкретизация окантовки (отески) бревен:

ДП3/1 – бревна с односторонней внутренней окантовкой

ДП3/2 – –"– с односторонней наружной окантовкой

ДП3/3 – –"– с двухсторонней окантовкой

ДП3/-(1) – –"– с кантом (плоскостью), проходящим по всей длине элемента

ДП3/-(2) – –"– с частичной окантовкой (с неокантованными концами и местами соединений)

ДП3/-(2)[1] – бревна с переходом от окантованной к криволинейной поверхности в виде плавной стески

ДП3/-(2)[2] – то же в виде полуовальной подтески (скругления)

ДП3/-(2)[3] – то же в виде сегментарной подрезки

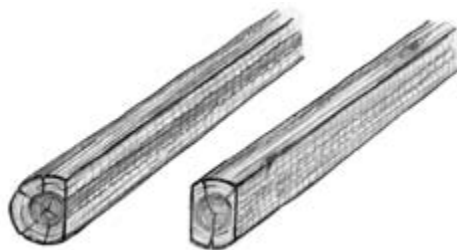
ДП3/-(2)[4] – то же в виде прямоугольной подрезки

...

**К1:ДП4** – Конкретизация рубки стен из плах:

ДП4/1 – стены, рубленные из плах горбылем наружу

ДП4/2 – то же горбылем вовнутрь



К1:ДП3/1 (ДП3/2)

К1:ДП3/3



К1:ДП3/1(2)[1]



К1:ДП3/1(2)[2]



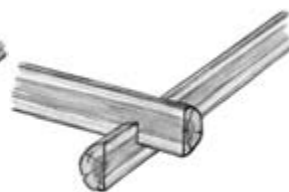
К1:ДП3/1(2)[3]



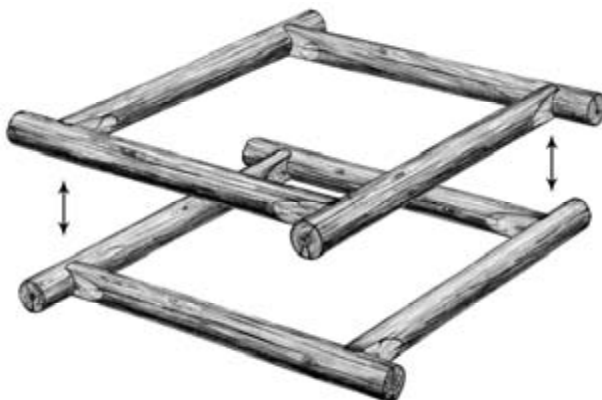
К1:ДП3/1(2)[4]



К1:ДП4/1



К1:ДП4/2



ПК1

**ПОДКЛАССЫ** (по способу обеспечения работы элементов стеновых конструкций в срубе):

**ПК1** – «протосрубы» с венцами, образованными из расположенных в одном уровне бревен

ПК1/1 – «протосрубы» из слабо сбежистых бревен без коренной связи между венцами

ПК1/2 – «–» из сильно сбежистых бревен с коренной связью между венцами

**ПК2** – развитые срубы, венцы которых образованы взаимосмещенными по высоте и связанными в углах элементами (бревнами или производными от них)

ПК2/1 – развитые срубы с зазорами между бревнами («в реж»)

ПК2/2 – «–» с зазорами между бревнами, заполненными жердями («в погон»)

ПК2/3 – развитые сплошные срубы

ПК2/3(1) – развитые сплошные срубы без припазовки

ПК2/3(2) – то же с припазовкой

**ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПРИЗНАКИ:**

**ПК2:ДП1** – Конкретизация припазовки бревен в срубах:

ДП1/1 – срубы с верхней припазовкой бревен

ДП1/2 – то же с нижней припазовкой

ДП1/3 – то же с двойной припазовкой

ДП1/-(1) – срубы с продольным пазом округлой (дугообразной) формы

ДП1/-(2) – «–» с двугранным продольным пазом (треугольной формы)

ДП1/-(1)[1] – срубы с незаполненными пазами

ДП1/-(2)[2] – «–» с пазами, заполненными мхом

ДП1/-(3)[3] – то же соломой

ДП1/-(4)[4] – то же мешковиной

ДП1/-(5)[5] – то же паклей

Для стен с комбинированным заполнением пазов индексы конкретных заполнителей суммируются, например:

ДП1/-(2)[2+5] – двухслойное заполнение пазов мхом и паклей

**ПК2:ДП2** – Устройство дополнительных креплений по длине бревен в плоскости стены, препятствующих их продольному смещению:

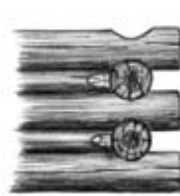
ДП2/1 – стены без дополнительных креплений бревен

ДП2/2 – «–» с устройством препятствия продольному смещению бревен за счет зубчатого соединения противопазов, работающего в одном направлении (при рубке «в разнопаз»)

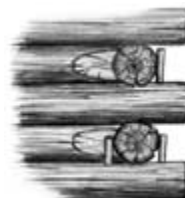
ДП2/-(1) – «–» с верхним пазом, устраиваемым только в остатках (выпусках бревен) и равным их длине

ДП2/-(2) – «–» с верхним пазом, равным суммарной длине остатка и части ширины углового соединения (чаши)

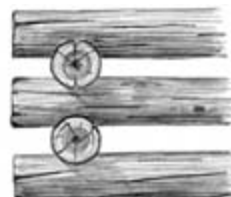
ДП2/-(3) – «–» с верхним пазом, равным суммарной длине остатка и полной ширины чаши



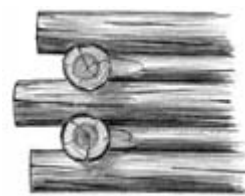
ПК1/1



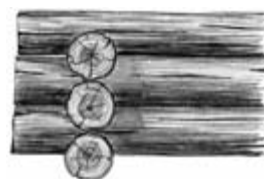
ПК1/2



ПК2/1



ПК2/2



ПК2/3



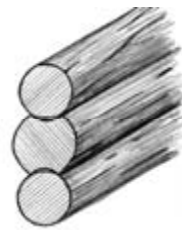
ПК2/3(1)



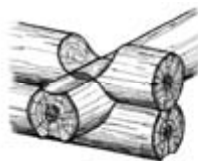
ПК2:ДП1/1



ПК2:ДП1/2



ПК2:ДП1/3



ПК2:ДП2/2(1)



ПК2:ДП2/2(2)

ДП2/-(4) – "– с верхним пазом, равным половине длины бревна или меньше ее

ДП2/3 – стены с устройством препятствия продольному смещению бревен за счет зубчатого соединения противоположных, работающего в обоих направлениях («засек»)

ДП2/4 – стены с устройством дополнительных вставных креплений:

ДП2/4(1) – в виде прямоугольных пластинчатых нагелей

ДП2/4(2) – в виде стержневых нагелей (цилиндрических и др.)

...

#### ПК2:ДП3 – Стыковка стен составных срубов:

ДП3/1 – срубы без стыкованных стен

ДП3/2 – "– с соединением одноосных стен «впритык»

ДП3/3 – "– с соединением одноосных стен «в паз и гребень»

ДП3/4 – "– с соединением одноосных стен через зажатую в одном из срубов стойку (переходный этап от срубов к комбинированным срубно-каркасным конструкциям)

ДП3/5 – "– с соединением несоосных параллельных стен «в накладку»

ДП3/-(1) – срубы с соединением стен «без замков»

ДП3/-(2) – то же «с замками», соединяющими остатки поперечных стен или балок стыкуемых срубов

...

#### ПК2:ДП4 – Нарращивание бревен по длине:

ДП4/1 – стены без наращивания бревен

ДП4/2 – "– с соединением бревен «впритык»

ДП4/3 – "– с соединением бревен «в паз и гребень»

ДП4/4 – "– с соединением бревен накладкой

ДП4/4(1) – "– с соединением бревен прямой короткой накладкой «в полдерева»

ДП4/4(2) – то же прямой длинной накладкой «в полдерева»

ДП4/4(3) – то же косой длинной накладкой

ДП4/4(4) – то же короткой накладкой в виде «полсковородня»

ДП4/4(-)[1] – стены с соединением бревен без дополнительных креплений

ДП4/4(-)[2] – то же с дополнительным креплением нагелями

ДП4/4(-)[3] – то же с дополнительным креплением потайными коренными шипами

ДП4/5 – стены с соединением бревен накладкой с коренными поперечными шипами (зубьями):

ДП4/5(1) – с одинаковыми по величине прямыми зубьями

ДП4/5(2) – с одинаковыми по величине прямыми зубьями с распорным клином (клиньями)

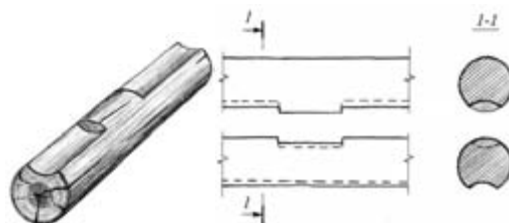
ДП4/5(3) – с одинаковыми по величине косыми зубьями



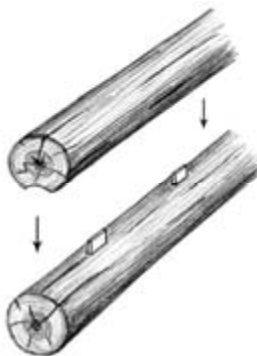
ПК2:ДП2/2(3)



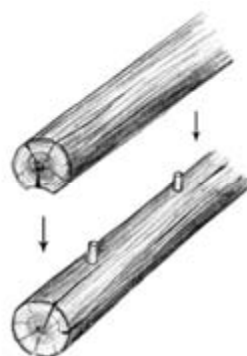
ПК2:ДП2/2(4)



ПК2:ДП2/3



ПК2:ДП2/4(1)



ПК2:ДП2/4(2)



ПК2:ДП3/2



ПК2:ДП3/3



ПК2:ДП3/4



ПК2:ДП3/5

ДП4/5(4) – с разными по величине прямыми зубьями

ДП4/5(5) – с разными по величине косым и прямым зубьями

ДП4/5(-)[1] – стены с соединением бревен без дополнительных креплений

ДП4/5(-)[2] – то же с дополнительным креплением нагелями

ДП4/5(-)[3] – то же с дополнительным креплением потайными коренными шипами

...

**ПК2:ДП5** – Укрепление стен перерубами из «коротышей»:

ДП5/1 – стены без перерубов

ДП5/2 – стены с выдвинутыми вовнутрь перерубами

ДП5/3 – стены с выдвинутыми наружу перерубами

ДП5/4 – стены с симметрично установленными перерубами

...

**ПК2:ДП6** – Устройство дополнительных внешних креплений венчатых стен:

ДП6/1 – стены без дополнительных внешних креплений

ДП6/2 – стены с креплением перевязанными кольями

ДП6/3 – стены с креплением шпонками

ДП6/4 – то же кобылками

ДП6/5 – то же подручными материалами

ДП6/-(1) – стены, укрепленные односторонними сжимами

ДП6/-(2) – то же двусторонними сжимами

...

**ПК2:ДП7** – Устройство компенсационно-деформационных пропилов в бревнах стен:

ДП7/1 – бревна без компенсационно-деформационных пропилов

ДП7/2 – бревна с компенсационно-деформационными пропилами в верхней части бревна

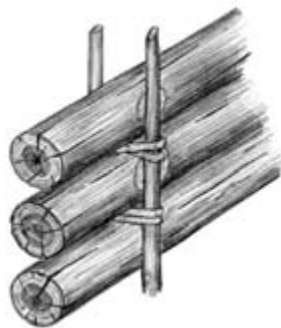
ДП7/3 – то же в нижней части бревна

ДП7/-(1) – бревна с одним пропилом

ДП7/-(2) – то же с двумя

ДП7/-(3) – то же с тремя

...



ПК2:ДП6/2



ПК2:ДП4/3



ПК2:ДП4/4(1)



ПК2:ДП4/4(2)



ПК2:ДП4/4(3)



ПК2:ДП4/4(4)



ПК2:ДП4/5(1)



ПК2:ДП4/5(2)



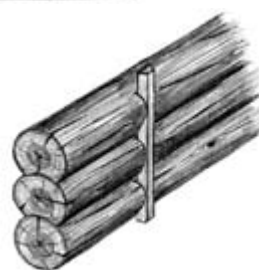
ПК2:ДП4/5(3)



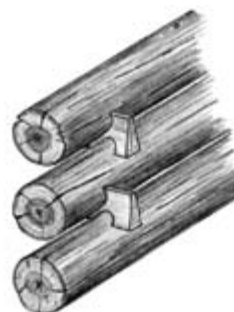
ПК2:ДП4/5(4)



ПК2:ДП4/5(5)



ПК2:ДП6/3



ПК2:ДП6/4

\*Окончание статьи будет опубликовано в следующем номере.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альберти Л. - Б. Десять книг о зодчестве / Пер. В. П. Зубова. Т. 1. М.: Изд-во Всесоюзной Академии архитектуры, 1935. 392 с. Кн. 2, гл. 1.
2. Витрувий. Десять книг об архитектуре / Пер. с лат. Ф. А. Петровского. М.: Изд-во Всесоюзной Академии архитектуры, 1936. 331 с. Кн. 2, гл. 1, § 4.
3. Гараканидзе М. К. Грузинское деревянное зодчество. М.; Тбилиси: Искусство: Сабчота Сакартвело, 1959. 410 с.
4. Даль В. И. Толковый словарь живого великорусского языка. Т. IV. М.: Русский язык, 1982. 683 с.
5. Ершов В. П. Спасы-прародители // Деревня Юккогуба и ее округа. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2001. С. 332–344.
6. Ершов В. П. Ель – дерево мертвых // Локальные традиции в народной культуре Русского Севера: Материалы IV Междунар. науч. конф. «Рябининские чтения-2003». Петрозаводск: Изд-во Гос. историко-архитектурного и этнографического музея-заповедника «Киж», 2003. С. 386–390.
7. Косенков А. Ю. Графическая реконструкция часовни Николая Чудотворца в д. Инжунаволок Суоярвского района // Сямозерские чтения (доклады, материалы). Петрозаводск: Карелия, 2006. С. 74–78.
8. Косенков А. Ю. Часовни климовских карел // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2008. № 2(92). С. 15–26.
9. Косенков А. Ю. К вопросу о систематизации стеновых срубных конструкций в традиционном деревянном зодчестве Русского Севера // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2009. № 4. С. 56–63.
10. Косенков А. Ю. Традиционные срубные постройки в Кенозерье и Лекшмозерье (по материалам полевых обследований 2008–2009 гг.) // Кенозерские чтения-2009: Материалы IV Всероссийской науч. конф. (в печати).
11. Красноречьев Л. Е. Исследование и реставрация памятников деревянного зодчества. По опыту работ в Новгородской области. СПб.: Дмитрий Буланин, 1999. 60 с.
12. Красовский М. В. Энциклопедия русской архитектуры: Деревянное зодчество. СПб.: Сатисъ, 2002. 384 с.
13. Мальцев А. П. Реставрация церкви Пророка Ильи, что на Цыпинском погосте // Церковь Пророка Ильи на Цыпинском погосте 1755. Б. м., 2009. С. 7–52.
14. Овсянников О. В. Дом и усадьба в сибирском городе XVII века // Краткие сообщения Института археологии АН СССР. Вып. 136. М.: Изд-во АН СССР, 1973. С. 41–46.
15. Ополовников А. В. Русское деревянное зодчество. М.: Искусство, 1983. 288 с.
16. Орфинский В. П. Деревянное зодчество Карелии. Генезис, эволюция, национальные особенности: Дис. ... д-ра архитектуры. Т. I. М.: ЦНИИТИА, 1975. 298 с.
17. Орфинский В. П. Пинежские раздумья // Север. 1987. № 9.
18. Орфинский В. П. Древнейший деревянный клетский храм России – церковь Воскрешения Лазаря из Муромского монастыря // Народное зодчество: Межвуз. сб. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1999. С. 115–122.
19. Орфинский В. П., Гришина И. Е. Типологическая система сельской архитектурно-пространственной среды. Часть IV. Структурно-функциональные части, структурные части и элементы жилых, хозяйственных и культовых построек. Петрозаводск, 1990 (рукопись).
20. Орфинский В. П., Гришина И. Е. Элементы цикличности в развитии народного деревянного зодчества // Народное зодчество: Межвуз. сб. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1999. С. 23–37.
21. Орфинский В. П., Гришина И. Е. Типология деревянного культового зодчества Русского Севера. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2004. 280 с.
22. Орфинский В. П., Яскеляйнен А. Т. Хронологическая атрибуция сооружений народного деревянного культового зодчества // Народное зодчество: Межвуз. сб. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1999. С. 147–160.
23. Рыбаков Б. А. Искусство древних славян // История русского искусства. Т. 1. М.: Изд-во АН СССР, 1953.
24. Суворов Н. И. Мирская рядная запись на построение деревянной церкви 1666 г. // Известия императорского Русского археологического общества. Т. II. Вып. 5–6. СПб., 1861. Стлб. 316–320.
25. Сумбадзе Л. Венчатые покрытия в русском деревянном зодчестве // Архитектурное наследие. № 10. М.: Гос. изд-во литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1958. С. 59–72.
26. Янин В. Л., Хорошев А. С., Рыбина Е. А., Сорокин А. Н. Археологические исследования в Людином Конце Великого Новгорода (Троицкий раскоп XII) // Новгород и Новгородская земля. История и археология. Вып. 14. Новгород: Изд-во Новгородского гос. объединенного музея-заповедника, 2000. С. 5–9.
27. Kaila P. Talotohtori rakentajan pikkujättiläinen. Porvo, 1997.



АНАТОЛИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ РОЧЕВ

кандидат технических наук, доцент кафедры архитектуры,  
строительных конструкций и геотехники строительного  
факультета ПетрГУ  
metalll@bk.ru

## АЛГОРИТМ НЕЛИНЕЙНОГО РАСЧЕТА КРУГОВОЙ СОСТАВНОЙ АРКИ

В работе рассматривается алгоритм расчета арки переменного сечения на основе использования основных положений общей теории составных стержней А. Р. Ржаницына. При деформационном расчете используются полученные автором выражения для определения эквивалентных модулей деформаций, учитывающие сжимаемость оси арки, деформации сдвига в стержнях арки, развитие неупругих линейных деформаций, а также деформации, связанные с искажением формы поперечного сечения стержней арки. Для исследования устойчивости получена проварьированная система уравнений равновесия составной арки.

Ключевые слова: подъемная составная арка, эквивалентные модули деформаций, искажение формы поперечного сечения стержней, деформационный расчет, функционал потери устойчивости

В работе исследуется несущая способность круговой составной упругопластической подъемной арки, имеющей переменное сечение по длине. Стержни, составляющие арку, соединены между собой структурными связями. Для материала стержней арки устанавливается произвольная зависимость между деформациями и напряжением. В работе применяются основные положения общей теории составных стержней, разработанной А. Р. Ржаницыным [7]. Не учитывается влияние касательных напряжений на развитие пластических деформаций.

Деформационный расчет неупругой составной арки базируется на использовании системы дифференциальных уравнений, описывающих напряженно-деформированное состояние упругой круговой составной арки постоянного сечения по длине с упругоподатливыми связями сдвига и упругоподатливыми поперечными связями постоянной жесткости по длине арки [5]. Эта система

уравнений предназначена для определения усилий в связях сдвига  $\tau_i$  и усилий в поперечных связях  $q_i$  в  $n$  швах составной арки. Здесь  $i$  – индекс, означающий номер шва. В данной работе осуществлена замена указанной системы дифференциальных уравнений системой уравнений в конечных разностях, в которую введены параметры, учитывающие физическую и геометрическую нелинейность решаемой задачи. Круговая ось арки радиусом  $R$  делится по длине на  $m$  равных частей с образованием между полярными радиусами смежных сечений  $j$  и  $(j+1)$  угла  $\phi$ . Используется метод шагового нагружения конструкции [3].

Описанная система конечно-разностных уравнений на  $k$ -м шаге нагружения будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \Delta^2 T_{ij}^{(k)} / \phi^2 - R^2 \zeta_{ij}^{(k)} g_{i,i-1,j}^{(k)} T_{i-1,j}^{(k)} - (R^2 \zeta_{ij}^{(k)} g_{ij}^{(k)} - 1) T_{ij}^{(k)} - \\ - R^2 \zeta_{ij}^{(k)} g_{i,i+1,j}^{(k)} T_{i+1,j}^{(k)} - R^2 \zeta_{ij}^{(k)} d_{i,i-1,j}^{(k)} S_{i-1,j}^{(k)} - R^2 \zeta_{ij}^{(k)} d_{ij}^{(k)} S_{ij}^{(k)} - (1) \\ - R^2 \zeta_{ij}^{(k)} d_{i,i+1,j}^{(k)} S_{i+1,j}^{(k)} - R^2 \zeta_{ij}^{(k)} g_{ioj}^{(k)} = 0, \end{aligned}$$

$$\Delta^5 S_{ij}^{(k)} / \phi^5 + 2\Delta^3 S_{ij}^{(k)} / \phi^3 + \Delta S_{ij}^{(k)} / \phi +$$

$$+ R^4 \eta_{ij}^{(k)} (p_{i,i-1,j}^{(k)} \Delta T_{i-1,j}^{(k)} / \phi + p_{ij}^{(k)} \Delta T_{ij}^{(k)} / \phi + p_{i,i+1,j}^{(k)} \Delta T_{i+1,j}^{(k)} / \phi +$$

$$+ l_{i,i-1,j}^{(k)} \Delta S_{i-1,j}^{(k)} / \phi + l_{ij}^{(k)} \Delta S_{ij}^{(k)} / \phi + l_{i,i+1,j}^{(k)} \Delta S_{i+1,j}^{(k)} / \phi + \Delta p_{ioj}^{(k)} / \phi),$$

где

$$g_{i,i-1,j}^{(k)} = -\frac{1}{E_{ija}^{(k)} A_{ij}} + \frac{a_{ij} b_{i-1,j}}{E_{ij}^{(k)} J_{xij}},$$

$$g_{ij}^{(k)} = \frac{1}{E_{ija}^{(k)} A_{ij}} + \frac{1}{E_{i+1,ja}^{(k)} A_{i+1,j}} + \frac{a_{ij}^2}{E_{ij}^{(k)} J_{xij}} + \frac{b_{ij}^2}{E_{i+1,j}^{(k)} J_{xi+1,j}},$$

$$g_{i,i+1,j}^{(k)} = -\frac{1}{E_{i+1,ja}^{(k)} A_{i+1,j}} + \frac{a_{i+1,j} b_{ij}}{E_{i+1,j}^{(k)} J_{xi+1,j}}, \quad g_{ir}^{(k)} = g_{ri}^{(k)},$$

$$g_{ioj}^{(k)} = -\frac{M_{i,j}^{o(k)} a_{ij}}{E_{ij}^{(k)} J_{xij}} - \frac{M_{i+1,j}^{o(k)} b_{ij}}{E_{i+1,j}^{(k)} J_{xi+1,j}} - \frac{N_{ij}^{o(k)}}{E_{ija}^{(k)} A_{ij}} + \frac{N_{i+1,j}^{o(k)}}{E_{i+1,ja}^{(k)} A_{i+1,j}},$$

$$d_{ij}^{(k)} = \frac{a_{i-1,j}}{E_{ij}^{(k)} J_{xij}} - \frac{b_{ij}}{E_{i+1,j}^{(k)} J_{xi+1,j}},$$

$$d_{i,i-1,j}^{(k)} = -\frac{a_{ij}}{E_{ij}^{(k)} J_{xij}}, \quad d_{i,i+1,j}^{(k)} = \frac{b_{ij}}{E_{i+1,j}^{(k)} J_{xi+1,j}}, \quad (2)$$

$$p_{i,i-1,j}^{(k)} = \frac{b_{i-1,j}}{E_{ij}^{(k)} J_{xij}}, \quad p_{i,i+1,j}^{(k)} = -\frac{a_{i+1,j}}{E_{i+1,j}^{(k)} J_{xi+1,j}},$$

$$p_{ij}^{(k)} = \frac{a_{ij}}{E_{ij}^{(k)} J_{xij}} - \frac{b_{ij}}{E_{i+1,j}^{(k)} J_{xi+1,j}},$$

$$l_{i,i-1,j}^{(k)} = -\frac{1}{E_{ij}^{(k)} J_{xij}}, \quad l_{i,i+1,j}^{(k)} = -\frac{1}{E_{i+1,j}^{(k)} J_{xi+1,j}},$$

$$l_{ij}^{(k)} = \frac{1}{E_{ij}^{(k)} J_{xij}} + \frac{1}{E_{i+1,j}^{(k)} J_{xi+1,j}}, \quad l_{ir}^{(k)} = l_{ri}^{(k)},$$

$$p_{ioj}^{(k)} = \frac{M_{i+1,j}^{o(k)}}{E_{i+1,j}^{(k)} J_{xi+1,j}} - \frac{M_{ij}^{o(k)}}{E_{ij}^{(k)} J_{xij}}, \quad i = 1..n, \quad j = 0..m,$$

$T_{ij}^{(k)}$  – сдвигающее усилие в  $j$ -м поперечном сечении  $i$ -го стержня арки, возникающее от действия усилий  $\tau_i^{(k)}$  при  $k$ -м шаге нагружения;  $S_{ij}^{(k)}$  – изгибающий момент в  $j$ -м поперечном сечении  $i$ -го стержня арки, возникающий от действия усилий  $q_i^{(k)}$  при  $k$ -м шаге нагружения;  $a_{ij}$  и  $b_{i-1,j}$  – расстояние от центра тяжести  $j$ -го поперечного сечения  $i$ -го стержня арки до разделяющих плоскостей ниже- и вышележащего шва;  $A_{ij}$  и  $J_{xij}$  – площадь и момент инерции  $j$ -го поперечного сечения  $i$ -го стержня арки;  $\xi_{ij}^{(k)}$  и  $\eta_{ij}^{(k)}$  – коэффициенты жесткости соответственно связей сдвига и поперечных связей на  $j$ -м участке  $i$ -го шва арки при  $k$ -м шаге нагружения;  $E_{ija}^{(k)}$  – секущий модуль деформаций для осевого волокна  $j$ -го поперечного сечения  $i$ -го стержня арки, определяемый по диаграмме «напряжения – деформации» для материала  $i$ -го стержня арки, по деформации равной

$$\varepsilon_{ija}^{(k)} = (\varepsilon_{ij0}^{(k-1)} + \varepsilon_{iju}^{(k-1)}) / 2, \quad (3)$$

здесь  $\varepsilon_{ij0}^{(k-1)}$  и  $\varepsilon_{iju}^{(k-1)}$  – краевые деформации в плоской стенке  $j$ -го симметричного тонкостенного поперечного сечения  $i$ -го стержня арки при  $(k-1)$ -м шаге нагружения;  $E_{ij}^{(k)}$  – эквивалентный модуль деформаций для  $j$ -го поперечного сечения  $i$ -го стержня арки, учитывающий влияние деформаций сдвига, сжимаемость оси стержня и развитие пластических деформаций для  $k$ -го шага нагружения;  $M_{ij}^{o(k)}$  и  $N_{ij}^{o(k)}$  – изгибающий момент и продольная сила, возникающие в  $j$ -м сечении  $i$ -го стержня арки от действия внешней нагрузки в основной системе при  $k$ -м шаге нагружения без учета усилий, возникающих в связях сдвига и поперечных связях.

Выражение для определения  $E_{ij}^{(k)}$  было получено и опубликовано автором данной статьи ранее [9]:

$$E_{ij}^{(k)} = M_{ij}^{(k-1)} h_{ij} (1 - \varepsilon_{ija}^{(k-1)}) / [(\Delta \varepsilon_{ij}^{(k-1)} - \gamma_{yij}^{(k-1)} h_{ij} Q_{yij}'^{(k-1)}) J_{xij}], \quad (4)$$

где  $M_{ij}^{(k-1)}$  – изгибающий момент в  $j$ -м сечении  $i$ -го стержня арки, возникающий при  $(k-1)$ -м шаге нагружения;  $h_{ij}$  – высота  $j$ -го поперечного сечения  $i$ -го стержня арки;  $\Delta \varepsilon_{ij}^{(k-1)} = \varepsilon_{ij0}^{(k-1)} - \varepsilon_{iju}^{(k-1)}$ ;  $\gamma_{yij}^{(k-1)}$  – угол сдвига на  $j$ -м участке  $i$ -го стержня арки от единичной поперечной силы при  $(k-1)$ -м шаге нагружения;  $Q_{yij}'^{(k-1)}$  – первая производная от поперечной силы, действующей в  $j$ -м сечении  $i$ -го стержня арки при  $(k-1)$ -м шаге нагружения, которая в конечно-разностной форме имеет вид:

$$Q_{yij}'^{(k-1)} \approx (Q_{yi,j+1}^{(k-1)} - Q_{yi,j-1}^{(k-1)}) / (2\phi). \quad (5)$$

Учет изменения жесткости швов  $\xi_{ij}^{(k)}$  и  $\eta_{ij}^{(k)}$  за пределами упругости осуществляется аналогично [8].

В (1) для определения центральных конечных разностей используются выражения [6]:

$$\Delta S_{ij}^{(k)} = (S_{i,j+1}^{(k)} - S_{i,j-1}^{(k)}) / 2,$$

$$\Delta p_{ioj}^{(k)} = (p_{i,j+1}^{(k)} - p_{i,j-1}^{(k)}) / 2,$$

$$\Delta^2 T_{ij}^{(k)} = T_{i,j+1}^{(k)} - 2T_{ij}^{(k)} + T_{i,j-1}^{(k)}, \quad (6)$$

$$\Delta^3 S_{ij}^{(k)} = (S_{i,j+2}^{(k)} - 2S_{i,j+1}^{(k)} + 2S_{i,j-1}^{(k)} - S_{i,j-2}^{(k)}) / 2,$$

$$\Delta^5 S_{ij}^{(k)} = (S_{i,j+3}^{(k)} - 4S_{i,j+2}^{(k)} + 5S_{i,j+1}^{(k)} -$$

$$- 5S_{i,j-1}^{(k)} + 4S_{i,j-2}^{(k)} - S_{i,j-3}^{(k)}) / 2.$$

При известной функциональной зависимости между напряжениями и деформациями  $\sigma = f(\varepsilon)$  для материала стержней арки краевые линейные относительные деформации в  $j$ -м сечении  $i$ -го стержня арки при  $(k-1)$ -м шаге нагружения являются функциями усилий

$$\varepsilon_{ij0}^{(k-1)} = \varepsilon_{ij0}^{(k-1)} (M_{xij}^{ins(k-1)}, P_{ij}^{ins(k-1)}), \quad (7)$$

$$\varepsilon_{iju}^{(k-1)} = \varepsilon_{iju}^{(k-1)} (M_{xij}^{ins(k-1)}, P_{ij}^{ins(k-1)}), \quad (8)$$

где  $M_{xij}^{ins(k-1)}$  – главный момент эпюры нормальных напряжений относительно центра тяжести  $j$ -го поперечного сечения  $i$ -го стержня арки, возникающий при  $(k-1)$ -м шаге нагружения арки;  $P_{ij}^{ins(k-1)}$  – главный вектор эпюры нормальных напряжений в этом же сечении при  $(k-1)$ -м шаге нагружения арки.

Краевые деформации  $\varepsilon_{ij0}^{(k-1)}$  и  $\varepsilon_{iju}^{(k-1)}$  определяются из решения системы уравнений равновесия для  $j$ -го поперечного сечения  $i$ -го стержня арки:

$$\begin{aligned} M_{xij}^{ins(k-1)}(\varepsilon_{ij0}^{(k-1)}, \varepsilon_{iju}^{(k-1)}) &= M_{ij}^{(k-1)}, \\ P_{ij}^{ins(k-1)}(\varepsilon_{ij0}^{(k-1)}, \varepsilon_{iju}^{(k-1)}) &= N_{ij}^{(k-1)}, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $N_{ij}^{(k-1)}$  – продольная сила, действующая в  $j$ -м поперечном сечении  $i$ -го стержня арки и возникающая при  $(k-1)$ -м шаге нагружения.

Усилия, действующие в  $j$ -м поперечном сечении  $i$ -го стержня арки, находятся из выражений:

$$M_{xij}^{ins(k-1)} = \sum_{k_1=0}^u D_{ijk_1}^{(k-1)} \sigma_{ijk_1}^{(k-1)} + \sum_{v=0}^c K_{ijv}^{(k-1)} \sigma_{ijv}^{(k-1)}, \quad (10)$$

$$P_{ij}^{ins(k-1)} = \sum_{k_1=0}^u C_{ijk_1}^{(k-1)} \sigma_{ijk_1}^{(k-1)} + \sum_{v=0}^c U_{ijv}^{(k-1)} \sigma_{ijv}^{(k-1)}, \quad (11)$$

где  $\sigma_{ijk_1}^{(k-1)}$  – нормальное напряжение в  $k_1$ -м волокне плоской стенки  $j$ -го поперечного сечения  $i$ -го стержня, определяемое по известной диаграмме «напряжения – относительные деформации» в зависимости от величины линейной относительной деформации  $k_1$ -го волокна  $i$ -го стержня  $\varepsilon_{ijk_1}^{(k-1)}$ , которая определяется по формуле:

$$\varepsilon_{ijk_1}^{(k-1)} = a_{ijk_1} \varepsilon_{ij0}^{(k-1)} + b_{ijk_1} \varepsilon_{iju}^{(k-1)}, \quad (12)$$

здесь  $a_{ijk_1}$  и  $b_{ijk_1}$  – коэффициенты линейной интерполяции при разбиении стенки ветви по высоте на  $u$  равных частей;  $D_{ijk_1}^{(k-1)}$ ,  $C_{ijk_1}^{(k-1)}$  – коэффициенты линейной интерполяции эпюры нормальных напряжений в плоской стенке  $j$ -го поперечного сечения  $i$ -го стержня;  $\sigma_{ijv}^{(k-1)}$  – нормальное напряжение в  $v$ -м волокне цилиндрической полки  $j$ -го поперечного сечения  $i$ -го стержня, определяемое по известной диаграмме «напряжения – относительные деформации» в зависимости от величины линейной относительной деформации  $v$ -го волокна  $j$ -го поперечного сечения  $i$ -го стержня  $\varepsilon_{ijv}^{(k-1)}$ ;  $K_{ijv}^{(k-1)}$  и  $U_{ijv}^{(k-1)}$  – коэффициенты интерполяции эпюры нормальных напряжений в цилиндрической полке  $j$ -го поперечного сечения  $i$ -го стержня.

Относительная деформация  $\varepsilon_{ijv}^{(k-1)}$  определяется с учетом влияния искажения формы  $j$ -го поперечного сечения  $i$ -го стержня арки:

$$\varepsilon_{ijv}^{(k-1)} = \widehat{\varepsilon}_{ij0}^{(k-1)} - \xi_{ijv}^{(k-1)} / R, \quad (13)$$

где  $\widehat{\varepsilon}_{ij0}^{(k-1)}$  – линейная относительная деформация волокна, расположенного на пересечении плос-

кости стенки и срединной поверхности цилиндрической полки;  $\xi_{ijv}^{(k-1)}$  – радиальное смещение узловой точки  $v$  цилиндрической полки в  $j$ -м поперечном сечении  $i$ -го стержня при  $(k-1)$ -м шаге нагружения арки.

Определение  $\xi_{ijv}^{(k-1)}$  осуществляется на основе использования упругого решения, полученного в [1] для чистого изгиба и распространенного в [2] на поперечный изгиб. Дифференциальное уравнение четвертого порядка изгиба цилиндрической полки стержня арки заменяется системой линейных алгебраических уравнений в конечных разностях. Полка по ширине делится на  $s$  равных частей длиной  $b_1$ .

Система уравнений для определения радиальных смещений узловых точек  $v$  верхней цилиндрической полки запишется в виде:

$$\Delta^4 \xi_{ijv}^{(k-1)} / b_1^4 + 4\alpha_{ijv}^{(k-1)} \xi_{ijv}^{(k-1)} = 4\alpha_{ijv}^{(k-1)} \widehat{\varepsilon}_{ij0}^{(k-1)} R, \quad (14)$$

$$v = 0..c,$$

где  $\Delta^4 \xi_{ijv}^{(k-1)}$  – центральная конечная разность четвертого порядка, равная:

$$\Delta^4 \xi_{ijv}^{(k-1)} = \xi_{ij,v+2}^{(k-1)} - 4\xi_{ij,v+1}^{(k-1)} + 6\xi_{ijv}^{(k-1)} - 4\xi_{ij,v-1}^{(k-1)} + \xi_{ij,v-2}^{(k-1)}, \quad (15)$$

$$4\alpha_{ijv}^{(k-1)} = \frac{\widehat{E}_{ij0}^{(k-1)}}{E_{ijv}^{equ(k-1)}} \cdot \frac{12(1 - \widehat{\mu}_{ij0}^{(k-1)} \mu_{ijv}^{equ(k-1)})}{t_f^2 R^2}, \quad (16)$$

здесь  $\widehat{E}_{ij0}^{(k-1)}$  и  $\widehat{\mu}_{ij0}^{(k-1)}$  – модуль деформаций и коэффициент Пуассона при  $(k-1)$ -м шаге нагружения для волокна, расположенного на пересечении плоскости стенки и срединной поверхности верхней цилиндрической полки;  $t_f$  – толщина верхней цилиндрической полки;

$$\widehat{\mu}_{ij0}^{(k-1)} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\widehat{E}_{ij0}^{(k-1)} (1 - 2\mu_o)}{E_o}, \quad (17)$$

$$\mu_{ijv}^{equ(k-1)} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cdot \frac{E_{ijv}^{equ(k-1)} (1 - 2\mu_o)}{E_o}, \quad (18)$$

$E_{ijv}^{equ(k-1)}$  – эквивалентный модуль деформаций, учитывающий неупругие деформации цилиндрической полки в  $v$ -м продольном сечении цилиндрической полки  $j$ -го поперечного сечения  $i$ -го стержня при  $(k-1)$ -м нагружении арки и равный

$$E_{ijv}^{equ(k-1)} = \frac{M_{ijv}^{(k-1)} E_o [3 + \nu_1 (1 - 2\nu_1) \mu_o]}{[\nu_1 (1 - 4\mu_o + 4\mu_o^2) - 3(1 - 2\mu_o)] M_{ijv}^{(k-1)} + \Delta \varepsilon_{ijv}^{(k-1)} t_f^2 E_o}, \quad (19)$$

где  $\Delta \varepsilon_{ijv}^{(k-1)}$  – разность краевых деформаций в продольном сечении цилиндрической полки, проходящем через узловую точку  $v$ ;

$$\nu_1 = \frac{\widehat{E}_{ij0}^{(k-1)}}{E_o}. \quad (20)$$

Аналогично составляется выражение для верхней цилиндрической полки.

Выражение для определения  $E_{ijv}^{equ(k-1)}$  получено автором данной статьи аналогично тому, как им было получено выражение для определения  $E_{ij}^{equ(k)}$  в [9].

Первоначально расчет по формуле (19) осуществляется по параметрам напряженно-деформированного состояния, полученным при  $(k-2)$ -м шаге нагружения арки, а затем по уточненным деформациям, полученным из решения системы уравнений (9), вычисляется по (19)  $E_{ijv}^{equ(k-1)}$ .

Учет деформированного состояния двухшарнирной арки осуществляется подстановкой в выражения для параметров  $g_{io}^{(k)}$  и  $p_{io}^{(k)}$  следующих выражений:

$$M_{ij}^{o(k)} = H_{oi}^{(k)} [\sin \theta_j (R - w_{ij}^{(k)}) + v_{ij}^{(k)} \cos \theta_j] - V_{oi}^{(k)} [R(1 - \cos \theta_j) + w_{ij}^{(k)} \cos \theta_j + v_{ij}^{(k)} \sin \theta_j] + M_{ij}^{G(k)}, \quad (21)$$

$$N_{ij}^{o(k)} = \sin(\theta_j + \beta_{ij}^{(k)}) [H_{ij}^{o(k)} + \text{ctg}(\theta_j + \beta_{ij}^{(k)}) (V_{oi}^{(k)} - G_{ij}^{(k)})], \quad (22)$$

где  $H_{io}^{(k)}$  и  $V_{io}^{(k)}$  – горизонтальная и вертикальная опорные реакции в узловой точке  $i$ -го стержня арки с номером  $j = 0$ , определяемые по формулам:

$$H_{io}^{(k)} = N_{io}^{(k)} \cos(\alpha_{io}^{(k)} - \beta_{io}^{(k)}) + Q_{iy0}^{(k)} \sin(\alpha_{io}^{(k)} - \beta_{io}^{(k)}), \quad (23)$$

$$V_{io}^{(k)} = N_{io}^{(k)} \sin(\alpha_{io}^{(k)} - \beta_{io}^{(k)}) - Q_{iy0}^{(k)} \cos(\alpha_{io}^{(k)} - \beta_{io}^{(k)}), \quad (24)$$

здесь  $\alpha_{io}^{(k)}$  – угол между касательной к оси  $i$ -го стержня арки в узловой точке с номером  $j = 0$  и полярной осью;  $N_{io}^{(k)}$  и  $Q_{iy0}^{(k)}$  – продольная и поперечная силы в узловой точке с номером  $j = 0$   $i$ -го стержня арки;  $w_{ij}^{(k)}$  и  $v_{ij}^{(k)}$  – перемещения центра тяжести  $j$ -го сечения  $i$ -го стержня арки соответственно в радиальном и касательном направлениях к оси  $i$ -го стержня недеформированной арки;  $\theta_j$  – угловая координата  $j$ -го сечения недеформированного стержня составной арки;  $\beta_{ij}^{(k)}$  – угол поворота  $j$ -го сечения  $i$ -го стержня арки; где  $G_{ij}^{(k)}$  и  $M_{ij}^{G(k)}$  – главный вектор и главный момент внешней нагрузки, приходящиеся на  $i$ -й стержень арки, отделенный  $j$ -м сечением.

Для определения  $w_{ij}^{(k)}$  и  $v_{ij}^{(k)}$  используются известные дифференциальные зависимости [4], представленные в конечно-разностной форме,

$$\Delta^2 w_{ij}^{(k)} / \phi^2 + w_{ij}^{(k)} = - \frac{R^2 M_{ij}^{(k)}}{E_{ij}^{equ} J_{xij}}, \quad (25)$$

$$\beta_{ij}^{(k)} = (\Delta w_{ij}^{(k)} / \phi + v_{ij}^{(k)}) / R, \quad (26)$$

$$\Delta v_{ij}^{(k)} / \phi - w = 0, \quad (27)$$

где  $\Delta v_{ij}^{(k)}$ ,  $\Delta w_{ij}^{(k)}$  и  $\Delta^2 w_{ij}^{(k)}$  – центральные конечные разности первого и второго порядка, равные:

$$\Delta v_{ij}^{(k)} = v_{i+1,j}^{(k)} - v_{i-1,j}^{(k)} / 2, \quad (28)$$

$$\Delta w_{ij}^{(k)} = w_{i+1,j}^{(k)} - w_{i-1,j}^{(k)} / 2, \quad (29)$$

$$\Delta^2 w_{ij}^{(k)} = w_{i,j+1}^{(k)} - 2w_{ij}^{(k)} + w_{i,j-1}^{(k)}, \quad (30)$$

$M_{ij}^{(k)}$  – суммарный изгибающий момент в  $j$ -м поперечном сечении  $i$ -го стержня основной системы, равный:

$$M_{ij}^{(k)} = M_{ij}^{o(k)} + M_{ij}^{T(k)} + M_{ij}^{S(k)}, \quad (31)$$

здесь  $M_{ij}^{T(k)}$  – изгибающий момент в  $j$ -м поперечном сечении  $i$ -го стержня, возникающий от действия усилий в связях сдвига, равный:

$$M_{ij}^{T(k)} = -T_{i-1,j}^{(k)} b_{i-1,j} - T_{ij}^{(k)} a_{ij}, \quad (32)$$

$M_{ij}^{S(k)}$  – изгибающий момент в  $j$ -м поперечном сечении  $i$ -го стержня, возникающий от действия усилий в поперечных связях, равный:

$$M_{ij}^{S(k)} = - \int \int q_i^{(k)} ds^2 + \int \int q_{i-1}^{(k)} ds^2 = -S_{ij}^{(k)} + S_{i-1,j}^{(k)}, \quad (33)$$

здесь  $q_i^{(k)}$  – усилия в поперечных связях  $i$ -го шва, отнесенные к единице длины стержня, при  $k$ -м шаге нагружения.

Совместное решение вышеприведенных уравнений с учетом граничных условий позволяет выполнить деформационный расчет арки за пределом упругости.

С учетом ранее принятых обозначений проварьированная система уравнений равновесия с учетом влияния сдвигающих сил и реакций поперечных связей примет вид:

$$\begin{aligned} & [H_{oi} + (V_{oi} - G_{ij}) \text{ctg}(\theta_j + \beta_{ij})] \cos(\theta_j + \beta_{ij}) \delta \beta_{ij} + \\ & + [\delta H_{oi} - \csc^2(\beta_{ij} + \theta_j) (V_{oi} - G_{ij}) \delta \beta_{ij}] \sin(\theta_j + \beta_{ij}) + \delta N_{ij}^T - \delta P_{ij}^{ins} = 0, \\ & \delta H_{oi} [\sin \theta_j (R - w_{ij}) + v_{ij} \cos \theta_j] - \\ & - H_{oi} (\sin \theta_j \delta w_{ij} - \cos \theta_j \delta v_{ij}) - \\ & - V_{oi} (\cos \theta_j \delta w_{ij} + \sin \theta_j \delta v_{ij}) + \\ & + \delta M_{ij}^T + \delta M_{ij}^S + \delta M_{xij}^{ins} = 0, \\ & i = 1..(n+1), ; j = 0..m, \end{aligned} \quad (34)$$

где

$$\delta N_{ij}^T = -\delta T_{ij} + \delta T_{i-1,j},$$

$$\delta M_{ij}^T = -\delta T_{i-1,j} b_{i-1,j} + \delta T_{ij} a_{ij},$$

$$\delta T_{ij} = \sum_{i=1}^{n+1} \left( \frac{\partial T_{ij}}{\partial \varepsilon_{ij0}} \delta \varepsilon_{ij0} + \frac{\partial T_{ij}}{\partial \varepsilon_{iju}} \delta \varepsilon_{iju} + \frac{\partial T_{ij}}{\partial w_{ij}} \delta w_{ij} + \frac{\partial T_{ij}}{\partial v_{ij}} \delta v_{ij} \right), \quad (35)$$

$$\delta M_{ij}^s = -\delta S_{i,j} + \delta S_{i-1,j},$$

$$\delta S_{ij} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial S_{ij}}{\partial \varepsilon_{ij0}} \delta \varepsilon_{ij0} + \frac{\partial S_{ij}}{\partial \varepsilon_{iju}} \delta \varepsilon_{iju} + \frac{\partial S_{ij}}{\partial w_{ij}} \delta w_{ij} + \frac{\partial S_{ij}}{\partial v_{ij}} \delta v_{ij} \right).$$

Вариации внутренних сил определяются по формулам:

$$\delta M_{xij}^{ins} = \frac{\partial M_{xij}^{ins}}{\partial \varepsilon_{ij0}} \delta \varepsilon_{ij0} + \frac{\partial M_{xij}^{ins}}{\partial \varepsilon_{iju}} \delta \varepsilon_{iju}, \quad (36)$$

$$\delta P_{ij}^{ins} = \frac{\partial P_{ij}^{ins}}{\partial \varepsilon_{ij0}} \delta \varepsilon_{ij0} + \frac{\partial P_{ij}^{ins}}{\partial \varepsilon_{iju}} \delta \varepsilon_{iju}. \quad (37)$$

В (35) следует иметь в виду, что  $\tau_{n+1} = 0$  и  $q_{n+1} = 0$ . Определитель системы (35), составленный с учетом (35)–(37) из коэффициентов при вариациях независимых переменных решаемой задачи, представляет собой функционал потери устойчивости. Обращение в нуль этого функционала или смена знака его численного значения при подстановке в него параметров напряженно-деформированного состояния, полученного при решении системы уравнений (1), свидетельствует о критическом состоянии составной арки. Если устойчивость арки обеспечена, то производится перерасчет величины  $E_{ij}^{equ(k)}$  для следующего этапа нагружения арки и вновь производится ее деформационный расчет.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бидерман В. Л. Плоский изгиб тонкостенных кривых профилей // Расчеты на прочность в машиностроении / Под ред. С. Д. Пономарева. Т. 1. М.: Машгиз, 1956. С. 448–465.
2. Бидерман В. Л. Механика тонкостенных конструкций. Статика. М.: Машиностроение, 1977. 488 с. (Б-ка расчетчика)
3. Биргер И. А. Общие алгоритмы решения задач теории упругости, пластичности и ползучести // Успехи механики деформируемых сред. М.: Наука, 1975. С. 61–73.
4. Динник А. Н. Продольный изгиб. Кручение. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1955. 392 с.
5. Заборов В. И. Прочность и устойчивость составных арок // Научное сообщение ЦНИИС. Вып. 12. М.: Стройиздат, 1954. 70 с.
6. Мысовских И. П. Лекции по методам вычислений: Учебное пособие. 2-е изд., испр. и доп. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1998. 472 с.
7. Ржаницын А. Р. Устойчивость равновесия упругих систем. М.: Гостехиздат, 1955. 475 с.
8. Рочев А. А. Исследование устойчивости стальных перфорированных внецентренно сжатых стержней в упруго-пластической стадии // Металлические конструкции и испытания сооружений: Межвуз. тематич. сб. тр. № 1(134). Л.: ЛИСИ, 1977. С. 119–123.
9. Рочев А. А. Нелинейная теория расчета сквозных упругопластических статически неопределимых рамных систем // Доклады 58-й конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета: В 3 ч. Ч. 1. СПб.: СПбГАСУ, 2001. С. 93–94.

**ГАЛИНА АНДРЕЕВНА ШКЛЯРЕВИЧ**

доктор биологических наук, профессор кафедры зоологии и экологии эколого-биологического факультета ПетрГУ  
*gash@psu.karelia.ru*

**НИНА НИКОЛАЕВНА НЕМОВА**

доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, профессор, директор Института биологии КарНЦ РАН, заведующий лабораторией экологической биохимии Института биологии, заведующий кафедрой молекулярной биологии, биологической и органической химии эколого-биологического факультета ПетрГУ  
*nemova@krc.karelia.ru*

## **БИОТЕХНОЛОГИЯ ВОСПРОИЗВОДСТВА И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БУРЫХ ВОДОРΟΣЛЕЙ-МАКРОФИТОВ**

В настоящей статье выполнен обзор опубликованных научных работ, посвященных проблемам и перспективам марикультуры бурых водорослей-макрофитов.

Ключевые слова: водоросли-макрофиты, акватория Белого моря, марикультура, температура, соленость, адаптации, биохимический состав

К настоящему времени накопилась обширная литература как по вопросам биологии и экологии промысловых видов водорослей-макрофитов (см., например, [9]), так и по вопросам биотехнологии воспроизводства и хозяйственного использования сырьевых запасов морских водорослей. Очень актуально сейчас решение проблем создания технологических экосистем и связанные с этим разработки морских биотехнологий, включая приполярную марикультуру.

Марикультура (морская аквакультура) в широком смысле – активное вмешательство в управление биологическими процессами в морской среде. Эти процессы могут иметь различный характер: от биологической мелиорации (прореживание природных зарослей и пр.) до искусственного выращивания морских гидробионтов и получения новых сортов организмов с заданными, необходимыми человеку, свойствами.

Эксплуатация природных зарослей водорослей, преимущественно ламинариевых, в северных морях началась довольно давно. В начале XX века появились первые предприятия по переработке ламинарии, специализирующиеся на получении йода и альгината.

В Белом и Баренцевом морях проводится экспериментальное выращивание водорослей для выяснения механизмов репродукции, адаптации и регуляции роста, а также накопления биологически активных веществ в условиях высоких широт. Исследования проводятся с привлечением методов биохимии, физиологии, цитологии; анализируется влияние плантации на гидрохимические характеристики среды; изучается обрастание культивируемых макрофитов эпибионтами. В последние годы исследовалась возможность ведения бикультуры, то есть выращивания на ламинариевых плантациях и других видов гидробионтов, в том числе фукусовых водорослей и двустворчатых моллюсков *Mytilus edulis*.

Активные промысел и использование фукусовых водорослей начались только в последние годы, после того как было показано, что они, как и ламинариевые, обладают лечебными свойствами и могут широко применяться в медицине и пищевой промышленности. Ранее фукоиды использовались только как сырье для производства йода, пищевая добавка в корм скоту и в качестве удобрений в сельском хозяйстве.

Сотрудниками лаборатории альгологии Мурманского морского биологического института (ММБИ) при участии в исследовательских работах сотрудников других организаций (ПИНРО, ВНИРО, ИНБЮМ) была создана биотехнология культивирования ламинарии сахаристой в условиях Баренцева моря (работы проводились под руководством В. Н. Макарова) [6]. Урожай, собранный с первой опытно-промышленной плантации ламинарии в губе Дальнезеленецкая Баренцева моря, показал, что ламинариевые хозяйства в условиях Севера могут быть высококорентабельными. Ниже приводится краткое изложение биотехнологии ведения культуры *Laminaria saccharina* [6].

### БИОТЕХНОЛОГИЯ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ

Выращивание ламинарии производится в поверхностных слоях воды от 0,5 до 6–8 м на плантационных установках, представляющих собой систему из синтетических веревок и канатов, закрепленных с помощью якорей из бетонных массивов или каменных глыб и поддерживаемых в толще воды с помощью поплавков (рис. 1).

В качестве субстрата для выращивания ламинарии используются веревки, на которые производится посев зооспор ламинарии. Зооспоры ламинарии получают от зрелых спороносных растений, которые отбирают из естественных зарослей или с плантации. Для получения зооспор осуществляется стимулирование их выхода из спорангиев. Процесс стимулирования заключается в выдерживании спороносной ламинарии при определенном режиме вне воды. После окончания стимулирования ламинарию погружают в емкость с морской водой, где в течение часа происходит интенсивный выход зооспор. Полученную суспензию разбавляют морской водой, доводят до расчетной концентрации и разливают в посевные емкости. Затем в посевную емкость с суспензией зооспор помещают субстраты, которые выдерживают в ней в течение суток. За это время зооспоры успевают осесть и закрепиться на субстратах. После окончания посева субстраты размещаются на плантации. Дальнейшее участие человека в процессе культивирования заключается в регулировании плавучести плантационных установок и поддержании их целостности.

### ВЫБОР МЕСТА ДЛЯ ПЛАНТАЦИИ

Установки для выращивания ламинарий следует располагать в полузащищенных бухтах с хорошим водообменом за счет приливно-отливных течений и относительно защищенных от воздействия штормовых волн на глубине от 10–15 до 30 м, с ровным рельефом дна, с преобладанием илисто-песчаного грунта (для удержания якорей). Глубина в местах размещения установок должна быть такой, чтобы исключить касание субстратами

грунта, иначе субстраты будут перепутываться, что затруднит уход за плантацией и приведет к потере урожая. Размещение установок на больших глубинах приведет к их удорожанию и затруднит водолазный контроль за техническим состоянием конструкций. В случае отсутствия опасности срыва установок льдом они могут быть размещены на участках с глубиной 10 м; если такая опасность существует, то установки следует размещать на глубине 15 м и более, чтобы имелась возможность притапливать их на зимний период.

### ПОДГОТОВКА ЕМКОСТЕЙ ДЛЯ ПОСЕВА

Для посева предлагается использовать любые емкости из нетоксичного материала: ванны из нержавеющей стали или пластмассы. Следует защищать субстраты от воздействия прямых солнечных лучей. Для предупреждения интоксикации спор растворимыми веществами, которые могут быть в материале емкости, последние тщательно промывают и вымачивают в течение 1–2 недель с обязательной сменой воды не менее одного раза в сутки. Еще лучше полностью погрузить емкости на этот период в проточную воду или в море.

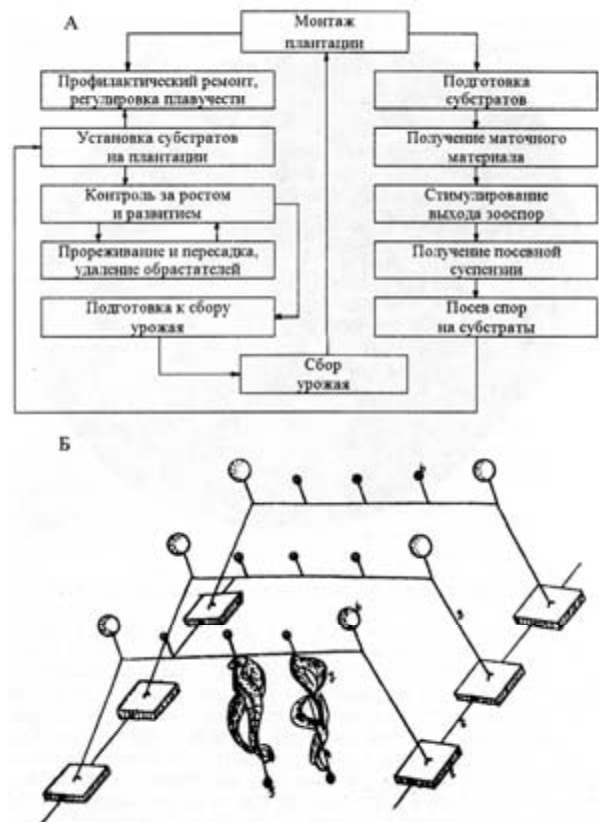


Рис. 1. Схема биотехники культивирования (А) и схема плантации (Б):

1 — бетонные массивы массой 2 т; 2 — трос металлический; 3 — трос капроновый; 4 — субстраты длиной 5 м и диаметром 5 мм; 5 — груз свинцовый массой 0,5 кг; 6 — поплавки; 7 — талломы ламинарии [6]

## ПОДГОТОВКА СУБСТРАТОВ

Подготовка субстратов заключается в их вымачивании и стерилизации. В качестве субстратов для выращивания ламинарии используют сеточник из капрона или других синтетических материалов диаметром около 5 мм и длиной 5 м. Вымачивание можно производить в проточной морской или пресной воде, сменяемой не реже одного раза в сутки. Это необходимо для предупреждения интоксикации спор растворимыми веществами, остающимися на капроновом волокне после его производства. Затем субстраты в течение нескольких (3–7) дней стерилизуют для удаления осевших на них микроорганизмов путем подсушивания на солнце или прогрева в воде при температуре 70–80 °С в течение 2 ч или кратковременного погружения в кипящую воду. При значительном количестве бактерий на субстратах элиминация ламинарии на ранних стадиях развития резко возрастает, поэтому стерилизации субстратов следует уделять особое внимание.

## ОТБОР МАТОЧНЫХ РАСТЕНИЙ

Отбираются крупные здоровые растения со зрелыми спороносными пятнами. Спороносное пятно в зрелом состоянии имеет темно-коричневую окраску в проходящем и отраженном свете и заметно выступает над поверхностью пластины. Верхняя часть зрелого пятна может иметь более светлый оттенок в связи с начавшимся выходом спор. Маточные растения необходимо предохранять от воздействия прямых солнечных лучей, от атмосферных осадков и обсыхания, под влиянием которых споры могут быстро потерять жизнеспособность.

## СТИМУЛИРОВАНИЕ ВЫХОДА ЗООСПОР

Заключается в выдерживании спороносных растений на воздухе. Стимулирование маточных растений проводят на вешалах в прохладном помещении с хорошей вентиляцией, с оптимальной температурой 10 °С, допустимой является температура 5–15 °С. Отобранные маточные растения или их части со спороносными пятнами промывают профильтрованной морской водой и развешивают на вешалах так, чтобы растения не соприкасались друг с другом. Продолжительность стимулирования зависит от температуры, влажности, подвижности воздуха в помещении, и в каждом конкретном случае подбирается определенный режим в результате контроля за динамикой выхода спор. В большинстве случаев хороший выход спор начинается не ранее чем через 12 ч после начала стимулирования. Длительность стимулирования можно в значительной мере увеличить (до 3–4 сут.), если пластины ламинарии после исчезновения капельной влаги скрутить в трубку, проложив бумагой, и поместить в холодное помещение при температуре, близкой к 0–5 °С.

## КОНТРОЛЬ ЗА ВЫХОДОМ СПОР

На спороносное пятно у 3–5 растений пипеткой наносится несколько капель морской воды. Спустя 15 мин капли собирают, переносят на предметное стекло и просматривают под микроскопом. Обычно контроль ведется при увеличении в 120 раз. Выход спор считается нормальным, если в поле зрения в большинстве капель находится более 100 спор.

Перед проведением посева полезно осуществить контрольное стимулирование ламинарии для определения режима стимулирования и расчета необходимого количества маточных растений. Расчет проводится следующим образом. После стимулирования части растений с определенной площадью спороносного пятна помещают в отдельные емкости и заливают морской водой. Через час кусочки вынимают из емкости, а суспензию доводят до определенного объема. С помощью камеры Горяева определяют количество спор в единице объема, и затем подсчитывают среднее количество спор, которое можно получить от одного растения. На основе опыта культивирования известно, что нормальным является посев, когда на 1 мм<sup>2</sup> верхней поверхности контрольного стекла насчитывается 50–100 спор (контролем служит предметное стекло, закладываемое вместе с субстратами в посевную емкость). Если предположить, что споры оседают на веревочный субстрат так же, как на стекло, то на полезной площади одного субстрата, равной его диаметру, умноженному на его длину (при длине субстратов 5,5 м и диаметре 5 мм она составит  $2,75 \cdot 10^4$  мм), должно находиться 1,4–2,8 млн спор.

Определив, сколько зооспор дает одно растение, можно рассчитать, какое количество растений необходимо для проведения посева на определенное число субстратов. Исследования показывают, что зрелое слоевище ламинарии сахаристой при правильно проведенном стимулировании может давать около 130 тыс. спор с 1 мм<sup>2</sup> спороносного пятна. Средняя площадь спороносного пятна составляет 50–60 тыс. мм<sup>2</sup>. Следовательно, одно растение дает около  $65\text{--}78 \cdot 10^8$  спор, что является достаточным для засева 2300–2500 субстратов длиной 5,5 м. Однако добиться столь высокого выхода спор не всегда удается. Кроме того, часть спор оседает на дне и стенках емкости, в которой производится посев, часть спор не закрепляется на субстрате, поэтому приходится увеличивать количество маточных растений по отношению к теоретически рассчитанной величине в 10–20 раз.

## ПОСЕВ СПОР НА ИСКУССТВЕННЫЕ СУБСТРАТЫ

Сразу после окончания стимулирования производится посев спор на заранее подготовленные веревочные субстраты. В экспериментах в качестве субстрата наилучшими оказались 5-метровые отрезки капронового сеточника диа-



метром 5 мм. Посев спор можно проводить различными способами. Наиболее простым является способ, когда субстраты и стимулированная ламинария укладываются в емкости для посева слоями и заливаются морской водой. Однако этот способ не позволяет учесть концентрацию осевших спор, что ведет к нестабильности результатов посева. Второй, часто применяемый, способ предусматривает предварительное получение суспензии спор и доведение ее до расчетной концентрации, после чего в суспензию опускаются заранее подготовленные субстраты. Этот способ более экономичен, так как позволяет полно и эффективно использовать маточный материал и регулировать концентрацию осевших спор.

Иногда используется посев на промежуточные субстраты с последующей пересадкой проростков. В качестве субстрата часто применяют резиновые полосы. После того как проростки достигнут не менее 15–20 см длины, их снимают с резиновых полос. Полученная рассада вплетается между прядями капроновой веревки пучками по 3–5 экземпляров через каждые 10 см. Процесс пересадки весьма трудоемок, однако в результате оптимального распределения водорослей на субстрате обеспечиваются высокие урожаи. В качестве промежуточного субстрата можно использовать капроновые нити, которые наматываются в один слой на специальные рамы. После того как ламинария на нитях достигнет в длину 2–5 мм, нити наматываются на основные капроновые веревки, или отрезки нитей длиной 3–5 см вставляются между прядями веревки через каждые 10 см. Ламинария, растущая на нитях, вскоре прочно прикрепится к основным субстратам.

#### **УХОД ЗА ПЛАНТАЦИЕЙ. ПЕРВЫЙ ГОД ВЫРАЩИВАНИЯ**

После размещения субстратов с веревками на морских установках необходимо проводить периодический осмотр и уход за ними. В районах, где образуется ледовый покров, перед ледоставом установки необходимо заглубить, чтобы предупредить их повреждение при подвижке льда. Весной, как только море освободится от льда, необходимо сразу же поднять установки к поверхности моря.

Когда проростки достигнут длины 10–15 см, можно приступать к их прореживанию и пересадке. Одновременно с субстратов удаляется и основная масса организмов-обрастателей. Субстраты, на которых проростки отсутствуют или их очень мало, следует снять с установки и на их место закрепить новые, с вплетенными проростками. Пересадка ламинарии производится пучками по 3–5 экземпляров через каждые 10 см. Для пересадки желательно подбирать растения на одном субстрате приблизительно одинаковых размеров. При прореживании и пересадке необ-

ходимо предохранять проростки от прямых солнечных лучей и высыхания.

Наиболее крупные растения с высокими темпами развития следует пересаживать на отдельные субстраты для создания маточного фонда. При снятии рассады с субстратов и пересадке необходимо обращаться с растениями осторожно, чтобы избежать повреждений. В летний период субстраты с проростками периодически очищают от обрастателей. Когда ламинария на субстратах достигнет длины 20 см, обрастатели можно не удалять, так как на рост растений такого размера они уже не оказывают существенного влияния. Техническое обслуживание установок плантации производится согласно инструкции по их эксплуатации.

#### **ВТОРОЙ ГОД ВЫРАЩИВАНИЯ ЛАМИНАРИИ**

В тех районах, где образуется ледяной покров, осенью установки заглубляются для предупреждения их повреждения при подвижках льда, а весной, после схода льда, они вновь поднимаются к поверхности. В зимних условиях в районах с образованием ледового покрова никаких работ на плантации не производится. В районах, свободных от льда, установки не заглубляются на зимний период. В течение зимы ведется технический контроль за состоянием установок после сильных штормов. Проводить работы на плантации в зимний период чрезвычайно сложно, поэтому следует ограничиться ремонтными работами при серьезных повреждениях плантации.

**Уборку урожая** с плантации можно начинать со второй половины июля (второй год выращивания ламинарии). К этому времени ламинария достигает кондиционных размеров и массы, и на ней практически отсутствуют обрастатели. Ламинария в это время представляет собой высококачественное сырье. Для получения более высокого урожая можно проводить сбор ламинарии в начале осени, когда масса растений достигает наибольшей величины, но к этому времени на пластине появляется значительное количество обрастателей, и качество сырья ухудшается. При более позднем сборе ламинарии неизбежны потери урожая.

На третий год остается только небольшая часть плантации, на которой выращиваются маточные растения для получения высококачественного спороносного материала. После снятия урожая субстраты и горизонтальные канаты очищаются. Выборочно проверяется прочность всех элементов конструкции установок, и делается заключение о возможности их повторного использования.

#### **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ БИОТЕХНОЛОГИИ ВЫРАЩИВАНИЯ ЛАМИНАРИИ**

Одним из путей совершенствования биотехнологии выращивания ламинарии является пе-

реход на одногодичное выращивание в условиях плантации. Одногодичное культивирование ламинариевых водорослей, применяемое в практике водорослеводческих хозяйств в странах Юго-Восточной Азии (Японии, Китае, Северной Корее), а также внедряемое в Приморье, основано на выращивании рассады ламинарии в регулируемых условиях наземных бассейнов и последующей пересадке рассады на плантационные субстраты. Данный способ требует значительных капитальных затрат, сложного оборудования и относительно больших энергозатрат на поддержание температурных и световых условий.

В лаборатории альгологии ММБИ определена возможность и целесообразность использования проростков ламинарии сахаристой из естественных зарослей, что позволяет сократить сроки плантационного выращивания от 5 месяцев до одного года. Кроме того, был разработан и апробирован метод условно одногодичного культивирования ламинарии сахаристой с использованием компактных субстратов. Предлагаемый нами метод компактных субстратов позволяет сократить время плантационного выращивания ламинарии до одного года и при этом отказаться от использования дорогостоящего, требующего квалифицированного обеспечения энергозатратного оборудования наземных бассейнов. Компактные субстраты, разработанные сотрудниками лаборатории альгологии, были изготовлены кооперативом «Плантация» и испытаны на гидродинамическое воздействие на экспериментальной плантации в губе Дальнеземецкая (Баренцево море) осенью 1990 года. Конструктивно субстрат представляет собой плотно упакованный в форме параллелепипеда полипропиленовый канат, уложенный ровными рядами, зафиксированный с помощью двух деревянных щитов, плотно стянутых с помощью стальных шпилек с резьбой и гайками на концах. В одном компактном субстрате упаковано 750 м полипропиленового каната окружностью 30 мм. Масса сухого субстрата – около 70 кг. Испытания показали, что конструкция субстратов отвечает требованиям прочности, так как она выдержала многократные значительные гидродинамические нагрузки, находясь под влиянием сильных штормов. При этом каких-либо повреждений, грозящих целостности субстратов, не обнаружено. Были отмечены некоторые технические недостатки данной конструкции субстратов, которые будут учтены при дальнейшей их доработке и разработке новых.

Другое направление совершенствования биотехнологии выращивания ламинарии, также успешно развиваемое в лаборатории альгологии ММБИ, заключается в получении культуры гаметофитов, которую можно использовать для посева в любое время года, вне сроков естественного спороношения ламинарии, и получать растения ламинарии с определенными химическими и морфологическими свойствами.

Новые знания, получаемые о биологических особенностях ламинарии сахаристой, в частности о ранних стадиях развития, способствуют совершенствованию биотехнологии культивирования объекта. Ранние стадии развития являются наиболее уязвимыми и наиболее важными, так как в конечном итоге они определяют урожай. В последние годы в лаборатории альгологии были получены сведения о влиянии ультрафиолетовой радиации на развитие спор, проростков. Показано, что природные дозы ультрафиолета могут вызывать гибель ламинарии на ранних стадиях развития. С возрастом растений толерантность к его воздействию увеличивается. Это свидетельствует о том, что оптимальным временем для постановки ламинариевой плантации является август – сентябрь, когда интенсивность ультрафиолетовой радиации снижается.

#### ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ НАУЧНОЙ ПРОРАБОТКИ ПРОБЛЕМЫ

Решение проблемы рациональной эксплуатации зарослей ламинарии – сложная многофакторная задача. Многие ее аспекты изучены недостаточно. Например, многолетняя динамика основных количественных характеристик остается практически неизученной. Экологические закономерности формирования урожая в пологе ламинарии в условиях плантационного выращивания представлены и обсуждаются на примере плантации *Laminaria japonica* на Дальнем Востоке и плантации *Laminaria saccharina* в Баренцевом море [10]. На конкретных примерах показано, что пространственная структура полога ламинарии в связи с движением воды и количеством биогенов является ведущим фактором научно обоснованного управления урожаем в марикультуре водорослей [10], [11]. Эти работы, важные с точки зрения развития методологии аквакультуры в целом, требуют своего продолжения.

Остается неизученной генетическая гетерогенность популяций *Laminaria saccharina* с точки зрения селекционной ценности особей, составляющих ту или иную популяцию. На начальных стадиях находятся исследования по криоконсервации репродуктивного материала водорослей, механизмам адаптации водорослей к факторам среды, поиску видов, перспективных для культивирования. Мало сведений о биологии субдоминантов сообществ *Laminaria saccharina*. Требуется продолжения исследования по влиянию ламинариевой плантации на абиотические и биотические комплексы, не проводилось обследования районов, пригодных для размещения водорослевых марихозяйств, без которых можно только ориентировочно, на основе предварительной экспертной оценки, базирующейся на данных о распределении водорослей, судить о пригодности того или иного района для размещения плантаций. Технические разработки конструкций плантаций в нашей стране сделаны

только для нужд водорослевых марихозийств Дальнего Востока (Приморье). В то же время специфика условий северных регионов требует специальных, адаптированных к данным условиям, проектов конструкций плантаций и средств их эксплуатации. Несмотря на то что разработанная и апробированная биотехника культивирования *Laminaria saccharina* в условиях Баренцева моря дает все основания считать перспективным широкомасштабное развитие культивирования ламинарии на Севере, социально-экономическая проработка этой проблемы до сих пор не проведена.

#### ВЕЩЕСТВА, ПОЛУЧАЕМЫЕ ИЗ ЛАМИНАРИИ

При любых биотехнологических работах встает вопрос о рентабельности метода технологии получения конечного продукта. Ламинария представляет ценность как продукт питания и как продуцент альгината, маннита, ряда других биологически активных веществ. Поэтому постоянно возникает вопрос о направленности искусственного культивирования ламинарии: на биомассу или на биологически активные вещества. Но даже при культивировании ламинарии на биомассу стоимость продукта зависит не только от качества пластины, но и от содержания в ней альгината, маннита, витаминов, микроэлементов.

**Маннит.** По содержанию маннита – шестиатомного спирта и его производных – *Laminaria saccharina* превосходит на несколько процентов дальневосточные виды ламинариевых, чем, собственно, и обусловлено ее название: ламинария сахаристая. При высушивании на поверхности талломов появляются иглы маннита, часто принимаемые за поверхностные плесневые образования. Маннит является одним из первых и, видимо, основных продуктов фотосинтеза. Он выполняет функцию запасного вещества, которое используется в синтезе структурных элементов клеточных стенок макрофитов. Возможно, что при некоторых условиях он может использоваться в процессе обмена, выполняя также осморегуляторную роль.

В исследованиях, проведенных на побережье Баренцева моря, нами установлено, что в летние месяцы содержание маннита и его производных у *Laminaria saccharina* максимально и достигает 30 %, уменьшаясь в зимние месяцы до 2–5 % [8]. **Альгиновая кислота**, открытая в 1881 году Е. С. Стенфордом как побочный продукт при извлечении йода и выделенная в очищенном виде А. Крефтингом в 1896 году [2], является наиболее ценной из полисахаридов бурых водорослей. Она находится в клеточных стенках и межклеточных пространствах преимущественно в виде кальциевых, магниевых, железистых солей, а также альгинатов натрия и калия [12].

**Альгинат** является гетерогенным веществом, состоящим из фракций различных по растворимости и составу уруновых кислот, в основном из

блоков маннуруновой (М) и гулуруновой (G), и из изменяющихся цепей этих двух мономеров. Блоки полиманнуруновой кислоты придают вязкость альгинатным растворам, блоки гулуруновой кислоты ответственны за силу геля и специфическое связывание двухвалентных ионов металлов. От изменяющихся цепей зависит структура альгинатов. В разных фракциях альгиновой кислоты, получаемых из разных видов водорослей, содержание маннуруновой и гулуруновой кислот различно. Содержание альгины в пластине ламинарии почти в 2 раза превышает таковое в стволиках. В фукусовых водорослях содержание этой кислоты в 1,5–2 раза меньше, чем в ламинариевых (см. таблицу) [6]. Значительных отличий по содержанию альгины между различными видами фукоидов не наблюдается.

Содержание альгиновой кислоты в бурых водорослях (губа Дальнезelenецкая, Баренцево море, июль 1993 года) [6]

Виды водорослей	% сухого веса
<i>Laminaria saccharina</i>	
пластина	30–36
стволики	19–25
<i>Laminaria digitata</i>	
пластина	24–32
стволики	14–19
<i>Fucus vesiculosus</i>	16–21
<i>Ascophyllum nodosum</i>	14–23

В большой степени свойства альгиновой кислоты и ее солей зависят от молекулярной массы этой кислоты. Ранее было отмечено [8], что средние значения молекулярной массы альгината натрия из ламинарии сахаристой с побережья Баренцева моря не подвержены сильным изменениям и лежат в пределах 80 000–130 000 дальтон. Наибольшее количество альгины в зимние месяцы содержится в центре пластины: на 17–20 % выше, чем в краевых частях, а в базальной зоне на 25–30 % ниже, чем в трех других частях пластины. В летние месяцы распределение альгиновой кислоты по пластине более равномерное, тем не менее наибольшее ее содержание обнаружено в центральной и краевой частях листа, что связано с ростом листовой пластины ламинарии. В работе [6] приводятся подробные исследования по местам локализации в талломе маннита и альгиновой кислоты и по сезонным изменениям их количественного содержания. Это очень важно, так как, например, в каталогах на водорослевую продукцию стоимость 1 кг ламинарии в зависимости от содержания полисахаридов может различаться более чем в 10 раз.

К сожалению, для исследованных водорослей отсутствуют сведения о наличии корреляции между изменением молекулярной массы и соотношением G- и М-кислот в онтогенезе и под влиянием факторов внешней среды, а именно,

эти соотношения определяют наряду с качеством очистки и свойства альгината. От соотношения G- и M-кислот зависит, в частности, одно из главных свойств альгината – вязкость.

Сезонное содержание маннита подвержено сильным изменениям – от 3 до 30 %, тогда как сезонные изменения в содержании альгиновой кислоты колеблются в меньшей степени – в пределах 12–27 %. На Мурманском побережье Баренцева моря наиболее высокое содержание маннита и альгиновой кислоты наблюдается в летне-осенний период. Содержание маннита и альгината всегда выше у растений в возрасте 1+ и 2+, чем у самых молодых (0+) или самых старых (3+) растений в популяции. Во всех проанализированных пробах содержание маннита в январе не превышало 6 %, а в среднем составляло 2,5 %, тогда как в летних пробах оно достигало 20–24 %. Содержание альгината в январе было низким (10,5–15,0 %), в летних пробах – 11–23 %.

Если зависимость содержания и качества полисахаридов от факторов внешней среды в какой-то степени уже изучена, то исследование аналогичной зависимости у липидов только начинается. По предварительным данным американских исследователей, водоросли, произрастающие на меководье, превосходят по содержанию липидов водоросли из более высоких мест. А наибольшее содержание липидов наблюдается у ламинарии в период начала спорогенеза. Большая часть липидов – триглицериды ненасыщенных жирных кислот бурых водорослей, относящиеся в основном к типу линолевой и линоленовой кислот. Из липидной фракции ламинарии сахаристой и пищевого энтеросорбента на фирме «Фитолон» (г. Санкт-Петербург) вырабатывается препарат кламин. Действующим началом кламина является комплекс биологически активных веществ: хлорофиллин, полиненасыщенные жирные кислоты типа омега-3, фитостерины, микрокристаллическая целлюлоза и микроэлементы. Показана возможность ингибирования роста опухолей низкими дозами фосфолипидной фракции из *Laminaria angustata* [13]. Американскими исследователями высказано предположение, что эти кислоты, присутствующие во всех водорослях, образуются в ответ на стресс, как и во всех организмах животных. Если эта гипотеза подтвердится, то таким стрессовым воздействием может быть кратковременное поднятие канатов к поверхности воды для резкого увеличения дозы падающего ультрафиолета.

#### УВЕЛИЧЕНИЕ ПРОДУКТИВНОСТИ МАРИКУЛЬТУР ЗА СЧЕТ БИКУЛЬТУРЫ

Сотрудниками лаборатории альгологии ММБИ предложена биотехнология комплексного плантационного выращивания ламинариевых и фукусовых водорослей [5], при которой в верхней горизонтальной части плантации выра-

щиваются фукусовые водоросли, выполняющие в первую очередь барьерную функцию (рис. 2) [5].

Предлагаемая биотехнология берет начало от апробированной технологии выращивания ламинарии сахаристой. Основное отличие предлагаемой технологии заключается в назначении плантации. Первое назначение – сбор, удержание и утилизация нефтяной пленки с поверхности воды. Второе – использование выращенной биомассы ламинариевых и фукусовых водорослей для получения продукции медицинского и лечебно-профилактического назначения.

Разработаны методы выращивания ламинарии в двухгодичном цикле [3]. Есть данные, что в бикультуре с мидиями (для выращивания которых требуются аналогичные гидролого-химические условия [4]) рост ламинарии сахаристой увеличивается почти в 2 раза [7].

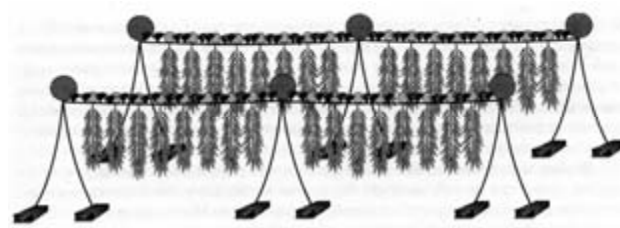


Рис. 2. Схема комплексной бикультурной плантации [5]  
Верхние горизонтальные ряды – *Fucus vesiculosus*, вертикальные ряды – *Laminaria saccharina*

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

До настоящего времени в Белом и Баренцевом морях проводится экспериментальное выращивание водорослей для выяснения механизмов репродукции, адаптации и регуляции роста, а также накопления биологически активных веществ в условиях высоких широт. Исследования проводятся с привлечением методов биохимии, физиологии, цитологии; анализируется влияние плантации на гидрохимические характеристики среды; изучается обрастание культивируемых макрофитов эпибионтами. В последние годы исследовалась возможность ведения бикультуры, то есть выращивания на ламинариевых плантациях и других видов гидробионтов, в том числе фукусовых водорослей и двустворчатых моллюсков *Mytilus edulis*. Сотрудниками лаборатории альгологии ММБИ при участии в исследовательских работах сотрудников других организаций (ПИНРО, ВНИРО, ИНБЮМ) была создана биотехнология культивирования ламинарии сахаристой в условиях Баренцева моря (работы проводились под руководством В. Н. Макарова) [6]. Урожай, собранный с первой опытно-промышленной плантации ламинарии в губе Дальнезеленецкая Баренцева моря, показал, что ламинариевые хозяйства в условиях Севера могут быть высоко рентабельными.

Серьезной проблемой при рассмотрении вопроса о введении в морскую аквакультуру любого объекта является экологическая безопасность. Виды беломорской альгофлоры, предлагаемые к использованию для культивирования, не являются чужеродными – это массовые виды Белого и Баренцева морей. Как показал биологический мониторинг, большие локальные концентрации ламинарии, например, на плантации не оказывают отрицательного влияния на окружающую часть экосистемы [1].

Развитие водорослевой марикультуры в Белом море позволит сократить объем промысла

водорослей, что должно способствовать сохранению естественных зарослей, их стабилизации и улучшению экологической ситуации в море.

По данным FAO, аквакультура в последнее время во всем мире развивается бурными темпами. Водорослевая марикультура становится императивом нашего времени и в карельской акватории Белого моря [14].

Новые и уже накопленные знания о биологических особенностях водорослей, перспективных для введения в марикультуру, способствуют становлению и совершенствованию биотехнологий культивирования этих объектов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверинцев В. Г., Байтаз В. А., Байтаз О. Н., Бардан С. И., Кондаков А. В., Кузнецов Л. Л., Москвитина М. И., Песегов В. Г., Сикорский А. В., Фомин О. К., Чиркова З. Н., Широколов В. Н. Контроль экологической ситуации в районе опытно-промышленной плантации водорослей в губе Дальнезеленецкой (оперативно-информационный материал). Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1988. 51 с.
2. Барашков В. Г. Химия водорослей. М.: Наука, 1963. 143 с.
3. Блинова Е. И., Макаров В. Н. Инструкция по биотехнологии культивирования ламинарии сахаристой в двухгодичном цикле в Баренцевом море. М.: Наука, 1987. 34 с.
4. Блинова Е. И., Садыхова И. А., Дергалева Ж. Т. Увеличение продуктивности прибрежных экосистем Западного Мурмана за счет бикультуры ламинария-мидия и их рациональное использование // Оптимизация использования морских биоресурсов и комплексное управление прибрежной зоной Баренцева моря: Тез. докладов регион. семинара, посвященного 45-летию Первой научной сессии Мурманской биологической станции (г. Мурманск, 30 ноября 1999 г.). Мурманск: ММБИ КНЦ РАН, 1999. С. 6–7.
5. Воскобойников Г. М., Макаров В. Н., Макаров М. В., Шошина Е. В. Биотехнологии в полярной марикультуре и использовании морских биоресурсов Арктики // Современные технологии и прогноз в полярной океанологии и биологии. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1999. С. 100–123.
6. Воскобойников Г. М., Макаров М. В., Пантелева Н. Н. Биотехнологии искусственного выращивания морских гидробионтов. Проблемы и перспективы биотехнологии культивирования бурых водорослей в Баренцевом море // Современные информационные и биологические технологии в освоении ресурсов шельфовых морей / ММБИ КНЦ РАН. М.: Наука, 2005. С. 256–272.
7. Макаров В. Н. Поведение зооспор и ранние стадии развития *Laminaria saccharina* (L.) Lamour. Белого и Баренцева морей: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Л., 1978. 20 с.
8. Макаров В. Н., Джус В. Е., Матишов Г. Г., Хохряков К. Б., Воскобойников Г. М., Денисенко Н. В., Шошина Е. В. Научно-практические аспекты культивирования ламинарии сахаристой в Баренцевом море. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1986. 35 с.
9. Немова Н. Н., Шкляревич Г. А. Экология водорослей-макрофитов карельской акватории Белого моря как объектов марикультуры // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2009. № 9(103). С. 17–27.
10. Силкин В. А., Хайлов К. М. Биоэкологические механизмы управления в аквакультуре. Л.: Наука, 1988. 230 с.
11. Хайлов К. М., Празукин А. В., Ковардаков С. А., Рыгалов В. Е. Функциональная морфология морских многоклеточных водорослей. Киев: Наукова думка, 1992. 280 с.
12. Haug A., Myklestad S., Larsen B., Smisdrod O. Studies on the sequence of uronic acid residues in alginic acid // Acta Chem. Scand. 1967. Vol. 21. P. 691–704.
13. Noda H., Amano H., Arashima K., Nisizawa K. Antitumor activity of marine algae // Hydrobiologia. 1990. № 204/205. P. 577–584.
14. The State of World Fisheries and Aquaculture. 2002: [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.fao.org/documents/show\\_cdr.asp?url\\_file=/docrep/005/y7300e/y7300e00.htm](http://www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file=/docrep/005/y7300e/y7300e00.htm)

УДК 595.789: 591.531.14

ВЯЧЕСЛАВ ВАСИЛЬЕВИЧ ГОРБАЧ

кандидат биологических наук, доцент кафедры зоологии  
и экологии эколого-биологического факультета ПетрГУ  
gorbach@psu.karelia.ru

### ТРОФИЧЕСКИЕ СВЯЗИ ИМАГО МНЕМОЗИНЫ *PARNASSIUS MNEMOSYNE* (LEPIDOPTERA, PAPILIONIDAE) В ЗАОНЕЖЬЕ

В работе исследованы спектр пищевых связей и предпочтения в выборе источников нектара у взрослых особей (имаго) парусника мнемозины. Установлены трофические связи бабочек с 12 родами цветковых растений. Около 90 % всех зарегистрированных случаев питания приходится на растения, принадлежащие к трем родам. В начале июня только что вылетевшие бабочки кормятся в основном на одуванчиках, затем, по мере их отцветания, переходят на герань и, наконец, на зацветающие в последней декаде месяца ястребинки.

Ключевые слова: мнемозина, *Parnassius mnemosyne*, кормовые растения имаго, спектр пищевых связей, трофическая специализация

Мнемозина, или черный аполлон *Parnassius mnemosyne* (Linnaeus, 1758), – одна из двух карельских бабочек, внесенных в списки охраняемых видов Международного союза охраны природы (IUCN) и Бернской конвенции (Bern), в Красные книги всех стран и регионов, где обитает или встречалась в недавнем прошлом [5]. В Карелии вид распространен в Восточном Приладожье (подвид *karjala* Bryk, 1935) и в Заонежье (подвид *poppii* Bryk, 1935), известен из юго-восточных районов на границе с Архангельской областью [6], [11]. В течение года у мнемозины развивается лишь одно поколение. Личинка 1-го возраста, как правило, зимует внутри яйцевых оболочек [3]. Гусеница в местных условиях является монофагом, питаясь на единственном виде растений – хохлатке плотной (*Corydalis solida*). Будучи типичным эфемероидом, хохлатка дает побеги и генеративные органы лишь весной, в период, предшествующий олиствлению деревьев. Именно в это время и происходит развитие личинки. Куколка лежит на земле в легком паутинном коконе, стадия длится около двух недель.

Взрослые особи встречаются в течение месяца – с начала июня до середины июля, кормятся на цветущих растениях (рис. 1). В местах обитания бабочки летают на небольших лугах, расположенных на ровных приподнятых участках или пологих склонах с западной, юго-западной или южной экспозицией, хорошо освещенных большую часть дня. Обычно эти луга представляют собой сеть более или менее обособленных пятен в лесу и по периферии лиственных и смешанных лесных массивов, где в достаточном числе присутствуют кормовые растения гусениц – хохлатки, и нет недостатка в нектароносных растениях – источниках пищи для бабочек.

Современные исследования показывают, что основной причиной сокращения численности многих видов дневных бабочек, населяющих традиционные сельские ландшафты Восточной Финноскандии, является изменение практики ведения сельского хозяйства [9], [10]. В частности, причина в том, что сейчас под сенокосы и пастбища преимущественно используют обширные

угодья, позволяющие применять интенсивные технологии, в то время как малые лесные луга, для которых характерны, пожалуй, самые богатые группировки бабочек, выводят из оборота. Со временем эти участки зарастают мелколесьем и становятся непригодными для обитания большинства видов. Чувствительность мнемозины к изменению среды объясняют наличием облигатных трофических связей личинок с хохлатками – растениями, повсеместно имеющими локальное распространение, и ограниченными возможностями бабочек к расселению. Трофические связи взрослых особей справедливо рассматривают в качестве второстепенного фактора, поскольку бабочки, будучи полинектаротрофами, могут питаться нектаром многих видов цветковых растений [1]. Отсутствие очевидной избирательности в питании снижает интерес исследователей к изучению специфики связей вида с нектароносными растениями, лишь немногие авторы уделяют этому вопросу должное внимание [7]. Тем не менее можно назвать по меньшей мере две причины, которые делают изучение этого аспекта экологии мнемозины весьма актуальным. Во-первых, потенциальная возможность использования фитофагом определенного набора кормовых растений является важнейшей видовой характеристикой. Не имея надлежащих знаний, невозможно судить о ширине экологической ниши вида и его функциональной роли в экосистемах. Во-вторых, для реализации мероприятий по сохранению популяций мнемозины необходимы сведения о пищевых предпочтениях бабочек, поскольку недостаток излюбленных источников нектара в некоторых случаях может стать столь же мощным лимитирующим фактором, как и недостаток кормовых растений для личинок. Например, в процессе зарастания местообитаний хохлатки еще долгое время сохраняются под пологом мелколесья, тогда как многие нектароносные растения исчезают довольно быстро. В отсутствие альтернативных источников нектара их дефицит может стать основной причиной, ведущей к локальному вымиранию вида. В данной работе мы попытались восполнить дефицит знаний о спектре пищевых связей взрослых особей мнемозины и их избирательности к источникам нектара.

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Исследования проводили на Большом Клименском острове Онежского озера в окрестностях села Сенная Губа (62° с. ш., 35° в. д.) [2]. Трофические связи имаго мнемозины изучали в июне 2004 года. Посещая населенные видом местообитания, фиксировали все случаи питания бабочек. Обилие цветущих растений оценивали визуально по пятибалльной шкале от 1 (цветут одиночные растения) до 5 (массовое цветение). Для последующего анализа данные из различных местообитаний были обобщены, добавлены сведения о растениях, на которых отмечено питание бабочек в другие годы.



Рис. 1. Самка мнемозины на соцветии купыря

Предпочтения в выборе источника нектара определяли по числу посещений бабочками различных растений. Критерий  $\chi^2$  использовали для сравнения наблюдаемого и равномерного распределений частот. Статистический вывод о значимых различиях между распределениями предполагает существование избирательности по отношению к нектароносным растениям. В качестве излюбленного источника нектара в таком случае следует рассматривать наиболее часто посещаемое бабочками растение. Сравнение частоты посещения первого в иерархии вида с каждым следующим позволяет выявить круг предпочитаемых кормовых растений – группу, отличия между членами которой статистически незначимы. Связь частоты посещений и обилия цветущих растений исследовали с помощью корреляционного анализа.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ

В течение периода исследования отмечено 142 случая питания взрослых особей мнемозины. Установлены трофические связи вида с 12 родами цветковых растений (табл. 1). Посещаемые растения, за исключением земляники и шиповника, имели высокую встречаемость в исследованных местообитаниях. Наиболее многочисленны были манжетка и купырь. Другие обильно цветущие в июне растения – купальницу (*Trollius europaeus*), смолку (*Steris viscaria*), мышиный горошек (*Vicia cracca*), чину луговую (*Lathyrus pratensis*), клевер (*Trifolium* spp.), зверобой четырехгранный (*Hypericum maculatum*) и поповник обыкновенный (*Leucanthemum vulgare*) – бабочки не посещали. На васильках (*Centaurea* spp.), уже начинающих цвести к концу лета мнемозины, питание взрослых особей также не отмечено.

Имаго мнемозины демонстрируют избирательность по отношению к источникам нектара, частоты посещения различных растений значимо отличаются от равномерного распределения ( $\chi^2 = 225,0$ ,  $df = 9$ ,  $p < 0,001$ ). Около 90 % всех отмеченных случаев питания приходится на герань, одуванчик и ястребинки. Бабочки с равной частотой посещали

эти растения (наблюдаемые отличия статистически незначимы,  $\chi^2 < 2,4$ ,  $df = 1$ ,  $p > 0,122$ ). Остальные источники нектара использовали редко, частоты посещения первых трех видов достоверно отличаются от всех следующих по списку растений ( $\chi^2 > 21,6$ ,  $df = 1$ ,  $p < 0,001$ ).

Таблица 1

Частота посещения бабочками нектароносных растений

Вид (род) растений	Зарегистрированные посещения	
	общее число	доля, %
Герань лесная – <i>Geranium sylvaticum</i>	48	34
Одуванчики – <i>Taraxacum</i> spp.	41	29
Ястребинки – <i>Hieracium</i> spp.	34	24
Фиалка трехцветная – <i>Viola tricolor</i>	5	4
Лютики – <i>Ranunculus</i> spp.	5	4
Купырь – <i>Anthriscus sylvestris</i>	3	2
Манжетка обыкновенная – <i>Alchemilla vulgaris</i>	3	2
Вероника дубравная – <i>Veronica chamaedrys</i>	1	< 1
Земляника обыкновенная – <i>Fragaria vesca</i>	1	< 1
Шиповник иглистый – <i>Rosa acicularis</i>	1	< 1
Короставник полевой – <i>Knautia arvensis</i>	+	+
Марьянник дубравный – <i>Melampyrum nemorosum</i>	+	+

Примечание. + – виды, не отмеченные в качестве кормовых растений бабочек в 2004 году, питание на которых наблюдали в другие сезоны.

Спектр трофических связей мнемозины менялся в соответствии с фенологическими особенностями кормовых растений (рис. 2). В начале июня только что вылетевшие бабочки кормились почти исключительно на одуванчиках, затем, по мере их отцветания, переходили на герань и, наконец, на зацветающие в последней декаде месяца ястребинки. При этом если переход с одуванчиков на герань был постепенным, то на питание нектаром ястребинок бабочки перешли почти одновременно, сразу после появления первых цветков. В ряде местообитаний цветение ястребинок началось с некоторым запозданием, поэтому герань еще некоторое время сохраняла заметное место среди кормовых растений. Изучение динамики посещений бабочками основных источников нектара выявило тесную корреляционную связь между частотами этих посещений и обилием цветущих одуванчиков и ястребинок, а также отсутствие значимой зависимости в случае с геранью (табл. 2).

Таблица 2

Зависимость частоты посещений от обилия основных источников нектара

Источники нектара	<i>r</i>	<i>df</i>	<i>t</i>	<i>p</i>
Одуванчик лекарственный	0,95	14	11,0	< 0,001
Герань лесная	0,22	18	0,91	0,373
Ястребинки	0,96	7	8,30	< 0,001

Примечание. *r* – коэффициент корреляции, *df* – число степеней свободы, *t* – критерий Стьюдента, *p* – значимость *t*.

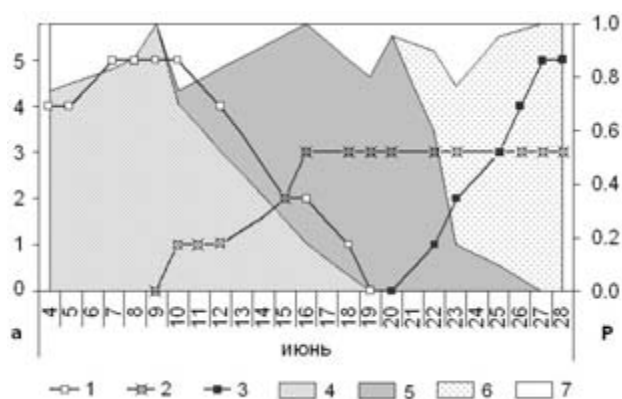


Рис. 2. Спектр трофических связей мнемозины и обилие основных источников нектара:

а – обилие (балл) цветущих одуванчиков (1), герани (2), ястребинок (3). Р – доля одуванчиков (4), герани (5), ястребинок (6) и других источников нектара (7) в питании бабочек

## ОБСУЖДЕНИЕ

Имаго мнемозины в Заонежье используют в пищу нектар весьма широкого круга кормовых растений. По крайней мере половина всех обильно цветущих в течение лета видов травянистых растений посещалась бабочками. Для исследованной Ваясяненем и Сомермой финской популяции мнемозины отмечено питание лишь на геранях – лесной (*Geranium sylvaticum*) и кроваво-красной (*G. sanguineum*) [12]. Они же приводят сведения об использовании бабочками из других популяций в качестве источников нектара клевера (*Trifolium* sp.) и бодяка (*Cirsium* sp.). Для европейского Северо-Востока России известны трофические связи имаго вида с 6 видами нектароносных растений [3]. К их числу относятся чертополох курчавый (*Carduus crispus*), скерда сибирская (*Crepis sibirica*), дудник лесной (*Angelica sylvestris*), валериана волжская (*Valeriana wolgensis*), герани лесная и белоцветковая (*Geranium albiflorum*). Конвичка с соавторами, подробно изучив питание бабочек одной из чешских популяций, указывают, что из всего многообразия цветущих растений бабочки посещали лишь 13 видов – дрёму красную (*Melandrium rubrum*), *Rubus* spp. (ежевике, косянику?), звездчатку жестколистную (*Stellaria holostea*), незабудку дубравную (*Myosotis nemorosa*), землянику (*Fragaria vesca*), веронику дубравную (*Veronica chamaedrys*), живучку (*Al-laria officinalis*), лютик ползучий (*Ranunculus repens*), кукушкин горичет (*Lychnis flos-cuculi*), короставник полевой (*Knautia arvensis*), окопник лекарственный (*Symphytum officinale*) и одуванчик (*Taraxacum* spp.) [7]. Отличия в спектре трофических связей различных популяций вида логично объясняются тремя причинами. Во-первых, видовым составом флоры в пределах каждой области распространения мнемозины: бабочки выбирают кормовые растения из числа имеющихся местных видов. Во-вторых, осо-



бенностями предпочитаемых местообитаний. Поскольку растительные ассоциации на лугах, населенных мнемозиной, весьма изменчивы по составу и структуре, в спектре питания бабочек в одних местообитаниях могут преобладать представители ксеромезофильного, а в других – мезофильного, влажного или лесного разнотравья. В-третьих, богатством цветущей растительности в выбранных для исследования биотопах. Обычно бабочки демонстрируют узкую специализацию в питании, если вынуждены выбирать из весьма ограниченного круга имеющихся в местообитании кормовых растений. Только высокое видовое богатство источников нектара позволяет изучить все разнообразие трофических связей вида. Исследования в местообитаниях, где в достаточном числе встречаются почти все потенциально подходящие для питания имаго растения, позволили нам довольно полно выявить пищевые связи мнемозины в местных условиях. Тем не менее нельзя исключить возможность использования бабочками, пусть и в более редких случаях, других источников нектара.

Как следует из приведенных выше данных, трофические адаптации имаго мнемозины не являются жестко лимитированными. Между тем полученные нами результаты указывают на вполне определенные предпочтения в выборе источников нектара. Сильная корреляционная связь между обилием одуванчика лекарственного и ястребинок и частотой посещения их бабочками подчеркивает ведущую роль этих растений в питании имаго. Что же касается герани лесной, то, несмотря на ее главенствующее положение в иерархии источников нектара, мы не склонны рассматривать этот вид в качестве излюбленного. Отсутствие значимой связи между обилием цветущей герани и частотой ее посещений объясняется вынужденным использованием данного растения в условиях дефицита одуванчиков и ястребинок. Этот вывод хорошо иллюстрирует динамика посещения бабочками основных источников нектара. Продолжая мысль, можно предположить, что на лесных лугах, где нет или очень мало одуванчиков и ястребинок, мнемозине приходится питаться почти исключительно нектаром герани. И если питание бабочек изучать в подобных

местообитаниях, то герань будет неизбежно восприниматься в качестве не только излюбленного, но и, возможно, единственного кормового растения имаго мнемозины в местных условиях. В отличие от Заонежья, в чешской популяции бабочки редко посещают одуванчики, более половины всех зарегистрированных случаев питания приходится на дрёму красную [7]. Вполне возможно, что межпопуляционные отличия в выборе источников нектара определяются не только морфофизиологическими адаптациями особей к имеющимся кормовым растениям, но и закрепляются в результате отбора. В частности, половая и пространственная дифференциация в питании имаго показана для испанских популяций аполлона *Parnassius apollo* [4]. К сожалению, имеющиеся в литературе сведения не позволяют сделать сколько-нибудь обоснованные предположения о специфике трофических связей в популяциях мнемозины, поскольку даже в тех немногих работах, где приведены количественные показатели посещаемости, нет оценки участия нектароносных растений в структуре растительных ассоциаций исследуемых местообитаний. Без учета обилия всех растений, потенциально подходящих для питания бабочек, любые выводы о пищевых предпочтениях вряд ли можно считать вполне адекватными. Например, если частота посещений зависит от встречаемости растений, то говорить об избирательности вовсе не приходится – бабочки питаются на растениях, которые легче всего найти. Совсем другое дело, когда бабочки игнорируют самые многочисленные виды, а в качестве источника нектара выбирают растения, участие которых в формировании ассоциаций не столь значимо. В нашем случае почти все упомянутые нектароносные растения в местообитаниях, населенных мнемозиной, имели сходное относительное обилие. Преобладающие в составе растительных сообществ манжетки и купырь, так же как и наиболее редкие шиповник и земляника, посещались бабочками, но заметного участия в формировании их рациона не принимали. Поэтому мы можем с уверенностью говорить о наличии избирательности по отношению к источникам нектара у имаго мнемозины в исследуемой популяции.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбач В. В. Анализ трофических связей булавоусых чешуекрылых Карелии (Insecta, Lepidoptera: Hesperioidea, Papilionoidea) // Труды кафедры зоологии и экологии. Новая серия. Вып. 1. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2005. С. 97–104.
2. Кабанен Д. Н., Горбач В. В. Особенности пространственного размещения и взаимодействия внутрипопуляционных группировок мнемозины (*Parnassius mnemosyne*) в условиях Заонежья // Труды кафедры зоологии и экологии. Новая серия. Вып. 2. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2007. С. 70–79.
3. Татаринов А. Г., Долгин М. М. Булавоусые чешуекрылые // Фауна европейского северо-востока России. Т. 7. Ч. 1. СПб.: Наука, 1999. 131 с.
4. B a z A. Nectar plant sources for the threatened Apollo butterfly (*Parnassius apollo* L. 1758) in populations of central Spain // Biol. Conserv. 2002. Vol. 103. P. 277–282.
5. H e a t h J. Threatened Rhopalocera (butterflies) in Europe. Strasbourg: Council of Europe, Nature & Environment, 1981. Ser. 23. 157 p.

6. Humala A. E. New findings of *Parnassius mnemosyne* Linnaeus (Lepidoptera, Papilionidae) in Russian Karelia // Entomol. Fenn. 1997. Vol. 8. № 4. P. 224.
7. Konvička M., Duchoslav M., Harastova M., Benes J., Foldynova S., Milos J., Kuras T. Habitat utilization and behavior of adult *Parnassius mnemosyne* (Lepidoptera: Papilionidea) in Livovelske Pomoravi, Czech Republic // Nota lepid. 2001. Vol. 25. № 1. P. 39–51.
8. Marttila O., Saarinen K., Aarnio H., Haahtela T., Ojalainen P. Päiväperhosopas. Suomi ja lähialueet. Helsinki: Tammi, 2000. 231 p.
9. Rassi P., Alanen A., Kanerva T., Mannerkoski I. Suomen lajien uhanalaisuus 2000 // Helsinki: Ympäristöministerio & Suomen ympäristökeskus, 2001. 432 p.
10. Saarinen K. A comparison of butterfly communities along field margins under traditional and intensive management in SE Finland // Agriculture, Ecosystems and Environment. 2002. Vol. 90. P. 59–65.
11. Vaisanen R., Somerma P. The status of *Parnassius mnemosyne* (Lepidoptera, Papilionidae) in Finland // Notul. entomol. 1985. Vol. 65. P. 109–118.
12. Vaisanen R., Heliovaara K., Somerma P. Morphological variation of *Parnassius mnemosyne* (L.) in Eastern Fennoscandia (Lepidoptera, Papilionidae) // Entomol. Scandinavica. 1991. V. 22. № 3. P. 353–363.

УДК 599.745.3:591.5

**НИКОЛАЙ ВЛАДИМИРОВИЧ МЕДВЕДЕВ**

доктор биологических наук, старший научный сотрудник,  
профессор кафедры зоологии и экологии эколого-биологического факультета ПетрГУ  
nmedvedev@petrsu.ru

**АЛЕКСАНДР КОНСТАНТИНОВИЧ МОРОЗОВ**

заведующий аналитической лабораторией Института леса  
КарНЦ РАН  
amorozov@krc.karelia.ru

**ТЕРО СИПИЛЯ**

Ph. D., Сектор природного наследия Восточного отделения  
Лесной службы Финляндии; заведующий сектором природного наследия  
tero.sipila@metso.fi

**ЛАДОЖСКАЯ КОЛЬЧАТАЯ НЕРПА КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ИЗМЕНЕНИЯ  
ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА**

В статье приводятся результаты исследования концентрации тяжелых металлов в волосяном покрове взрослых тюленей *Phoca hispida ladogensis* Nordq. и их щенков, погибших в 2000–2002 годах. На основе сравнения этих данных с результатами, полученными десятью годами ранее (в начале 90-х годов прошлого века), анализируется динамика концентрации поллютантов в организме лаастоногих и делается вывод о снижении прессы техногенного загрязнения на популяцию нерпы и на экосистему Ладожского озера в указанный период времени.

Ключевые слова: ладожская нерпа, концентрация, тяжелые металлы, техногенное загрязнение, динамика, экосистема

**ВВЕДЕНИЕ**

Ладожское озеро – крупнейшее озеро Европы общей площадью 17891 км<sup>2</sup>, заключающее в себе 837 км<sup>3</sup> воды, площадь его водосборного бассейна – 258 тыс. км<sup>2</sup> [15]. В пределах этого бассейна располагаются порядка 500 различных предприятий, их сточные воды содержат около 600 различных загрязняющих субстанций, 300 из которых считаются токсичными. По данным Г. Т. Фрумина и др. [16], в Ладожское озеро ежегодно поступает 400 тыс. т сточных вод, содержащих опасные загрязнители, среди них тяжелые металлы, хлорорганические соединения, фенолы, детергенты и др. Основные потребители и загрязнители ладожской воды – прежде всего предприятия целлюлозно-бумажной промышленности, цветной и черной металлургии, сельское хозяйство и многие другие.

Ладожское озеро населяет реликтовый подвид ледниковой эпохи – ладожская кольчатая нерпа, подвид кольчатой нерпы, ведущей свое проис-

хождение, как и два других близкородственных подвида – нерпа оз. Саймаа (*Ph. h. saimensis* Nordq.) и нерпа Балтийского моря (*Ph. h. botnica* Nordq.), от собственно арктической кольчатой нерпы (*Ph. h. hispida* Schreb.). Ладожская нерпа занесена в Красные книги РСФСР [9], СССР [10], Карелии [6], [7], [8], Восточной Фенноскандии [21] и в список уязвимых видов животных Всемирного союза охраны природы [19].

Попадая в озеро, токсиканты по пищевой цепи водоросли – зоопланктон – хищный зоопланктон – рыба – нерпа попадают в организм животного, где их концентрация в сотни тысяч раз превышает содержание токсичных веществ в воде. Являясь долгоживущим животным и благодаря избирательному способу охоты, нерпа способна накапливать такие количества токсикантов, которые могут оказывать крайне негативное влияние на организм тюленя. Одновременно с этим содержание поллютантов в органах нерпы отражает их общую нагрузку на экосистему Ладожского озера.

Одним из важнейших путей освобождения организма от токсикантов является накопление их в периодически сменяемых тканях (например, оперение птиц, волосяной покров и рога животных [11], [3]). Расчеты, выполненные К. Хондой с соавторами [17], показали, что в волосяном покрове японской антилопы – серао *Capricornis crispus* – заключено до 40 % всей содержащейся в организме ртути.

Уже упомянутые работы и работы, выполненные нами ранее [20], позволили прийти к заключению, что во многих случаях наружные покровы животных могут служить более информативным материалом при оценке степени загрязненности зверей и птиц антропогенными токсикантами, чем их внутренние органы и ткани, даже такие общепризнанные органы-накопители, как печень и почки. Например, определенная нами концентрация свинца в печени, почках и мышечной ткани ладожской нерпы была в 1,5 раза выше таковой в аналогичных органах нерпы Белого моря [20], [11], [4], [3], а в волосяном покрове зверей наблюдалось уже четырехкратное превышение содержания токсиканта. Концентрация цинка в волосяном покрове ладожской нерпы была достоверно в 2 раза выше, чем в волосяном покрове беломорских тюленей, хотя во внутренних органах и тканях животных статистически значимой разницы не прослеживалось. Все это позволяет сделать вывод о возможности использования волосяного покрова зверей в качестве индикатора загрязнения природной среды тяжелыми металлами, в данном случае – экосистемы Ладозского озера. Цель нашей работы – оценить изменения в нагрузке техногенного загрязнения на популяцию ладожской нерпы с 1990 по 2002 год.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Пробы волосяного покрова отбирались от особей ладожской нерпы, погибших в орудиях рыболовного промысла. Следует особо подчеркнуть, что выборки ластоногих 1990–1993 годов и 2000–2002 годов были идентичны как по половозрастному составу, так и по основным факто-

рам, которые влияют на количество токсикантов в организме. У добытых взрослых тюленей возраст был определен путем подсчета годовых колец на поперечном шлифе клыка по методу Г. А. Клевезаль [5].

Образцы натального волосяного покрова новорожденных щенков нерпы были собраны в камерах детородных убежищ тюленей во время изучения особенностей их зимовки. В связи с тем что этого материала было недостаточно для корректного определения в нем токсикантов в каждом отдельном случае, из него была сформирована объединенная проба для последующего анализа. Концентрация тяжелых металлов (Hg, Cd, Pb, Cu, Ni, Zn, Cr, Fe и Mn) в волосяном покрове кольчатой нерпы определена методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии. Образцы высушивались при 105 °С до постоянного веса и затем подвергались мокрому озолению азотной кислотой марки «осч» при нагревании с добавлением H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> высокой чистоты во фторопластовой посуде до полного разложения. Определение металлов проводилось на атомно-абсорбционном спектрофотометре АА-6800 «Shimadzu» в пламенном варианте «ацетилен-воздух» с дейтериевой коррекцией фона.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Концентрация тяжелых металлов, определенная в волосяном покрове взрослых особей ладожской кольчатой нерпы с 1990 по 2002 год, представлена в табл. 1. Из этих данных видно, что в течение 10-летнего периода концентрация ряда элементов – опасных загрязнителей природной среды значительно снизилась. Так, концентрация ртути уменьшилась в 2 раза ( $p < 0,05$ ), меди – в 3 раза ( $p < 0,05$ ), кадмия – в 3 раза ( $p < 0,001$ ), цинка – почти в 6 раз ( $p < 0,001$ ). Уровень никеля снизился в 1,6 раза (но различия статистически недостоверны). Из всех проанализированных металлов только свинец продемонстрировал не уменьшение, а полуторакратное увеличение средней концентрации (различия статистически не достоверны).

Таблица 1

Концентрация тяжелых металлов (мкг/г сухого веса) в волосяном покрове ладожской нерпы

Год добычи	Hg	Cd	Pb	Cu	Ni	Zn	Cr	Fe	Mn
	M ± m min-max n	M ± m min-max n	M ± m min-max n	M ± m min-max n	M ± m min-max n	M ± m min-max n	M ± m min-max n	M ± m min-max n	M ± m min-max n
1990–1993	17,49 ± 4,00 4,80–79,5 18	0,96 ± 0,11 0,32–2,00 23	6,34 ± 1,90 0,34–40,0 23	22,5 ± 6,02 4,6–148,4 23	4,11 ± 0,82 0,01–15,0 18	323,8 ± 59,0 110,5–1466 23	не опр.	не опр.	не опр.
2000–2002	7,87 ± 1,09 1,49–13,6 12	0,32 ± 0,07 0,04–1,26 23	9,49 ± 1,45 2,30–28,7 22	7,51 ± 0,99 1,25–23,5 23	2,56 ± 6,08 0,55–9,32 23	57,73 ± 6,08 42–95,1 11	4,02 ± 0,89 0,57–19,9 11	266,8 ± 36,9 158–560 11	21,36 ± 4,71 5,94–61,8 11

Натальный волосяной покров новорожденных щенков ладожской нерпы содержал значительно меньшее количество тяжелых металлов (табл. 2), чем шерсть взрослых особей. Из представленных в табл. 1 и 2 данных видно, что концентрация и токсичных металлов (Hg, Cd, Pb), и жизненно важных элементов (железо) в волосяном покрове новорожденных щенков нерпы в несколько раз, а иногда и на порядок ниже, чем у взрослых особей. Уровень свинца у щенков ниже в 33,5 раза, кадмия – в 8 раз, ртути – в 10 раз, никеля – в 2,5 раза, хрома и железа – в 6 раз, марганца – в 20 раз. И только по уровню цинка не обнаружено различий между щенками и взрослыми нерпами.

Таблица 2

Концентрация тяжелых металлов (мкг/г сухого веса) в натальном волосяном покрове новорожденных щенков ладожской нерпы (объединенная проба 2000–2002 годов)

Pb	Cd	Hg	Ni	Zn	Cr	Fe	Mn
0,28	0,04	0,8	1,04	45,05	0,71	44,55	1,08

Исследования, выполненные в Финляндии на рубеже 70–80-х годов XX века по оценке влияния тяжелых металлов на популяцию нерпы оз. Саймаа [18], и наши работы по определению концентрации токсикантов в органах и тканях ладожской нерпы [11], [13], [20] в начале 90-х годов прошлого столетия показали, что концентрация ртути в натальном волосяном покрове новорожденных щенков нерпы была в несколько раз выше, чем таковая в волосяном покрове сеголетков и годовиков. Это обусловлено поступлением значительного количества ртути в организм щенка из организма матери через плацентарный барьер и во время молочного вскармливания. При переходе детенышей нерпы к самостоятельному питанию концентрация ртути в их наружных покровах резко снижается и вновь растет начиная со второго года жизни вследствие возрастной аккумуляции металла в организме. Наши новые данные показали, что концентрация ртути в волосяном покрове щенков нерпы в 3,5 раза ниже, чем таковая у сеголетков (0,8 и 2,73 мкг/г соответственно). Следовательно, и этот факт также свидетельствует о том, что степень загрязненности ртутью популяции нерпы уменьшилась в результате снижения загрязненности этим поллютантом экосистемы Ладожского озера в целом.

В наших предыдущих исследованиях установлено, что в 90-е годы прошлого века самые токсичные тяжелые металлы (ртуть, свинец и кадмий) распределялись в волосяном покрове ладожских нерп следующим образом: Hg >> Pb > Cd [20], [11], [4], [3]. В материале, добытом спустя 10 лет, наблюдается иной характер распределения концентрации ртути, свинца и кадмия, а именно: Hg ≈ Pb >> Cd как очевидное

следствие резкого сокращения концентрации этих поллютантов (за исключением свинца) в организме нерпы из-за уменьшения их поступления в экосистему Ладожского озера [12], [13].

Наблюдаемое двукратное уменьшение концентрации Hg и Ni в волосяном покрове нерпы и, следовательно, в экосистеме Ладоги, скорее всего, обусловлено сокращением объемов целлюлозно-бумажного производства в бассейне озера, в частности закрытием в 1988 году и последующим перепрофилированием целлюлозно-бумажного завода в Приозерске. Резкое снижение концентрации Cd может быть связано с сокращением объемов деятельности деревообрабатывающих, металлургических и глиноземных производств. Вместе с тем, учитывая длительный период полувыведения из организма тяжелых металлов (например, для кадмия он составляет порядка 25 лет [14]), в популяционном аспекте проблемы следует вести речь не столько об уменьшении концентрации тяжелых металлов в организме ладожской нерпы, сколько о сокращении в популяции доли «пораженных» особей, то есть тех тюленей, организм которых содержит значительное количество токсикантов. Таким образом, уменьшение некоторого «среднего уровня» загрязненности популяции тем или иным ксенобиотиком происходит не столько за счет снижения «индивидуального уровня» загрязненности, присущего каждой из особей, сколько за счет сокращения в популяции доли максимально загрязненных особей [1].

Сравнение концентрации кадмия в натальном волосяном покрове новорожденных щенков с таковой в волосяном покрове взрослых нерп (отношение 1:8) свидетельствует о продолжении аккумуляции этого металла в озерной биоте, хотя темпы этого процесса значительно ниже, чем мы наблюдали десятью годами ранее. Среди проанализированных металлов только свинец продемонстрировал не уменьшение, а даже некоторое увеличение концентрации. Логично предположить, что подобный тренд обусловлен резким увеличением в последние десятилетия количества автотранспорта и широким использованием в 1990-е годы этилированных низкокачественных сортов бензина. Кроме того, сравнение уровня свинца в натальном волосяном покрове новорожденных щенков с таковым в волосяном покрове взрослых нерп (отношение 1:30) говорит о том, что темп накопления этого металла в ладожской биоте остается высоким.

Хорошо известно, что среди абиотических факторов, влияющих на накопление химических элементов в тканях наземных и водных позвоночных, одним из наиболее значимых является концентрация доминирующих элементов в той или иной геохимической провинции, в границах которой эти животные обитают [22]. В нашем случае установлено, что факт столь значительного сокращения в течение 10 лет содержания в организме ладожской нерпы ртути, кадмия и никеля служит дополнительным подтверждением

того, что относительно экосистемы Ладожского озера, в частности обитающих в озере тюленей, на первое место по своей значимости выходит именно антропогенное загрязнение, а не особенности геохимических условий.

## ВЫВОДЫ

В современных условиях нагрузка тяжелых металлов (в первую очередь, ртути и свинца) на популяцию ладожской кольчатой нерпы весьма значительна. Эти токсиканты являются серьезным лимитирующим фактором для популяции, но на сегодняшний день непосредственной угрозы существованию нерпы в Ладожском озере они не представляют.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Неоценимую помощь в сборе экспериментального материала, послужившего основой для написания данной работы, оказали В. И. Богданов, М. Т. Макарова, М. А. Терехов, О. Стенманн, Б. Вестерлинг, М. В. Веревкин.

Особую благодарность хочется адресовать С. Л. Ерофеевской – сотруднику аналитической лаборатории Учреждения Российской академии наук Института леса Карельского научного центра РАН за помощь в выполнении химических анализов.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке фонда Raija ja Ossi Tuuliaisen Säätiö.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безель В. С., Большаков В. Н., Воробейчик Е. Л. Популяционная экотоксикология. М.: Наука, 1994. 80 с.
2. Ивантер Э. В. Популяционная экология мелких млекопитающих таежного Северо-Запада СССР. Л.: Наука, 1975. 246 с.
3. Ивантер Э. В., Медведев Н. В. Экологическая токсикология природных популяций птиц и млекопитающих Севера. М.: Наука, 2007. 229 с.
4. Ивантер Э. В., Медведев Н. В., Паничев Н. А. Содержание тяжелых металлов в организме ладожской кольчатой нерпы // Экология. 1998. № 2. С. 116–120.
5. Клевезаль Г. А. Регистрирующие структуры млекопитающих в зоологических исследованиях. М.: Наука, 1988. 286 с.
6. Красная книга Карелии. Петрозаводск: Карелия, 1985. 184 с.
7. Красная книга Карелии. Петрозаводск: Карелия, 1995. 286 с.
8. Красная книга Республики Карелия. Петрозаводск: Карелия, 2007. 368 с.
9. Красная книга РСФСР (животные). М., 1983. 456 с.
10. Красная книга СССР: Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды животных и растений. М., 1984. 392 с.
11. Медведев Н. В. Птицы и млекопитающие Карелии как биоиндикаторы химических загрязнений. Петрозаводск, 1998. 135 с.
12. Медведев Н. В. Комплексная оценка загрязненности природной среды с использованием теплокровных животных в качестве биоиндикаторов // Тез. докладов юбилейной науч. конф., посвященной 275-летию РАН. Петрозаводск, 2001 С. 88–89.
13. Медведев Н. В., Сипиля Т., Паничев Н. А. и др. Динамика концентрации тяжелых металлов в органах и тканях ладожской кольчатой нерпы с 1990 по 2000 г. // Динамика популяций охотничьих животных Северной Европы: Материалы III Международного симпозиума, 16–20 июня 2002 года, г. Сортавала, Республика Карелия, Россия. Петрозаводск, 2003. С. 130–134.
14. Москалев Ю. М. Минеральный обмен. М.: Наука, 1985. 288 с.
15. Drabkova V. G., Remyantsev V., Sergeeva L. V., Slepukhina T. Ecological problems of Lake Ladoga: causes and solutions: The First International Lake Ladoga Symposium // Hydrobiologia. 1996. Vol. 322. P. 1–7.
16. Frumin G. T., Chernykh O. A., Krylenkova N. L., Scherbak V. A. Lake Ladoga: chemical pollution and biochemical self-purification: The First International Lake Ladoga Symp. // Hydrobiologia. 1996. Vol. 322. P. 143–147.
17. Honda K., Ichihashi H., Tatsukawa R. Tissue distribution of heavy metals and their variations with age, sex and habitat in Japanese serows (*Capricornis crispus*) // Arch. Environ. Contam. and Toxicol. 1987. Vol. 16. № 5. P. 551–561.
18. Hyvärinen H., Sipilä T. Heavy Metals and High Pup Mortality in the Saimaa Ringed Seal Population in Eastern Finland // Mar. Pollut. Bull. 1984. Vol. 15. № 9. P. 335–337.
19. IUCN Red List of Threatened Animals. IUCN. Switzerland: Gland, 1996. 368 p.
20. Medvedev N., Panichev N., Hyvärinen H. Levels of heavy metals in seals of Lake Ladoga and the White Sea // Sci. Total Environ. 1997. Vol. 206. P. 95–105.
21. Red Data Book of East Fennoscandia. Helsinki, 1998. 351 p.
22. Wren C. D. Mammals as biological monitors of environmental metal levels // Environ. Monit. and Assessment. 1986. Vol. 6. P. 127–144.

УДК 630\*587.2:[630\*421+630\*459]

**БОРИС ВЛАДИМИРОВИЧ РАЕВСКИЙ**

кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник Института леса КарНЦ РАН  
*raevski@drevlanka.ru*

**ВИКТОР ВЛАДИМИРОВИЧ ТАРАСЕНКО**

заведующий сектором ГИС-технологий отдела геоинформационных систем РЦНИТ ПетрГУ  
*victor.tarasenko@karelia.ru*

**ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ АНАНЬЕВ**

кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией лесоведения и лесоводства Института леса КарНЦ РАН  
*ananyev@krc.karelia.ru*

## К ВОПРОСУ О КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКЕ СТЕПЕНИ ПОВРЕЖДЕНИЯ ЛЕСОВ НП «ВОДЛОЗЕРСКИЙ»

С использованием мультиспектрального космического снимка высокого разрешения и материалов цифровой картографической базы данных ГИС НП «Водлозерский» произведена оценка посткатастрофических потерь древесины в коренных высоковозрастных ельниках вдоль западного побережья оз. Водлозера, явившихся следствием массового ветровала и развившейся впоследствии вспышки численности короеда-типографа в 2000–2006 годах.

Ключевые слова: мультиспектральный космический снимок, геоинформационные системы, катастрофические нарушения, коренные ельники

Как известно, малонарушенные массивы темнохвойной тайги представляют собой мозаику лесных биогеоценозов, основная доля которых характеризуется выраженной разновозрастностью древостоя, находится на финальной стадии растительной сукцессии и существует в динамически равновесном режиме так называемой оконной динамики.

Однако для естественных таежных лесов также характерны природные катастрофические явления, какими являются массовые ветровалы и пожары. В этом аспекте ветровал, произошедший в юго-западной части НП «Водлозерский» в мае 2000 года, представляет собой типичный пример масштабного обновления таежных лесов. Появление обширной компактной ветровальной площади и множества локальных вывалов, ухудшение общего жизненного состояния множества деревьев существенно изменяют экологическую обстановку в зоне ветровала. В короткие сроки запускаются механизмы сукцессии растительных сообществ и создаются особо бла-

гоприятные условия для развития популяций агрессивных видов стволовых вредителей. Так, уже упомянутым ветровалом оказались в разной степени затронуты коренные высоковозрастные ельники в полосе шириной до 5 км и длиной свыше 40 км вдоль всего западного побережья Водлозера. Только в районе турбазы Охтома общая площадь сплошного вывала составила не менее 637 га с объемом ветровальной древесины порядка 131,6 тыс. кубм [1]. Сложившиеся обстоятельства привели к возникновению здесь вспышки численности короеда-типографа (*Ips typographus* (L)). Отрабатывая за два года кормовую базу в виде ветровальной древесины, короед-типограф стал заселять живые деревья ели и мигрировать в еловые насаждения по всему еловому массиву вдоль западного берега Водлозера и в районе Пильмасозера [2]. В результате всех произошедших событий коренные старовозрастные ельники указанного района понесли существенные итоговые потери в виде большого числа буреломных, ветровальных и сухостойных

деревьев, что потребовало достаточно оперативной, научно обоснованной оценки масштабов повреждений.

Для достижения поставленной цели специалистами таких учреждений, как Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Московский государственный университет леса, Институт леса Карельского научного центра РАН [4], [5], [6], была сделана попытка использовать материалы космической съемки высокого разрешения вкупе с материалами цифровой картографической базы данных геоинформационной системы парка (ЦКБД ГИС НП «Водлозерский») и данными наземных полевых учетов. В частности, все исследователи имели в своем распоряжении

цифровое изображение земной поверхности в мультиспектральном режиме, полученное с помощью спутника QuickBird (рис. 1). Для решения поставленных задач использовался синтез трех каналов снимка – ближнего инфракрасного (760–900 нм), красного (630–690 нм) и зеленого (520–600 нм). Дешифрирование снимков, то есть классификация пикселей по цветовым оттенкам и отнесение последних к целевым классам – куртинам сухостоя и участкам ветровала, проводилась авторами указанных работ с использованием различных методических подходов и программного обеспечения. Последнее, собственно, и предопределило расхождения в итоговых оценках, что будет обсуждено ниже.



Рис. 1. Снимок Quickbird с наложенным слоем CLF 10

Снимок был получен в проекции Гаусса–Крюгера в системе координат 1942 года (Пулково, 7-я зона). При наложении слоев поквартальной и поведельной баз данных ГИС парка, а также маршрутов полевых исследований с координатами учетных точек, взятых с помощью GPS, наблюдались определенные несоответствия. Поэтому была выполнена геометрическая корректировка совокупности фрагментов слоев: покрытые лесом земли (CLF10), не покрытые лесом земли (CLF30) и нелесные земли (CLF40) ЦКБД по лесному фонду Национального парка

«Водлозерский» по кварталам, покрывающим космический снимок. Указанная корректировка выполнялась с учетом данных полевых GPS-измерений местоположения соответствующих квартальных столбов таким образом, чтобы цифровые объекты слоев ЦКБД по лесному фонду перемещались эквидистантно для наиболее точного совпадения контуров выделов ЦКБД с ситуацией космического снимка.

Далее мы применяли технологию формирования цифровых векторных объектов по растровому изображению, которая осуществлялась в два этапа:



- I. Подготовка исходных данных:
  1. Преобразование растрового изображения к формату TIFF/BMP, 256 цветов (8-бит);
  2. Создание текстовой таблицы, содержащей матрицу координат (X,Y) центроидов пикселей растрового изображения (специальное программное обеспечение);
  3. Создание в программном обеспечении (ПО) MapInfo таблицы, содержащей точечные объекты по данным матрицы координат текстового файла (стандартные процедуры MapInfo);
  4. Регистрация растрового изображения в ПО MapInfo в проекции «план-схема» (1 единица – 1 пиксел);
  5. Формирование рабочего набора MapInfo, содержащего растровое изображение и таблицу точечных объектов – центроидов пикселей.
- II. Формирование векторных объектов по классификатору:
  1. Создание набора отдельных точек требуемых цветов (RGB-изображений) путем выбора на экране ПК точечных объектов (центроидов пикселей) для создания таблицы классификатора векторных объектов;
  2. Выбор области растрового изображения, где будет производиться поиск соответствующих классификатору пикселей (часть растрового изображения или все растровое изображение);
  3. Запуск процедуры поиска соответствующих классификатору пикселей для формирования таблицы ПО MapInfo, содержащей отдельные точечные объекты центроидов;
  4. Трансформация таблицы векторных точечных объектов в требуемую систему координат (специальное программное обеспечение);
  5. Регистрация растрового изображения в ПО MapInfo в требуемой проекции;
  6. Формирование площадных квадратных ячеек, длина стороны которых соответствует размеру пиксела растрового изображения, зарегистрированного в выбранной системе координат.

На снимке были выбраны те участки, которые на основании натурных полевых исследований однозначно идентифицировались как куртины сухостоя и ветровала. В пределах этих участков вручную проводилось формирование набора точек требуемых цветов (различные оттенки зеленого цвета) для создания таблицы классификатора векторных объектов. Поиск соответствующих классификатору пикселей велся не в целом по снимку, а по отдельным областям (лесохозяйственным выделам), где вероятность ошибочной классификации была бы минимальной. По подсчетам Эйдлиной [6], 95 % площади сухостоя и более 97 % площади ветровала пришлось на еловые насаждения, а в ельниках, в свою очередь, 74 % площади сухостоя и 84,6 % площади ветровала оказалось сосредоточено в насаждениях 10–12-го классов возраста. Поэтому, руководствуясь тематической картой корен-

ных ельников Водлозерского лесничества, в кварталах, покрытых снимком, в анализ включались только выделы, представляющие собой в чистом виде именно такие насаждения, начиная с VIII класса возраста без облесенных болотных участков и облачности. Предпочтение отдавалось участкам, где естественные границы древостоя, видимые по снимку, максимально точно совпадали с границами выдела (векторный слой CLF10 ЦКБД).

Таким образом, в районе Пильмасозера – северо-западное побережье Водлозера были проанализированы 52 выдела в 10 кварталах. Сначала по снимку в гектарах определялась общая площадь области поиска (площадь векторного контура выдела). Далее подсчитывалось общее количество выбранных пикселей (точечных объектов), которое умножалось на площадь одного пикселя (5,76 м<sup>2</sup>). Определялась доля (%) выбранной площади от общей площади поиска. Окончательная величина поврежденной площади (га) подсчитывалась как доля выбранной площади от площади выдела, которая была определена именно лесоустройством. Последняя не всегда точно совпадала с площадью поиска на снимке, вычисленной средствами MapInfo.

После этого рассчитывалось количество деревьев, которые могли находиться на поврежденной площади. Для этого поврежденная площадь, выраженная в квадратных метрах, делилась на площадь проекции кроны, равной 9,4 м<sup>2</sup>. Такую величину площади проекции кроны имеют деревья ели в возрасте 160–200 лет. Рассчитанное количество стволов умножалось на средний объем ствола. Данный параметр определялся по таблице объемов стволов ели для Карелии в соответствии со средним диаметром и высотой данного элемента леса на выделе [3]. Далее рассчитывались: общий объем погибшей древесины на выделе, его доля от запаса выдела и величина отпада на 1 га.

Доля погибшей древесины от запаса выдела была усреднена по всей выборке из 52 выделов, и эта расчетная величина была экстраполирована на 957 выделов в 70 кварталах по западному берегу Водлозера, которые находились в зоне ветровала и вспышки численности короеда-типографа. В расчет общих потерь древесины были включены только выделы, где представлены коренные высоковозрастные ельники. Средний класс возраста – 10.

В результате проведенных оценок была построена тематическая карта распределения обработанной выборки выделов по степени их повреждения, как по площади, так и по запасу (рис. 2). Анализ данных рисунков позволяет заключить, что кроме района турбазы Охтома, где, как было уже сказано, ряд выделов были вывалены практически полностью, на северо-западе Водлозера сильнее всех пострадал квартал 40. Некоторые выделы этого квартала потеряли свыше 80 % запаса. Как уже говорилось, ряд авторов по своим



и ГИС данной особо охраняемой территории для целей лесного и лесопатологического мониторинга. Без использования данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗ) невозможна точная количественная оценка последствий различного рода катастрофических нарушений в

крупных лесных массивах. Особенно актуальным в свете сказанного является дальнейшее совершенствование методики дешифрирования такого рода снимков, что предполагает совместную работу специалистов в самых разных областях знаний.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ананьев В. А., Полевой А. В., Раевский Б. В., Грабовик С. И., Хумала А. Э., Щербаков А. Н. Изучение биоэкологических последствий массового ветровала в НП «Водлозерский» // Структура и динамика природных экосистем и формирование народной культуры на территории НП «Водлозерский»: Материалы отчетной конф. о науч. деятельности НП «Водлозерский» по итогам 2002–2004 годов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. С. 15–17.
2. Полевой А. В., Щербаков А. Н., Хумала А. Э., Налдеев Д. Ф. Вспышка короедатипографа (*Ips typographus* L.) как одно из последствий массового ветровала в национальном парке «Водлозерский» // Водлозерские чтения: Материалы науч.-практ. конф., посвящ. 15-летию НП «Водлозерский». Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. С. 96–102.
3. Третьяков Н. В., Горский П. В., Самойлович Г. Г. Справочник таксатора. М.: Лесная промышленность, 1965. 458 с.
4. Хумала А. Э., Полевой А. В., Шалаев В. С., Галкин Ю. С., Щербаков А. Н., Налдеев Д. Ф., Никула А., Ройнинен Х. Оценка возможности применения аэрокосмических методов для мониторинга лесного покрова в Национальном парке «Водлозерский» // Водлозерские чтения: Материалы науч.-практ. конф., посвящ. 15-летию НП «Водлозерский». Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. С. 106–112.
5. Шаталов А. В., Жирин В. М., Сухих В. И., Эйдлига С. П. К оценке повреждения лесов Национального парка «Водлозерский» по космическим изображениям // Водлозерские чтения: Материалы науч.-практ. конф., посвящ. 15-летию НП «Водлозерский». Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. С. 102–106.
6. Эйдлига С. П. Оценка потерь древесины в Национальном парке «Водлозерский» на основе материалов космической съемки высокого разрешения // Водлозерские чтения: Материалы науч.-практ. конф., посвящ. 15-летию НП «Водлозерский». Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. С. 113–118.

УДК 616.831-005

**ГАЛИНА ПАВЛОВНА БЕЛОУСОВА**

кандидат биологических наук, доцент кафедры физиологии человека и животных медицинского факультета ПетрГУ  
*belousova@psu.karelia.ru*

**ОЛЬГА ВАСИЛЬЕВНА ДОРШАКОВА**

кандидат медицинских наук, врач-ординатор неврологического отделения Больницы скорой медицинской помощи г. Петрозаводска  
*dorsh@rambler.ru*

**ЮРИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ ЛУПАНДИН**

доктор медицинских наук, заведующий кафедрой физиологии человека и животных, декан медицинского факультета ПетрГУ  
*imaksim@petrsu.ru*

**АЛЕКСАНДР ЮРЬЕВИЧ МЕЙГАЛ**

доктор медицинских наук, профессор кафедры физиологии человека и животных медицинского факультета ПетрГУ  
*meigal@petrsu.ru*

**НАТАЛЬЯ СЕРГЕЕВНА СУББОТИНА**

доктор медицинских наук, заведующий кафедрой неврологии медицинского факультета ПетрГУ  
*subbotina@karelia.ru*

## **СОСТОЯНИЕ ВЕГЕТАТИВНОЙ РЕГУЛЯЦИИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА У ЛИЦ С ВЕРТЕБРАЛЬНО-БАЗИЛЯРНОЙ НЕДОСТАТОЧНОСТЬЮ**

Статья посвящена проблеме разработки критериев оценки состояния активности отделов вегетативной нервной системы у больных с хронической вертебрально-базиллярной недостаточностью мозгового кровообращения в условиях Карелии методом кардиоритмографического исследования вариабельности ритма сердца при активной ортостатической пробе.

Ключевые слова: вариабельность ритма сердца, кардиоритмография, нарушения мозгового кровотока, вертебрально-базиллярная недостаточность, вегетативная нервная система, активная ортостатическая проба, половая принадлежность, Русский Север

Сосудистые заболевания головного мозга являются актуальной медицинской и социальной проблемой в связи с их широкой распространенностью, высокой инвалидизацией и летальностью больных [7], [13]. Дисциркуляторные расстройства в вертебрально-базиллярном бассейне (ВББ) составляют до 32 % всех диагностируемых нарушений мозгового кровообращения, 70 % протекает в виде транзиторных ишемических атак [13].

В процессе естественной жизнедеятельности практически у всех здоровых людей частота сердечных сокращений (ЧСС) непрерывно изменяется. Специальные исследования показали [1], [2], [4], [8], что именно эти сдвиги вариабельности ритма сердца (ВРС) позволяют получить представление о функциональном состоянии сердца, его нейрогуморальной регуляции, а также о функциональном состоянии организма в целом. В этом отношении нам представлялось перспективным для оценки состояния вегетативной нервной системы (ВНС) у больных при хроническом нарушении мозгового кровообра-

щения в ВББ исследование вегетативной регуляции сердечного ритма с привлечением метода кардиоритмографии. Учитывая тот факт, что сердечный ритм служит индикатором отклонения нейрогуморальных влияний в организме, полагаем, что исследование ВРС при обследовании больных с нарушением мозгового кровообращения различной этиологии и патогенеза может иметь исключительно важное прогностическое и диагностическое значение. Вертебрально-базиллярную недостаточность мозгового кровообращения у больных относят к числу значимых социально-медицинских проблем трудоспособного населения на Севере [6], [7], [12], [13], [14], поскольку воздействие неблагоприятных климато-экологических факторов [5], [10] приводит к утяжелению протекания патологии и инвалидизации. Основное внимание исследователей [11], [12] сосредоточено на изучении эпидемиологии, а также общих представлений клинической и патогенетической картины развития нарушений мозгового кровообращения. В то же время один

из аспектов данной проблемы, касающийся состояния вегетативной регуляции функций у больных при хроническом нарушении мозгового кровообращения, остается практически малоизученным [3], [6], [14].

Цель нашей работы – исследовать вегетативную регуляцию сердечного ритма при хронической вертебрально-базилярной недостаточности мозгового кровообращения в условиях Севера.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование выполнялось на базе Петрозаводского государственного университета, на кафедрах неврологии и физиологии человека и животных, в лаборатории функциональной диагностики в составе Центра коллективного пользования (ЦКП) (руководитель – профессор А. Ю. Мейгал). Клинический материал исследования составили данные обследования 140 пациентов с нарушением мозгового кровообращения в ВББ, находившихся на лечении в неврологическом отделении Больницы скорой медицинской помощи г. Петрозаводска. Из группы исследования выделено 70 пациентов в возрасте от 40 до 60 лет для изучения вегетативной регуляции сердечного ритма, из них 48,6 % пациента контрольной группы (условно здоровые) и 51,4 % пациента с нарушением мозгового кровообращения в ВББ при стенозирующем поражении экстракраниальных артерий, среди которых 22,2 % перенесли острое нарушение мозгового кровообращения ишемического типа и 77,8 % имеют дисциркуляторную энцефалопатию 2–3-й степени. Средний возраст составлял  $53,0 \pm 10,9$  года.

Республика Карелия по климатозоологическим условиям входит в состав территории Баренцева Евро-Арктического региона России с неблагоприятным сочетанным воздействием метеорологических факторов на организм, в числе которых низкие температуры, повышенная геомагнитная активность, а также неблагоприятный световой режим [5], [10]. Лица мужского пола были разделены на две группы: контрольную ( $n = 14$ ) – здоровые (без клинических проявлений вертебрально-базилярной недостаточности) и опытную ( $n = 16$ ) – больные с нарушением кровообращения в ВББ. Аналогично выделялись группы и у лиц женского пола: контрольная группа ( $n = 20$ ) и опытная ( $n = 20$ ). Активность отделов вегетативной нервной системы изучалась с использованием вегетотестера серии «ВНС-Спектр» фирмы «НейроСофт» (г. Иваново) с программным обеспечением «Поли-Спектр-Ритм» для регистрации электрокардиограммы и анализа ВРС [9]. Состояние вегетативной регуляции сердечного ритма оценивали в покое (лежа) и при активной ортостатической пробе (АОП) [9]. Анализ ВРС осуществляли визуально-логическим методом [4], [8], а также на основе принятого международного соглашения интерпретации временных (статистических) показателей ВРС [15]. По ритмограмме вычислялись следующие

временные показатели ВРС: средняя длительность интервалов R-R между нормальными синусовыми кардиоциклами (RRNN, мс); R-R min и R-R max, мс; стандартное отклонение величин нормальных интервалов R-R (SDNN, мс); квадратный корень из среднего квадратов разностей величин последовательных пар нормальных интервалов R-R (RMSSD, мс); количество пар соседних интервалов NN, различающихся более чем на 50 мс в течение всей записи (pNN50, %), отражающих дыхательную синусовую аритмию; коэффициент вариации (CV, %). По ритмограмме анализировали переходный период при АОП, который имеет самостоятельное диагностическое значение. Анализ переходного периода АОП проводили на основе величины коэффициента  $K_{30/15}$  (отношения значения R-R-интервала в районе 30 сокращений сердца (R-R<sub>30</sub>), соответствующего самому длинному кардиоинтервалу, от начала вставания, к значению R-R-интервала в районе 15 сокращений сердца (R-R<sub>15</sub>), соответствующего самому короткому кардиоинтервалу) [9].

Обработку результатов проводили при помощи статистической программы Microsoft Excel. Достоверность различий между средними тенденциями определяли по критерию Стьюдента (для независимых выборок); проверка статистических гипотез проводилась на уровне значимости  $P < 0,05$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведение сравнительного анализа типовых индивидуальных записей ритмограммы у больных с хронической вертебрально-базилярной недостаточностью мозгового кровообращения и здоровых лиц в покое и при АОП, а также анализа среднестатистических показателей ритмограмм позволило установить характерные особенности механизмов регуляции сердечного ритма в различных условиях ортостатической устойчивости. Проведенный нами визуально-логический анализ ритмограммы в клиническом случае у больного Ш., 49 лет, с ВБН в покое (рис. 1а) выявил наличие трех типов волн: высокой (HF), низкой (LH) и очень низкой частоты (VLF) с доминированием волн очень низкой частоты. При АОП (рис. 1б) величина коэффициента  $K_{30/15}$  была ниже нормы, ( $K_{30/15} = 1,02$ ), что указывает на низкую реактивность парасимпатического отдела ВНС [9]. При этом в вегетативном обеспечении ортостатической пробы преобладали волны VLF, указывающие на активацию церебральных эрготропных и гуморально-метаболических влияний в регуляции сердечного ритма. У здорового испытуемого Б. той же возрастной группы в покое (рис. 2а) были также выражены волны различной частоты с существенным доминированием HF-волн, что указывает на адекватные рефлекторные симпатопарасимпатические влияния в регуляции сердечного ритма. Переходный период АОП (рис. 2б) сопровождался нормальной реактивностью парасимпатического отдела ВНС ( $K_{30/15} = 1,34$ ) [9].

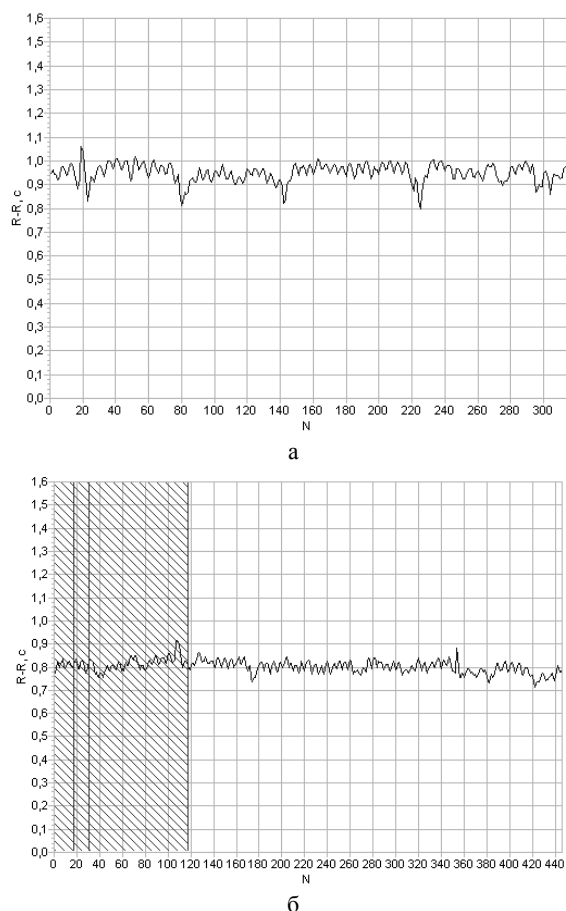


Рис. 1. Записи ритмограммы больного Ш., 49 лет, с вертебрально-базилярной недостаточностью мозгового кровообращения:

а – фон; б – АОП с измерением коэффициента  $K_{30:15}$ .

По оси ординат – длительность R-R интервала, с;  
по оси абсцисс – N, порядковый номер R-R интервала

В клиническом случае из женской группы проведенный визуально-логический анализ ритмограммы у больной Г. 51 года с ВБН выявил, что в покое (рис. 3а) доминировали VLF-волны. Это указывает на переход регуляции сердечного ритма с рефлекторного, вегетативного уровня руководства на более низкий – гуморально-метаболический, который не способен быстро обеспечивать гомеостазис [1]. В переходном периоде АОП (рис. 3б) реактивность парасимпатического отдела ВНС была снижена (коэффициент  $K_{30:15} = 1,01$ ) [9]; вегетативное обеспечение ортостатической пробы осуществлялось при активации преимущественно церебральных эрготропных и гуморально-метаболических влияний на сердечный ритм. Для сравнения: у здоровой испытуемой З. 46 лет (рис. 4а) в покое на ритмограмме были выражены волны короткого периода (HF), при переходном периоде АОП (рис. 4б) отмечалась высокая реактивность парасимпатического отдела ВНС, величина коэффициента  $K_{30:15}$  равнялась 1,5, указывая на удовлетворительный уровень адаптационных резервов организма [1].

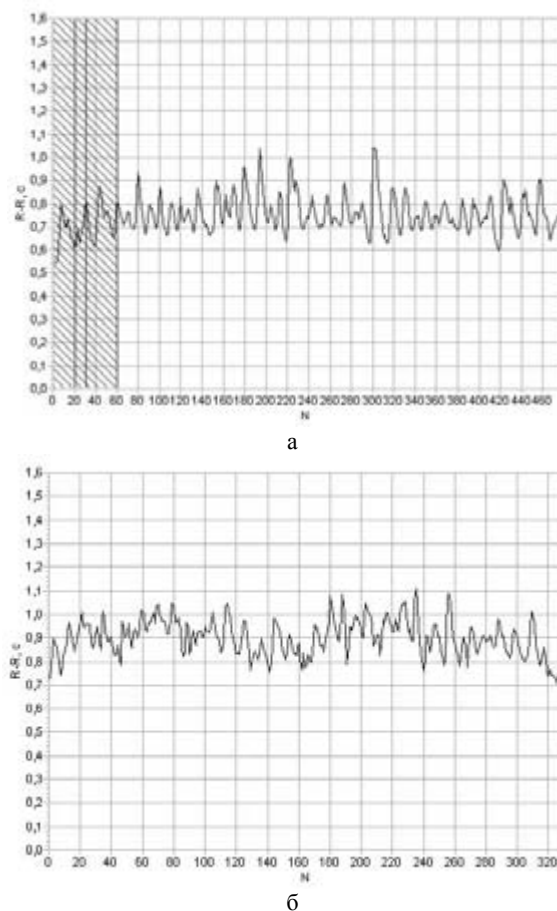


Рис. 2. Записи ритмограммы здорового испытуемого Б., 42 года:

а – фон; б – АОП с измерением коэффициента  $K_{30:15}$ .

По оси ординат – длительность RR-интервала, с;  
по оси абсцисс – N, порядковый номер RR-интервала

Анализ среднестатистических показателей ВСП у больных с ВБН мужской группы по сравнению со здоровыми (табл. 1) выявил, что у больных мужской группы в фоновых условиях покоя показатели временного анализа ВРС достоверно не отличались от контроля. Вместе с тем наблюдалась тенденция снижения общей ВРС. При АОП у больных по сравнению с контролем средняя длительность кардиоинтервалов (величина RRNN) также не претерпевала существенных изменений. При этом показатели ВРС (SDNN и CV, %) снижались на 48,1 % ( $P < 0,01$ ) и на 53,2 % ( $P < 0,01$ ) соответственно, что указывает на смещение баланса регуляторных влияний ВНС на синусовый узел в сторону преобладания симпатического отдела. Аналогично изменялись и показатели RMSSD и pNN50, %, величины снижения при этом составляли 68 % ( $P < 0,05$ ) и 76,7 % ( $P < 0,05$ ) соответственно. При анализе переходного периода было установлено, что величина коэффициента  $K_{30:15}$  была в среднем  $1,10 \pm 0,14$ , что свидетельствует о недостаточной вагусной функции. В женской группе (табл. 2) в фоновых условиях покоя у больных с ВБН по сравнению с контролем величина

основного показателя ВРС, стандартного отклонения (SDNN) была снижена на 46,8 % ( $P < 0,01$ ), что свидетельствует о смещении вегетативного баланса в состоянии покоя в сторону преобладания симпатического отдела ВНС. При АОП у больных средняя длительность кардиоинтервалов снижалась, как и у контрольных. Однако анализ сложившегося баланса регуляторных влияний на си-

нусовый узел показал, что данные ВРС (SDNN и CV, %) не изменялись, отмечалась лишь тенденция к снижению. Показатель RMSSD снижался в меньшей степени, чем в контроле. При анализе переходного периода было установлено, что величина коэффициента  $K_{30/15}$  была в среднем  $1,10 \pm 0,14$ , что свидетельствует о низкой реактивности парасимпатического отдела ВНС [9].

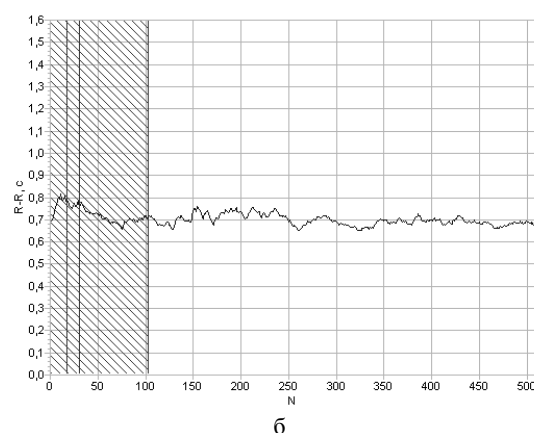
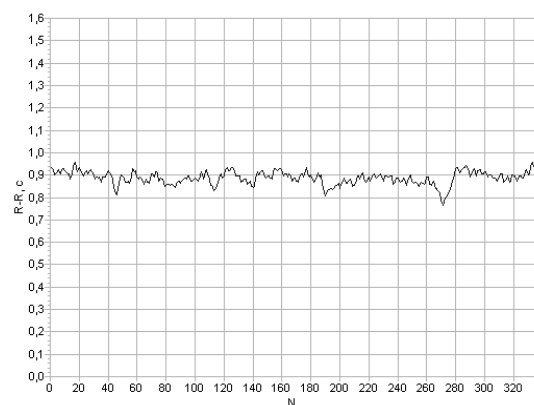


Рис. 3. Записи ритмограммы больной Г., 51 год, с вертебрально-базилярной недостаточностью мозгового кровообращения:

а – фон; б – АОП с измерением коэффициента  $K_{30/15}$ ;  
По оси ординат – длительность R-R интервала, с;  
по оси абсцисс – N, порядковый номер R-R интервала

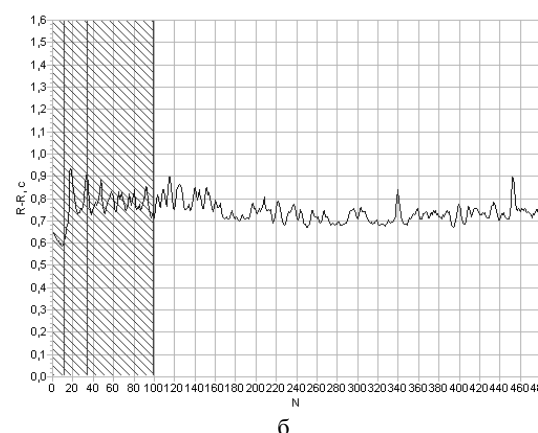
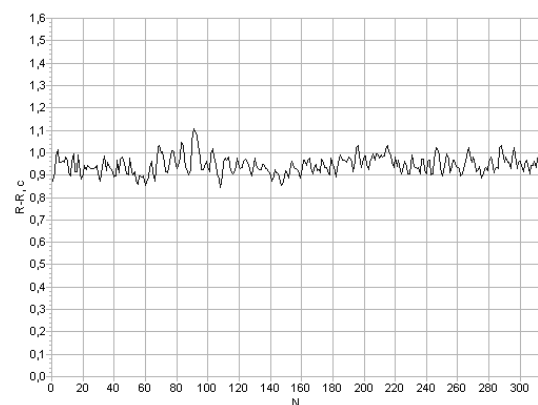


Рис. 4. Записи ритмограммы у здоровой испытуемой З., 46 лет:

а – фон; б – АОП с измерением коэффициента  $K_{30/15}$ ;  
по оси ординат – длительность R-R интервала, с;  
по оси абсцисс – N, порядковый номер R-R интервала

Таблица 1

Показатели вариабельности ритма сердца при АОП в мужской группе с вертебрально-базилярной недостаточностью

Параметр	Мужская группа							
	Контроль (14)				Опыт (16)			
	Фон	АОП	$\Delta$ , %	P	Фон	АОП	$\Delta$ , %	P
R-R min, mc	709,5 $\pm$ 18,4	595,9 $\pm$ 14,1	$\downarrow$ 16	<0,001	704,5 $\pm$ 62,5	701,0 $\pm$ 71,8	$\downarrow$ 0,4	>0,05
R-R max, mc	992,7 $\pm$ 31,3	835,0 $\pm$ 26,8	$\downarrow$ 15,9	<0,001	1092,0 $\pm$ 72,1	852,0 $\pm$ 67,8	$\downarrow$ 21,9	<0,05
RRNN, mc	847,5 $\pm$ 22,3	679,5 $\pm$ 15,8	$\downarrow$ 19,8	<0,001	908,6 $\pm$ 55,6	775,0 $\pm$ 70,8	$\downarrow$ 14,7	>0,05
SDNN, mc	47,8 $\pm$ 4,3	40,0 $\pm$ 5,1	$\downarrow$ 16,31	>0,05	38,9 $\pm$ 7,9	20,2 $\pm$ 2,6	$\downarrow$ 48,1	<0,01
RMSSD, mc	50,6 $\pm$ 3,1	30,3 $\pm$ 3,0	$\downarrow$ 40,1	<0,001	42,5 $\pm$ 16,0	13,6 $\pm$ 2,9	$\downarrow$ 68	<0,05
pNN50, %	10,8 $\pm$ 2,8	4,2 $\pm$ 1,7	$\downarrow$ 61,1	<0,05	7,3 $\pm$ 2,9	1,7 $\pm$ 1,5	$\downarrow$ 76,7	<0,05
CV, %	5,6 $\pm$ 0,4	5,9 $\pm$ 0,7	$\uparrow$ 3,9	>0,05	5,6 $\pm$ 1,1	2,6 $\pm$ 0,3	$\downarrow$ 53,2	<0,01
$K_{30/15}$		1,25 $\pm$ 0,13				1,10 $\pm$ 0,14		

Таблица 2

Показатели вариабельности ритма сердца при АОП в женской группе с вертебрально-базилярной недостаточностью

Параметр	Женская группа							
	Контроль (20)				Опыт (20)			
	Фон	АОП	$\Delta, \%$	P	Фон	АОП	$\Delta, \%$	P
R-R min, mc	539,0±63,1	621,7±17,9	↑15	>0,05	648,1±50,7	556,9±34,6	↓14,1	>0,05
R-R max, mc	1002,3±27,5	835,3±18,5	↓16,7	<0,001	1001,9±31,2	846,1±36,3	↓15,6	<0,01
RRNN, mc	867,7±22,2	710,2±16,5	↓18,2	<0,01	883,0±27,7	740,2±32,5	↓16,2	<0,01
SDNN, mc	63,3±8,9	33,2±2,2	↓47,6	<0,01	33,7±6,6	30,4±4,2	↓9,8	>0,05
RMSSD, mc	54,6±10,1	16,8±1,3	↓69,2	<0,001	41,4±8,3	25,1±5,2	↓34,9	<0,05
pNN50, %	16,8±2,6	1,42±0,55	↓91,7	<0,01	6,3±2,3	2,29±0,89	↓63,7	>0,05
CV, %	7,4±1,2	4,7±0,3	↓36,5	<0,05	5,03±0,79	4,56±0,45	↓9,6	>0,05
K <sub>30/15</sub>		1,26±0,13				1,11±0,03		

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведение сравнительного визуально-логического анализа записей ритмограмм, а также среднестатистических показателей временного анализа ВРС у больных с вертебрально-базилярной недостаточностью мозгового кровообращения и здоровых лиц в покое и при АОП позволило установить характерные особенности вегетативной регуляции сердечного ритма в различных условиях ортостатической устойчивости. Так, в регуляции сердечного ритма в покое у больных с хроническим нарушением мозгового кровообращения в ВББ доминируют волны очень низкой частоты (VLF), а переходный период АОП характеризуется низкой реактивностью парасимпатического отдела ВНС. Вегетативное обеспечение деятельности у больных в ортостатической пробе протекало на фоне преимущественного активирования церебральных эрготропных и гуморально-метаболических влияний на ритм сердца, что свидетельствует о значительном нарушении вегетативного гомеостаза и существенном ухудшении функционального состояния организма. При этом в состоянии покоя у больных с хроническими формами нарушения мозгового кровообращения в ВББ женской группы в вегетативном балансе преоблада-

ли влияния симпатического отдела ВНС, в то время как у больных мужской группы такие изменения не выявлялись. При АОП у больных женской группы отмечалась ригидность сердечного ритма и недостаточность вагусной функции. В мужской группе больных регуляторные влияния ВНС на синусовый узел смещались в сторону преобладания симпатического отдела ВНС на фоне вагусной недостаточности.

Таким образом, методом кардиоритмографического исследования ВРС было выявлено, что у больных с хроническим нарушением мозгового кровообращения в ВББ наблюдается существенная перестройка механизмов нейрогуморальной регуляции сердца, опосредованная вагусной недостаточностью. При этом нарушение вегетативного гомеостаза в большей степени сказывается на утяжелении состояния в женской части популяции больных с вертебрально-базилярной недостаточностью мозгового кровообращения с формированием церебрально-кардиального синдрома и замкнутого патогенетического круга прогрессирования сосудистого заболевания головного мозга.

Работа выполнена при поддержке РГНФ в рамках научно-исследовательского проекта «РГНФ № 09-06-42604 а/с ГОУ ВПО ПетрГУ».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баевский Р. М. Проблема оценки и прогнозирования функционального состояния организма и ее развитие в космической медицине // Успехи физиол. наук. 2006. Т. 37. № 3. С. 42–57.
2. Баевский Р. М., Кириллов О. И., Клецкин С. З. Математический анализ изменений сердечного ритма при стрессе. М.: Наука, 1984. 245 с.
3. Белоусова Г. П., Доршакова О. В., Мейгал А. Ю. Динамика изменения показателей вариабельности ритма сердца при активной ортостатической пробе у здоровых лиц во втором периоде зрелого возраста // Сибирский консилиум. Медико-фармацевтический журнал. 2007. Т. 62. № 7. С. 186–187.
4. Березный Е. А., Рубин А. М. Практическая кардиоритмография. СПб.: НПО «Нео», 1997. 120 с.
5. Доршакова Н. В. Качество окружающей среды и здоровье человека в условиях Карелии. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1997. 204 с.
6. Доршакова О. В., Белоусова Г. П., Субботина Н. С. Динамика изменений показателей вариабельности ритма сердца при активной ортостатической пробе у больных с вертебрально-базилярной недостаточностью // Северное измерение. Motor Control: Nordic Dimension-2008: Материалы II Российской, с междунар. участием конф. по управлению движением. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008. С. 36–37.
7. Дуданов И. П., Субботина Н. С., Доршакова О. В. Этиологические и клинические особенности недостаточности мозгового кровообращения в вертебрально-базилярном бассейне // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2006. № 4(20). Т. 5. С. 6–11.



8. Жемайтис Д. И., Янушкевичус З. И. Выводы о результатах анализа синусового ритма и экстрасистолы по ритмограмме. М., 1984. 224 с.
9. Михайлов В. М. Вариабельность ритма сердца: опыт практического применения метода. Иваново: Ивановская государственная медицинская академия, 2002. 290 с.
10. Рубис Л. В., Масюк В. С., Хурцилава О. Г., Щербо А. П. Природные и социальные факторы риска заболеваемости острыми респираторными инфекциями // Эпидемиология и инфекционные болезни. 2008. № 5. С. 34–38.
11. Скоромец А. А., Скоромец А. П., Скоромец Т. А., Никитина В. В. Клинические аспекты нарушений кровообращения в вертебрально-базилярном бассейне // Медицинский академический журнал. 2001. Приложение 1. С. 61–64.
12. Субботина Н. С., Дуданов И. П., Буркин М. М., Теревников В. А. Структура стенозирующих сосудистых поражений магистральных церебральных артерий // Медицинский академический журнал. 2001. Приложение 1. С. 72–73.
13. Субботина Н. С., Дуданов И. П., Петровский В. И., Корнева В. А. Патоморфологическая характеристика сосудистых поражений при церебральном стенозирующем атеросклерозе // Медицинский академический журнал. 2001. Приложение 1. С. 71–72.
14. Dorshakova O. V., Belousova G. P., Lupandin Y. V., Subbotina N. S. Epidemiologic peculiarities of the cerebrovascular disturbances in the vertebrobasilar system among the population of the Karelsky region, Petrozavodsk // European Journal of Natural History. 2009. № 5. С. 45–46.
15. Task Force of the European of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. Heart Rate Variability. Standards of Measurements, Physiological Interpretation, and Clinical Use // Circulation. 1996. № 93. P. 1043–1065.

УДК 616.5-002.525.2:616.8

**АННА СЕРГЕЕВНА НОВИЦКАЯ**

кандидат медицинских наук, врач регистра отделения острых нарушений мозгового кровообращения Республиканской больницы г. Петрозаводска

anovi@onego.ru

**ИРИНА МИХАЙЛОВНА МАРУСЕНКО**

доктор медицинских наук, профессор кафедры госпитальной терапии медицинского факультета ПетрГУ

feva@karelia.ru

## ПОРАЖЕНИЕ НЕРВНОЙ СИСТЕМЫ У БОЛЬНЫХ СИСТЕМНОЙ КРАСНОЙ ВОЛЧАНКОЙ

В статье показано, что наиболее частыми неврологическими проявлениями поражения центральной нервной системы при системной красной волчанке были цефалгический, вестибулярный и судорожный синдромы. В ранней диагностике поражения нервной системы у больных системной красной волчанкой большое значение имеет комплексное использование регистрации слуховых вызванных потенциалов, электроэнцефалографии и магнитно-резонансной томографии головного мозга.

Ключевые слова: системная красная волчанка, центральная нервная система, цефалгии, полинейропатия, менингоэнцефалит, судорожный синдром, электроэнцефалография, магнитно-резонансная томография головного мозга

Системная красная волчанка (СКВ) – хроническое полисиндромное заболевание, преимущественно девушек и молодых женщин, развивающееся на фоне генетически обусловленного несовершенства иммунорегуляторных процессов, приводящего к неконтролируемой продукции антител к собственным клеткам и их компонентам с развитием аутоиммунного и иммунно-комплексного воспаления [3]. Неврологические расстройства при СКВ, по данным разных авторов, выявляются в 25–75 % случаев. Поражение нервной системы является одним из наиболее тяжелых клинических синдромов при системной красной волчанке, а развитие неврологических симптомов в период высокой активности заболевания является прогностически неблагоприятным признаком и по частоте смертельных исходов сопоставимо с поражением почек.

Вовлечение нервной системы в патологический процесс возможно вследствие различных механизмов: ишемии, геморрагии, очагового по-

ражения белого вещества мозга (по типу демиелинизации, лейкоэнцефалопатии), нейрональной дисфункции. Однако одной из главных причин поражения нервной системы при СКВ является сосудистая патология, которая включает в себя: васкулопатию с гиалинизацией сосудов, периваскулярным лимфоцитозом и эндотелиальной пролиферацией у 65 % больных, тромбозы и истинные васкулиты у 15 % пациентов, инфаркты и геморрагии, преимущественно в поверхностных слоях коры головного мозга. Возможно непосредственное поражение мозгового вещества антителами, доказано отложение иммунных комплексов в хориоидальном сплетении. Важная роль в уточнении механизма неврологических расстройств при СКВ отводится изучению антинейрональных, антиглиальных, антилимфоцитарных антител. Полагают, что антинейрональные антитела воздействуют на мембраны нейронов, вызывая тем самым нарушение функции ЦНС. Однако без нарушения целостности гематоэнцефалического

барьера их патогенетическая роль проявиться не может, чем, возможно, объясняется бессимптомное присутствие антинейрональных антител у некоторых больных с СКВ.

Среди основных клинических проявлений неврологических расстройств при СКВ встречаются головная боль в 64 %, психические симптомы в 60 %, поражение черепных и периферических нервов в 24–45 и 12 % соответственно, параличи в 5 %, двигательные нарушения менее чем в 5 % наблюдений [2]. Ряд лабораторных тестов, применяемых при СКВ, характеризует иммунологическую и воспалительную активность заболевания, позволяет выявить висцеральные поражения, степень нарушения функции внутренних органов. Вместе с тем диагностика поражения нервной системы при СКВ затруднена из-за широкого спектра неврологических расстройств, отсутствия четких критериев и неинвазивных инструментальных тестов, не существует единого мнения о трактовке полученных данных, нет необходимого перечня исследований, классификации нейропсихических расстройств при СКВ, единства в терминологии определения поражения ЦНС. Дальнейшее изучение ранних поражений нервной системы при СКВ может способствовать разработке эффективных методов диагностики, профилактики и лечения неврологических нарушений при СКВ.

С целью улучшения диагностики и лечения больных системной красной волчанкой с поражением нервной системы нами проведено комплексное клинико-инструментальное исследование. Обследованы 102 больных СКВ, находившихся на лечении в ревматологическом отделении Республиканской больницы им. В. А. Баранова Министерства здравоохранения Республики Карелия с 2001 по 2007 год. В исследование включались пациенты не старше 55 лет с отсутствием в анамнезе указаний на перенесенные травмы головного мозга, заболевания ЦНС, артериальную гипертензию.

Среди больных системной красной волчанкой были 87 женщин (85,3 %) и 15 мужчин (14,7 %). Средний возраст на момент госпитализации составил  $38,6 \pm 12,4$  года. Средний возраст дебюта заболевания –  $29,7 \pm 10,1$  года. Длительность болезни от нескольких месяцев до 5 лет отмечена у 45 % больных, от 5 до 10 лет – у 22 %, более 10 лет – у 33 %. Преобладали больные с подострым течением СКВ – 79 больных (73,8 %), у 20 (18,7 %) больных течение заболевания было хроническим, у 8 (7,5 %) – острым. Среднее значение индекса активности основного заболевания (SLEDAI) на момент включения в исследование составило  $13,6 \pm 6,6$  балла. Наиболее частыми экстрацеребральными проявлениями были суставной синдром у 86,5 % больных, гематологические нарушения – у 61,5 %, кожные проявления – у 51,9 %, поражение почек – у 40,4 %, реже отмечались серозиты (плевриты, перикардиты) – у 30,7 % и язвенные поражения слизистых оболочек (7,7 %).

Комплексное нейрофункциональное обследование было проведено 53 больным СКВ, в ре-

зультате которого у 31 (58,5 %) были выявлены признаки поражения нервной системы, а у 22 человек (41,5 %) неврологические расстройства отсутствовали. Сравнительная характеристика обследованных больных представлена в таблице.

Сравнительная характеристика больных СКВ

	Больные СКВ без признаков поражения нервной системы (n = 22)	Больные СКВ с признаками поражения нервной системы (n = 31)
Пол (женщины/мужчины), %	95,5/4,5	87,1/12,9
Возраст, лет	$35,7 \pm 12,4$	$40,4 \pm 11,6$
Возраст начала заболевания, лет	$28,8 \pm 11,4$	$29,9 \pm 10,5$
Длительность заболевания, лет	$6,09 \pm 4,9$	$10,8 \pm 7,6$
Индекс активности SLEDAI, баллы	$9,55 \pm 5,3$	$17,6 \pm 9,11$ (p = 0,0001)
<u>Течение (%)</u>		
Острое	4,55	3,2
Подострое	90,9	71,0
Хроническое	4,55	25,8 (p = 0,047)
<u>Экстрацеребральные проявления</u>		
Эритема	45,5 %	48,4 %
Дискоидные высыпания	4,55 %	9,7 %
Фотосенсибилизация	13,6 %	25,8 %
Язвы полости рта	16,1 %	0
Артриты или артралгии	90,9 %	87,1 %
Серозиты	45,5 %	25,8 %
Поражение почек	50 %	67,7 %
Гематологический синдром	63,6 %	67,7 %
Иммунологические нарушения (АТ к ДНК, АНФ, ЦИК, а-КЛ)	86,4 %	77,4 %

В результате проведенного исследования было установлено, что поражение нервной системы наиболее часто развивалось у больных системной красной волчанкой в возрасте от 36 до 45 лет с подострым или хроническим течением длительностью заболевания от 8 до 13 лет. Соотношение мужчин и женщин, страдающих СКВ, составило 1:9. Клиническая картина характеризовалась следующими неврологическими проявлениями: цефалгическим (54,8 %), вестибулярным (41,9 %), эпилептическим (18,7 %) синдромами. У 19,3 % больных СКВ диагностирован инсульт, у 12,6 % – волчаночный менингоэнцефалит, у 6,2 % – полинейропатия. Редкими проявлениями были миастенический синдром, хорея и поперечный миелит (3,2 %). Наши результаты соответствуют данным других авторов, описывающих головную боль у 24–72 % больных СКВ, а цереброваскулярные нарушения – у 5–18 % пациентов [1], [4], [5].

Особенностями головной боли являются приступообразный характер цефалгий, возник-

новение их в утренние часы, сочетание головной боли с головокружением, снижением краткосрочной памяти и нарушениями сна. Нами отмечено, что после 3–6 месяцев базисного приема глюкокортикоидов (ГК) интенсивность и частота головных болей у пациентов этой группы значительно уменьшались. Мы не выявили значимых корреляций между наличием цефалгий, возрастом, длительностью и степенью активности заболевания.

Острые нарушения мозгового кровообращения развились у больных в возрасте от 27 до 50 лет. Длительность заболевания на момент сосудистой катастрофы составляла 10–15 лет. Сосудистые эпизоды были представлены субарахноидальными кровоизлияниями ( $n = 2$ ), ишемическим инсультом ( $n = 4$ ), транзиторными ишемическими атаками ( $n = 1$ ). Нарушения мозгового кровообращения достоверно коррелировали с гематологическими проявлениями СКВ: выявлялась корреляция с уровнем тромбоцитов ( $r = -0,33$ ,  $p = 0,009$ ) и СОЭ ( $r = 0,27$ ,  $p = 0,034$ ), а также со степенью активности заболевания ( $r = 0,27$ ,  $p = 0,036$ ). Чаше других сосудистые нарушения проявлялись в вертебрально-базиллярном бассейне ( $n = 3$ ). Провоцирующими факторами для развития сосудистых нарушений, по нашему мнению, послужили отказ от базисной терапии или самостоятельное уменьшение дозы принимаемых препаратов ( $n = 3$ ), а также беременность и роды ( $n = 1$ ).

Судорожный синдром несколько чаще встречается у мужчин (60%), возникает как в дебюте заболевания, так и в течение первого года после развития неврологических нарушений, таких как инсульт и менингоэнцефалит. Выявлена корреляция эпилептического синдрома с возрастом начала заболевания ( $r = -0,41$ ,  $p = 0,002$ ) и длительностью заболевания ( $r = -0,27$ ,  $p = 0,039$ ). При проведении ЭЭГ у всех больных с эпилептическим синдромом регистрировались выраженные диффузные и фокальные нарушения биоэлектрической активности головного мозга. На фоне приема препаратов базисной терапии СКВ (ГК и цитостатических препаратов (ЦС)), а также противосудорожных препаратов частота приступов значительно уменьшалась.

Депрессивное расстройство выявлено у 42,1 % больных СКВ с неврологическими нарушениями. Нами установлены достоверные различия частоты депрессивных нарушений в группах больных с поражениями нервной системы и без них ( $p = 0,005$ ). Также отмечено, что степень выраженности астении достоверно выше в группе больных с поражением нервной системы ( $p = 0,005$ ), причем наибольшие различия отмечены по шкалам «физическая астения» ( $p = 0,017$ ) и «снижение активности» ( $p = 0,004$ ).

Развитие острых неврологических состояний (нарушение мозгового кровообращения, эпилептический статус, менингит) характерно для периода обострения основного заболевания, со-

провождающегося высокой лабораторной активностью, тогда как головные боли, головокружение, снижение памяти и перепады настроения встречаются у больных СКВ как при ухудшении заболевания, так и в период стойкой ремиссии. В целом наши данные показывают, что для СКВ характерны «стертые» клинические проявления поражения нервной системы, такие как головные боли, вестибулярный синдром, снижение настроения, общая астения. Причем в большинстве случаев такие симптомы выявляются у больных с низкой степенью лабораторной активности и хроническим вариантом течения заболевания.

Комплексное нейрофизиологическое обследование включало общеклинические лабораторные исследования, электроэнцефалографию, регистрацию слуховых и зрительных вызванных потенциалов мозга, ультразвуковую доплерографию брахиоцефальных артерий, магнитно-резонансную томографию мозга.

Среди больных СКВ, имеющих клинические признаки поражения нервной системы, наиболее часто при проведении ЭЭГ регистрировали фокальные патологические изменения, которые были выявлены у больных СКВ с эпилептическим синдромом, стойкими цефалгиями по типу ассоциированной мигрени и депрессивными нарушениями. Данный тип ЭЭГ характеризовался наличием фокальных изменений на фоне диффузного замедления биоэлектрической активности. Диффузные нарушения биоэлектрической активности головного мозга были выявлены у больных с нестойкими головными болями различной локализации, вестибулярным синдромом, а также у больной СКВ с хореоатетонидным гиперкинезом.

Изменения, выявленные при регистрации акустических стволовых вызванных потенциалов головного мозга, ассоциируются с полученными нами клиническими данными, согласно которым у 45,5 % больных имеются вестибулярные нарушения. Деформация IV и V пиков, а также нарушение соотношения амплитуд V/I за счет увеличения амплитуды пика I свидетельствуют о нарушении проведения на уровне среднего мозга. Обнаруженные изменения латентностей V пика ( $p = 0,017$ ) и МПИ III–V ( $p = 0,013$ ) свидетельствуют о нарушении проведения на медуллопонтинном уровне. Полученные нами результаты позволяют предположить прямую зависимость структурных изменений слуховых вызванных потенциалов от поражения проводящих путей ствола головного мозга, вызванного явлениями васкулопатии. Таким образом, наличие изменений слуховых вызванных потенциалов в этой группе больных СКВ при отсутствии других нарушений неврологического статуса позволяет уточнить распространенность и локализацию поражения нервной системы.

При проведении ультразвуковой доплерографии БЦА нами отмечена значительная частота

изменений кровотока в вертебрально-базилярном бассейне, причем высокие скорости кровотока могут косвенно свидетельствовать о стенозирующих процессах в артериях головного мозга.

Патологические изменения в структурах мозга при магнитно-резонансной томографии (МРТ) головного мозга выявлены у 60 % больных СКВ с поражением нервной системы. В 25 % случаев изменения носили неспецифический характер и были представлены наружной гидроцефалией. Чаще всего у больных с наружной гидроцефалией по данным ЭЭГ регистрировались диффузные нарушения биоэлектрической активности (2-й тип ЭЭГ) – 57,1 % больных. У пяти больных (71,4 %) также выявлялась дисфункция проведения по стволовым отделам слуховых нервов. В связи с тем что все больные СКВ с неврологическими проявлениями на момент включения в исследование получали базисную терапию преднизолоном, мы не можем достоверно исключить влияние глюкокортикоидов на развитие атрофии мозга, однако выявление у этих больных изменений при регистрации слуховых вызванных потенциалов головного мозга, по нашему мнению, свидетельствует о специфическом поражении нервной системы у больных СКВ. Очаговые изменения в белом веществе головного мозга выявлены у 20 % больных, они носили сосудистый характер. Наиболее часто изменения визуализировались в глубоких отделах теменных областей, в области подкорковых ганглиев, реже в области моста и перивентрикулярно. Особенностью данной группы оказалась высокая частота больных с антифосфолипидным синдромом (АФЛС) – 66,7 %, выявление изменений в веществе мозга у больных, не имеющих клиники нарушения мозгового кровообращения в анамнезе, и развитие инсульта на фоне выраженной тромбоцитопении и кровотечения. У двух больных (10 %) имелось сочетание очагового поражения вещества мозга и наружной гидроцефалии. У 8 (40 %) больных при МР-исследовании головного мозга патологических изменений выявлено не было. Эту группу составили пациенты с выраженными головными болями по типу мигренеподобных, вестибулярным синдромом, астено-депрессивным состоянием. Дисфункция проведения по стволовым отделам слухового анализатора выявлена только у одной больной (12,5 %). В группе больных СКВ, у которых, по данным МРТ головного мозга, не

было обнаружено патологических изменений в структурах головного мозга, наиболее часто регистрировались фокальные нарушения биоэлектрической активности мозга (62,5 %). Отсутствие патологических изменений в структурах головного мозга при МРТ в данной ситуации объясняется особенностями клинических проявлений у больных данной группы: преобладание симптомов вегетативно-сосудистой дисфункции без грубых органических симптомов поражения нервной системы.

Нами проведен ретроспективный анализ характера базисной терапии, проводимой до момента диагностики ЦНС-люпус. Практически все больные ( $n = 49$ ; 94,2 %) на момент обследования получали базисную терапию глюкокортикоидами или цитостатическими препаратами, из них 42,3 % в качестве комбинированной терапии. Следует отметить, что комбинированная терапия ГК и ЦС в группе больных СКВ без неврологических расстройств применялась несколько чаще, чем у пациентов с поражением нервной системы. Препараты хинолонового ряда принимали 34,6 % больных СКВ, из них только 7,7 % ( $n = 4$ ) в качестве монотерапии. Нами отмечено, что на фоне лечения у больных, получающих комбинированную терапию ГК и ЦС, достигнуто более выраженное снижение индекса активности SLEDAI, чем у больных, принимающих монотерапию ГК (7,25 и 12 баллов соответственно). Комбинированная терапия ГК и ЦС у больных без неврологических расстройств позволяла лучше контролировать активность СКВ, используя более низкие дозы преднизолона.

Таким образом, больным системной красной волчанкой целесообразно проводить осмотры невролога с использованием коротких психологических тестов и комплексное нейрофизиологическое обследование для выявления субклинического поражения нервной системы. Сочетание изменений при регистрации слуховых вызванных потенциалов, ЭЭГ и МРТ головного мозга у больных без явных неврологических нарушений может свидетельствовать о субклиническом поражении нервной системы. Комбинированная терапия глюкокортикоидами и цитостатическими препаратами показана всем больным системной красной волчанкой с субклиническими и клиническими неврологическими расстройствами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванова М. М. ЦНС-люпус: проблемы и достижения (результаты 10-летнего клинико-инструментального исследования) // Тер. архив. 2001. № 5. С. 25–29.
2. Ревматические болезни / Под ред. В. А. Насоновой. М.: Медицина, 1997. 520 с.
3. Сигидин Я. А., Гусева Н. Г., Иванова М. М. Диффузные болезни соединительной ткани: Руководство для врачей. М.: Медицина, 1994. 544 с.
4. Brey R. L., Holliday S. L., Saklad A. R., Navarrete M. G., Hermosillo-Romo D., Stallworth C. L., Valdez C. R., Escalante A., del Rincon I., Gronseth G., Rhine C. B., Padilla P., McGlasson D. Neuropsychiatric syndromes in lupus: prevalence using standardized definitions // Neurology. 2002. Apr. 23. № 58(8). P. 1214–1220.
5. Hanly J. G. Neuropsychiatric lupus // Rheum. Dis. Clin. North. Am. 2005. May 31(2). P. 273–298.

УДК 519.8

**СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ ЩЕПАЛОВ**аспирант кафедры прикладной математики и кибернетики  
математического факультета ПетрГУ  
*sschepalov@hotmail.com***ВЛАДИМИР АЛЕКСЕЕВИЧ КУЗНЕЦОВ**доктор технических наук, профессор кафедры прикладной  
математики и кибернетики математического факультета  
ПетрГУ  
*kuznetcv@mail.ru***МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ЛИНЕЙНОГО СТОХАСТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ  
С НЕСОВМЕСТНЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ**

В статье рассматривается метод решения линейной стохастической оптимизационной задачи планирования оптимального раскроя круглых лесоматериалов с целью минимизации расхода сырья. Ограничения заданы как вероятности выполнения линейных неравенств, причем ограничения могут быть несовместны. Приводится итерационный алгоритм решения задачи с несовместными ограничениями в стохастической постановке.

Ключевые слова: стохастическое программирование, приближенное решение, стохастическая модель, линейная оптимизация, несовместные ограничения

Исследования ученых в области оптимизации производства пиломатериалов из пиловочных бревен показали, что объемный выход пиломатериалов из определенного места схемы продольного раскроя бревна является случайной величиной, которая подчиняется нормальному закону распределения [4]. Оценки случайной величины зависят от диаметра бревна, толщины пиломатериала и удаленности внешней пласти пиломатериала от сердцевины. Таким образом, задача оптимального раскроя круглого лесосырья (бревен) является задачей стохастического программирования, где коэффициенты перед переменными являются независимыми нормально распределенными случайными величинами. Как правило, ограничения задачи отражают необходимость выработки некоторого фиксированного объема пиломатериалов каждого сечения, целевая функция выражает цену объема потерь сырья.

Решения детерминированной задачи (1) оптимального раскроя круглого лесосырья не обеспечивают необходимых гарантий выполне-

ния соответствующих стохастических ограничений.

$$\begin{aligned}
 f(X) &= \sum_j C_j X_j \rightarrow \min \\
 \left\{ \begin{aligned} \sum_j A_{ij} X_j &\geq B_i, \quad i \in K' \\ \sum_j A_{ij} X_j &\leq B_i, \quad i \in K'' \end{aligned} \right. \\
 K' \cap K'' &= \emptyset, \quad |K'| + |K''| = m.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Более того, на данный момент не существует какого-либо общего подхода для решения задач стохастической линейной оптимизации в случае, когда система ограничений несовместна. Хорошо исследован только метод решения детерминированной задачи линейной оптимизации с несовместными ограничениями [3], на основе которого построен описанный ниже алгоритм.

В случае вероятностных ограничений речь идет о вероятности выполнения, то есть более универсальной оценке, но также возможно совмещение стохастических и детерминированных ограничений. Значения этих вероятностей можно задавать в зависимости от экономических последствий нарушения соответствующих неравенств [1]. Вероятностные условия модели записываются в виде (2):

$$\begin{cases} P\left(\sum_j A_{ij} X_j \geq B_i\right) \geq P_i, 0 < P_i < 1, i \in K' \\ P\left(\sum_j A_{ij} X_j \leq B_i\right) \geq P_i, 0 < P_i < 1, i \in K'' \end{cases} \quad (2)$$

$$A_{ij} \sim N(m_{ij}, \sigma_{ij}),$$

где  $i$  – номер ограничения,  $A_{ij}$  – нормально распределенная случайная величина,  $P_i$  – вероятность выполнения соответствующего условия.

Под решением задачи (2) подразумевается вектор  $X \geq 0$ , который обеспечивает выполнение условий с заданными вероятностями. Задача раскрытия пиловочного сырья сводится к задаче стохастического программирования с вероятностными ограничениями. Ее детерминированным эквивалентом является задача выпуклого программирования (3), содержащая два вида ограничений, образующих допустимое выпуклое множество:

$$\begin{aligned} f(X) &= \sum_j C_j X_j \rightarrow \min \\ \begin{cases} \sum_j m(A_{ij}) X_j - t_i \sqrt{\sum_j (\sigma(A_{ij}) X_j)^2} \geq B_i, i \in K' \\ \sum_j m(A_{ij}) X_j + t_i \sqrt{\sum_j (\sigma(A_{ij}) X_j)^2} \leq B_i, i \in K'' \end{cases} \quad (3) \\ X_j &\geq 0, \end{aligned}$$

где  $t_i$  – коэффициент доверительности, определяющий вероятность выполнения  $i$ -го ограничения задачи.

Коэффициент доверительности вычисляется как обратная функция от функции стандартного нормального распределения  $N(1, 0)$ , ее значение находится по таблицам. Коэффициенты целевой функции детерминированы и зависят от средних значений случайных величин. Известные методы решения задачи (3) весьма сложны и трудоемки, особенно при большой размерности, поэтому некоторые исследователи разработали альтернативные итеративные способы вычисления, позволяющие эффективно решать подобного рода задачи. М. Я. Бравый и И. В. Соболев [1] предложили следующий метод решения задачи выпуклого

программирования (3), основанный на неоднократном решении задачи линейного программирования. В качестве нулевого приближения возьмем решение задачи (3) при  $t_i = 0$ ,  $X^0 = (X_1^0, \dots, X_g^0)$ . Введем обозначения (4).

$$\begin{aligned} Y_i(X) &= \sum_j m(A_{ij}) X_j, \\ \sigma_i(X) &= \sqrt{\sum_j (\sigma(A_{ij}) X_j)^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

На  $(K + 1)$ -й итерации работы алгоритма,  $K \geq 0$ , решается задача линейного программирования (5):

$$\begin{aligned} f(X) &= \sum_j C_j X_j \rightarrow \min \\ \begin{cases} \sum_j m(A_{ij}) X_j \geq B_i + t_i H_i(X^K), i \in K' \\ \sum_j m(A_{ij}) X_j \leq B_i - t_i H_i(X^K), i \in K'' \end{cases} \quad (5) \\ X_j &\geq 0. \end{aligned}$$

Значение функции  $H_i(X)$  зависит от выполнения следующих условий:

$$\begin{aligned} H_{i \in K'}(X^0) &= \begin{cases} 0, Y_i(X^0) \geq b_i + t_i \sigma_i(X^0) \\ t_i \sigma_i(X^0), \text{ иначе} \end{cases} \\ H_{i \in K'}(X^K) &= \begin{cases} H_i(X^{K-1}), Y_i(X^K) \geq b_i + t_i \sigma_i(X^K) \\ \max\{H_i(X^{K-1}), t_i \sigma_i(X^K)\}, \text{ иначе} \end{cases} \quad (6) \\ H_{i \in K''}(X^0) &= \begin{cases} 0, Y_i(X^0) \leq b_i - t_i \sigma_i(X^0) \\ t_i \sigma_i(X^0), \text{ иначе} \end{cases} \\ H_{i \in K''}(X^K) &= \begin{cases} H_i(X^{K-1}), Y_i(X^K) \leq b_i - t_i \sigma_i(X^K) \\ \max\{H_i(X^{K-1}), t_i \sigma_i(X^K)\}, \text{ иначе} \end{cases} \end{aligned}$$

Здесь  $X^K$  – решение задачи (5) для  $K$ -й итерации алгоритма. Критерием сходимости задачи (3), а следовательно, и исходной задачи, является выполнение условия (7), где  $\varepsilon_j$  – заданная точность для соответствующего ограничения.

$$|\sigma_i(X^K) - \sigma_i(X^{K-1})| \leq \varepsilon_j. \quad (7)$$

Для решения задачи линейной оптимизации в стохастической постановке достаточно нескольких итераций, включая получение начального решения; алгоритм сходится даже в случае несовместных ограничений [1]. Важность решения задачи линейной оптимизации в стохастической постановке заключается в устойчивости

плана при случайном характере выхода производства, что влечет за собой сокращение корректировочных вычислений в случае нарушения плана.

В реальном производстве плановые выработки продукции достигаются, если позволяет запас времени и сырья. Если же идеальное соответствие фактической выработки плановой по каким-либо причинам невозможно, стараются выбрать такое решение, которое обеспечит наименьшее отклонение объема от плановых показателей по каждому ограничению. Таким образом, за критерий оптимизации в случае несовместных ограничений задачи (5) можно взять минимизацию невязок [3], то есть минимизацию суммы квадратов невязок (8). Выбор функции обусловлен возможностью отсутствия решения промежуточной задачи (5).

$$F = \sum_{i \in K'} \left( \left( B_i - \sum_j m(A_{ij}) X_j \right)^+ \right)^2 + \sum_{i \in K''} \left( \left( \sum_j m(A_{ij}) X_j - B_i \right)^+ \right)^2 \rightarrow \min. \quad (8)$$

Набор ограничений остается прежним и линейным, задача попадает в категорию задач квадратичной оптимизации, ее решение осуществляется методом Франка – Вулфа [3]. Чтобы привести целевую функцию (8) к квадратичной, необходимо ввести в ограничения задачи (5) искусственные переменные  $\beta_i \geq 0$ ,  $1 \leq i \leq m$ , в результате чего система примет вид (9). Она всегда имеет непустую область решений:

$$\begin{cases} \sum_j m(A_{ij}) X_j \geq B_i + \beta_i, i \in K' \\ \sum_j m(A_{ij}) X_j \leq B_i - \beta_i, i \in K'' \end{cases} \quad (9)$$

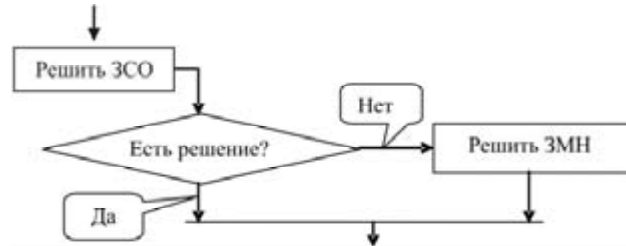
Для применения метода Франка – Вулфа необходимо выполнение свойства знакопеременности главных миноров гессиана целевой функции, что эквивалентно неравенству (10), которое однозначно выполняется только при  $A_{ij} \geq 0$ .

$$\frac{\partial^2 F}{\partial X_i \partial X_j} < 0. \quad (10)$$

Выражения под квадратами в (8) не что иное, как искусственные переменные. Выполнив замену, получим (11). Таким образом, задача

$$F = \sum_{i=1}^m \beta_i^2 \rightarrow \min \quad (11)$$

сводится к выпуклой задаче квадратичного программирования, которая всегда имеет решение.



Подход для решения промежуточной задачи (5)

Рассмотрим алгоритм решения задачи стохастического программирования (4–7), состоящий из 8 шагов:

1. Решение  $X$  задачи (5), в качестве значений  $Y'_i = Y_i$  и  $\sigma'_i = \sigma_i$ , где  $i$  – индекс ограничения задачи, принимаются очень большие положительные или отрицательные числа;
2. Для каждого ограничения с индексом  $1 \leq i \leq m$  вычисляются значения  $Y_i(X)$  и  $\sigma_i(X)$  по формулам (4);
3. Вычисляется максимум отклонений значений  $\sigma_i(X)$  от значений, полученных на предыдущей итерации:  

$$\Delta\sigma = \max_{1 \leq i \leq m} \{ |\sigma_i(X) - \sigma'_i| \};$$
4. Алгоритм проверяется на сходимость путем проверки условия  $\Delta\sigma \leq \alpha$ , где  $\alpha$  – заранее заданная точность вычисления;
5. Для каждого ограничения с индексом  $1 \leq i \leq m$  вычисляются значения функций и сохраняются полученные на текущем шаге значения  $Y_i(X)$  и  $\sigma_i(X)$  в переменных  $Y'_i$  и  $\sigma'_i$  соответственно;
6. Вычисляются правые части линейных ограничений задачи (5);
7. Полученная на шаге 6 детерминированная задача линейной оптимизации решается симплекс-методом;
8. Выполняется переход на шаг 2.

Проверка на существование решения может проходить только в пунктах 1 и 7. Как правило, за них отвечает один блок программного кода. Отсутствие решения стохастической задачи линейной оптимизации эквивалентно отсутствию решения соответствующей детерминированной задачи линейной оптимизации на некоторой итерации вышеприведенного алгоритма. Но не исключен такой вариант, когда часть генерируемых на этапах 5–6 детерминированных задач линейной оптимизации могут иметь решения, а часть может их не иметь. Также важно заметить, что на этапах 2–5 не требуется информация о полном перечне возможных раскросов сырья, вся необходимая информация генерируется в блоках 1 и 7. Для предотвращения остановки решения при несовместных условиях необходимо заменить пункты 1 и 7 на ветку алгоритма, приведенную на рисунке, где ЗСО – задача стохастической оптимизации, ЗМН – задача минимизации невязок.

Внутри блока производится попытка решить «входящую» задачу методом стохастического про-



граммирования, не изменяя целевую функцию, но если это невозможно, целевая функция заменяется на функцию вида (11) при прежних ограничениях, а искусственные переменные принимаются за основные. Решение обеих задач состоит из набора столбцов и значений соответствующих переменных, что позволяет переходить к последующим этапам без дополнительных преобразований.

Алгоритм был протестирован на решении нескольких сотен задач стохастической оптимизации с указанными свойствами случайных коэффициентов. В тестовых задачах было от 5 до 15 ограничений, они обладали одним из следующих свойств:

- ограничения промежуточных задач (9) совместны;
- ограничения промежуточных задач (9) на разных итерациях могут быть как совместны, так и несовместны;
- ограничения промежуточных задач (9) несовместны;

Для каждого полученного конечного решения тестовой задачи генерировались сто матриц коэффициентов ограничений и вычислялись следующие показатели:

1. Сумма квадратов значений невязок;
2. Значение целевой функции.

Для задач с несовместными ограничениями среднее значение первого показателя было на 16,4 % меньше аналогичного показателя для

задачи, где в качестве случайных коэффициентов были использованы их математические ожидания. Для задач с совместными ограничениями среднее значение второго показателя было ниже на 18,9 % при аналогичных условиях. Отрицательной стороной алгоритма является высокая трудоемкость решения: для задачи с 15–30 ограничениями время ее решения на ЭВМ с одноядерным процессором частотой 1 ГГц в среднем составило 55 секунд, в то время как решение детерминированной задачи линейной оптимизации с несовместными ограничениями с таким же количеством ограничений находится за 8–10 секунд.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подход для поиска решения детерминированной задачи линейной оптимизации с несовместными ограничениями был известен давно и успешно применялся для решения промышленных задач [3]. Что касается поиска решения стохастической задачи линейной оптимизации с указанными свойствами случайных коэффициентов с несовместными ограничениями, то общего метода с доказанной сходимостью в литературе в явном виде не встречается, за исключением случаев, когда рассматриваются задачи узкоспециализированного класса.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бравый М. Я., Соболев И. В. Опыт решения задачи линейного программирования со случайными технологическими коэффициентами // Математические методы в экономических исследованиях. Сер. «Оптимальное планирование и управление» / Академия наук СССР. М.: Наука, 1974. С. 17–25.
2. Воронов А. А. Исследование операций и управление. М.: Наука, 1970. 128 с.
3. Воронов Р. В. Генетический алгоритм для задачи линейного раскроя // Тр. ПетрГУ. Сер. «Прикладная математика и информатика». Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2007. С. 35–49.
4. Соболев И. В. Управление производством пиломатериалов. Петрозаводск: Карелия, 1976. 173 с.
5. Фидлер М., Недома Й., Рамик Я. Задачи линейной оптимизации с неточными данными. Ижевск: НИЦ РХД, 2008. 288 с.
6. Шерстобитов В. В. Математическое программирование. Ч. 1. Элементы линейной алгебры: Учеб. пособие. Л.: ЛТА им. С. М. Кирова, 1969. 88 с.

УДК [621.311.1+630\*37]:519.863:001.891.57

**ГЕОРГИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ БОРИСОВ**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник,  
доцент кафедры энергообеспечения предприятий и энер-  
госбережения физико-технического факультета ПетрГУ  
*borisov@krc.karelia.ru*

**ВАЛЕРИЙ ДМИТРИЕВИЧ КУКИН**

научный сотрудник Института прикладных математиче-  
ских исследований КарНЦ РАН  
*kukin\_v@krc.karelia.ru*

**МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ КОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ**

В статье рассматривается история развития моделей и методов оптимизации коммуникационных сетей на примере сетей лесовозных дорог. Основное внимание уделяется потоковой задаче Штейнера, отмечается разработанный композитный эволюционный алгоритм ее решения на ПК. Показано его приложение к оптимизации проектирования сетей лесовозных дорог и однородных электрических сетей.

Ключевые слова: методы оптимизации, методы моделирования, лесотранспортные сети, электрические сети

Важная роль коммуникационных сетей в экономике России обусловлена большой территорией, низкой плотностью населения, высокой материало- и энергоемкостью валового продукта, высокой концентрацией сырьевых производств. Эффективность коммуникационных сетей транспортного, энергетического и информационного назначения закладывается на стадии проектирования, когда находятся, обосновываются и принимаются технические решения по их структуре, конфигурации и основным параметрам, степень влияния которых на объект является определяющей.

Задача проектирования коммуникационных сетей является обобщением геометрической задачи, которая еще в 1837 году была сформулирована немецким механиком Якубом Штейнером: требуется соединить  $n$  заданных на плоскости точек сетью минимальной длины с использованием любого количества свободно размещаемых добавочных точек, названных впоследствии точками Штейнера (ТШ). При заданной топологии (порядке соединения точек) сеть имеет минимальную длину при оптимальном положении ТШ. Число возможных вариантов топологии сети зависит от количества

фиксированных точек и выражается формулой, которая дает оценку более сильную, чем факториал [11]. Известно, что задача относится к классу NP-трудных и точное решение можно найти только полным перебором топологий.

Коммуникационная сеть – более сложный объект, чем геометрическая сеть: на ее элементах порождаются потоки той или иной ориентации в зависимости от назначения сети. Заметим, что для математической постановки задачи ориентация потоков не имеет значения.

Для практических задач с несколькими сотнями точек нахождение точного решения имеющимися вычислительными средствами нереально за приемлемое время. Поэтому проектировщики могут выбрать для реализации далеко не лучший вариант, а при значительных объемах проектирования нахождение наилучших вариантов сетей может давать существенный экономический эффект.

При большом разнообразии сетей, отличающихся ориентацией потоков, составом транспортируемых продуктов, классификацией категорий, конфигурацией узлов и элементов, мы выбрали для начала исследований лесотранспорт-

ные сети, имеющие массовое распространение в лесозыбыточных регионах.

В истории развития математических моделей транспортного освоения лесных массивов [2], [3], [4], [5], [10], [12], [23] ясно просматриваются тенденции их усложнения при одновременном смягчении, уточнении допущений, что приводит к увеличению их адекватности объектам и повышению точности проектных решений. Применявшиеся в простейших аналитических моделях методы оптимизации углов примыкания, расстояний между путями одного вида, размеров и форм лесосырьевых баз [10], [12], [23] давали типовые решения на основе усредненных характеристик лесосырьевых баз, не учитывающие разнообразия локальных неоднородностей их территорий.

Методы линейного, нелинейного и целочисленного программирования позволили осуществлять комплексную оптимизацию положения элементов сети, связывающей заданное множество точек [3]. Основное допущение в этих моделях состояло в том, что в каждую из точек, априори выбранных на территории лесосырьевой базы, собирают древесину с близлежащего участка, которую затем доставляют на нижний склад. Каждой точке и ее окрестности приписывают количественные характеристики. При этом допускаются точки с нулевым объемом собираемой древесины для учета безлесных территорий в лесосырьевой базе. Это вполне адекватно объекту при концентрации древесины на погрузочных площадках.

Другое допущение заключалось в том, что для проектирования дорог выбирались только те отрезки прямых, которые соединяют фиксированные точки. Кроме точек с запасами это еще и те, где сходятся пути или перегружают древесину на автотранспорт. Условия в окрестности каждой из точек и на каждом участке дорог, их соединяющих, можно учитывать достаточно точно. Возможности больших ЭВМ позволяли решать задачи с несколькими сотнями неравенств, подробно характеризующих лесотранспортную сеть.

Третье допущение в моделях относилось к трассированию дороги или технологического пути: на каждой из половин отрезка, соединяющего две фиксированные точки, вводятся коэффициенты развития, определяющие удлинение, обусловленное неоднородностями грунта и рельефа [12]. В то же время извилистую трассу можно кусочно-линейно аппроксимировать, если ввести в исходную информацию большое количество точек с нулевыми запасами.

Было доказано, что при такой постановке оптимальная связывающая сеть должна иметь вид дерева с корнем без циклов. Кроме того, исследования задачи трассирования дорог показали, что наивыгоднейшей формой соединения двух фиксированных точек дорогой с транспортной и собирательной функциями является не прямая, а кривая, которая с приближением к конечной точке смещается относительно средневесовой оси участка лесосырьевой базы [1], [6].

Такие модели выбора наивыгоднейшего варианта сети позволяют учитывать неправильность формы лесосырьевой базы, неоднородность распределения запасов, геологические условия строительства дорог и вывозки. Однако эти модели имеют и существенные недостатки: отсутствие учета фактора времени и неоптимальность положения заданных транзитных точек и развилок дорог. С первым недостатком можно частично справиться, определяя очередность строительства фрагментов сети с помощью методов динамического программирования [5]. Второй недостаток в некоторой степени преодолевается введением свободно размещаемых развилок и оптимизацией их координат итеративными методами [4]. Позднее проблема была полностью решена за счет перехода к обобщению геометрической задачи Штейнера на случай с потоками и зависящими от них весами, называемой потоковой задачей [20].

Эти модели стали основой разработки системы проектирования сети лесовозных дорог СЕТИ-ЕС, реализованной на ЭВМ ЕС 1052. На первом этапе работы системы строилась и оптимизировалась связывающая сеть на множестве фиксированных точек. На втором этапе в автоматическом режиме на каждом узле сети решалась потоковая задача Штейнера: выполнялось расщепление узла с полным перебором топологий и оптимизировались координаты развилок. На третьем этапе в интерактивном режиме ищались локальные улучшения. Предпринимались попытки изменить топологию сети вручную. Кроме того, на выделенных фрагментах сети решалась потоковая задача Штейнера с помощью оригинального алгоритма исчерпывающего и неизбыточного перебора полных топологий, ставшего ключевым моментом этой разработки. На завершающем этапе оптимизировались координаты развилок на всей сети. Эта операция на всех этапах выполнялась методами случайного поиска [24].

Система проектирования СЕТИ-ЕС была принята в эксплуатацию комиссией Минлесдревпрома СССР и использовалась ее проектными организациями.

В сравнении с вариантами проектировщиков при подготовленных ими исходных данных в разных регионах страны оптимизация структуры сети и положения ее элементов на заданном множестве точек методами линейного программирования [2] позволила снизить суммарные затраты на строительство сетей и вывозку древесины: в Казахском леспромхозе в среднем на 1,5 %, Немском – на 23,1 %, Ертомском – на 5,8 %, Зеленоборском – на 10,2 %. При определении очередности строительства участков сети с использованием динамического программирования [5] суммарные приведенные затраты уменьшились на 1,8 %. Решение задачи Штейнера с перебором топологий и оптимизацией координат развилок на отдельных фрагментах реальных сетей давало значительное снижение суммарных затрат – от 2 до 27 % [20].

С помощью системы СЕТИ-ЕС исследовалась зависимость улучшения целевой функции от числа категорий лесовозных дорог. С увеличением числа категорий до 12 улучшение было значимо, свыше этого числа оно было в пределах погрешности входной информации. Исследования показали несовершенство существовавшей на тот момент классификации лесовозных дорог.

При переходе с «больших» вычислительных машин на персональные компьютеры (ПК) система СЕТИ-ЕС не была реализована. На основе подсистемы решения потоковой задачи Штейнера была разработана автономная система проектирования лесовозных дорог на ПК [18]. В ней были заново запрограммированы все наработки из прежней подсистемы, включая интерактивный режим проектирования.

В 1990-е годы, когда в России начался переход к рыночным отношениям, возникла необходимость выбора стратегии транспортного освоения лесосырьевой базы в изменившихся условиях. Был разработан прототип системы STEIN [18], [19], [9]. В ней реализованы основные функции проектирования лесовозных дорог с учетом фактора времени и оценки инвестиционных проектов.

Входная информация в системе представлялась либо в виде дерева с развилками, либо в виде связывающей сети. В последнем случае сеть автоматически преобразовывалась в дерево с полной топологией. Различными оптимизационными методами, включая эвристические, и используя режим диалога, искались улучшения топологии сети и выполнялась оптимизация положений развилки. При этом минимизировались затраты на строительство и вывозку древесины в статической постановке задачи. Далее формировались варианты очередности освоения базы: каждому центру запасов приписывался год вывозки, а каждому участку дороги – год его строительства. Наконец, для каждого варианта очередности рассчитывались потоки дисконтированных затрат и инвестиций, на основе которых выполнялся расчет основных показателей эффективности инвестиций в соответствии с методическими рекомендациями [22]. Фактически обеспечивалась вся необходимая информация для экономической части бизнес-плана каждого варианта очередности.

Следующим шагом стал переход к методологии эволюционного моделирования. Он позволил полностью автоматизировать поиск оптимальных решений потоковой задачи Штейнера. Характерной особенностью эволюционных методов является имитация эволюции биологической популяции как смены поколений с помощью генетических операторов. Особи популяции соответствуют вариантам решений задачи, а оценки их приспособленности – значениям целевой функции. Они способны находить ряд хороших приближенных решений задач оптимизации с нелинейными многопараметрическими и разрывными целевыми функциями.

В рамках эволюционного подхода получены следующие оригинальные результаты: эволюционная модель, генетические операторы и реализованный на ПК эволюционный композитный алгоритм с направленным поиском для решения потоковой задачи Штейнера [13], [14], [15], [16], [8]. Ключевыми моментами разработки являются способ представления хромосомы и принцип ее кодирования/декодирования и генетические операторы, основанные на геометрических эвристиках. Алгоритм тестировался на лесотранспортных сетях. За приемлемое время он находил оптимальное решение или ряд субоптимальных, качество которых оказалось существенно лучше найденных в интерактивном режиме работы системы STEIN.

Современный этап развития вычислительной техники связан с появлением многопроцессорных систем и кластеров, рассчитанных на выполнение параллельных алгоритмов. Решение потоковой задачи Штейнера большой размерности с помощью последовательного алгоритма требует значительных затрат компьютерного времени, тогда как параллельный эволюционный алгоритм может сэкономить время за счет распределенных вычислений. Анализ композитного эволюционного алгоритма [14] показал, что он имеет достаточный потенциал для распараллеливания в кластерной системе. Целесообразна разработка параллельного алгоритма последовательного типа с пространственной декомпозицией, то есть алгоритма с независимым параллельным поиском в пространстве допустимых решений. Считают, что для алгоритмов последовательного типа хорошо подходят различные топологии кластеров, в том числе простые линейные топологии.

Постановка потоковой задачи Штейнера инвариантна по отношению к ориентации сети, так что эту задачу можно применять для проектирования разомкнутых однородных электрических сетей. С помощью композитного эволюционного алгоритма с направленным поиском решалась задача на фрагментах существующей распределительной сети 10 кВ в Олонецком районе Республики Карелия [7]. Эта сеть поэтапно проектировалась, строилась и частично модернизировалась с начала 1950-х годов, когда расположение подстанций всех уровней требовало привязки к населенным пунктам. Общая протяженность сети составляет 286,59 км. Сеть имеет 3 понизительные подстанции 110/35/10 кВ в Олонце, Коткозере и Видлице и 39 потребителей (подстанции 10/0,4 кВ), большая часть которых – объекты сельского и жилищно-коммунального хозяйства.

Оптимизация фрагментов осуществлялась независимо друг от друга, а их структура была взята по нормальному режиму работы сети. Алгоритм за несколько секунд нашел оптимальные решения для всех фрагментов, поскольку число фиксированных точек в них было невелико. Эффективность оптимизации составила 6–14 % и оказывалась тем больше, чем больше общая протяженность линий электропередачи и число подстанций.

Эволюционный алгоритм, разработанный для решения потоковой задачи, позволяет находить конфигурацию однородной электрической сети минимальной длины с минимальными затратами на строительство и эксплуатацию. Полученное оптимальное решение устойчиво по отношению к изменениям экономической ситуации, так как в роли критерия выступает суммарная длина сети. Такой критерий согласуется и с другими составляющими многокритериального выбора при проектировании сети [21]: максимум надежности и минимум расхода металла. Они трудно поддаются учету при финансово-экономической оценке эффективности по официальным методическим рекомендациям. Кроме того, при минимизации длины сети снижается средний уровень потерь напряжения, мощности и энергии, пропорционально длинам отдельных линий.

Возможно также применение потоковой задачи Штейнера и к оптимизации неоднородных

электрических сетей при условии, что издержки, зависящие от рассчитанных нагрузок сети, можно надежно прогнозировать на длительный период ее эксплуатации [10].

Таким образом, основными результатами исследований по моделированию и оптимизации коммуникационных сетей являются:

1. Повышение степени адекватности математических моделей коммуникационных сетей путем учета в них потоков, территорий размещения сетей произвольной формы и характеристик местности.

2. Разработка оригинальной эволюционной модели коммуникационной сети и генетических операторов для нее.

3. Разработка и реализация на ПК эволюционного композитного алгоритма с направленным поиском. Оценка его эффективности на тестовых примерах и фрагментах реальных лесотранспортных и высоковольтных электрических сетей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 1740519 РФ МКИ<sup>5</sup> Е 01 С 1/00 Способ трассировки лесовозных дорог / Г. А. Борисов, В. Н. Земляченко, Г. И. Сидоренко (РФ) – № 4160829/63.
2. Борисов Г. А. Методы автоматизированного проектирования лесотранспорта. Петрозаводск: Карелия, 1978. 198 с.
3. Борисов Г. А., Герасимов Б. С., Сюкияйнен Р. А. Оптимизация схемы транспортного освоения лесосырьевой базы методами линейного программирования // Лесной журнал (Известия ВУЗов). 1969. № 2. С. 123–128.
4. Борисов Г. А., Земляченко В. Н. Итеративный метод улучшения транспортных сетей лесозаготовительных предприятий // Лесной журнал. (Известия ВУЗов). 1971. № 5. С. 51–54.
5. Борисов Г. А., Земляченко В. Н. Определение очередности транспортного освоения лесных массивов // Лесной журнал (Известия ВУЗов). 1973. № 1. С. 145–149.
6. Борисов Г. А., Земляченко В. Н., Сидоренко Г. И. Оптимальное трассирование лесовозных дорог // Лесной журнал (Известия ВУЗов). 2001. № 2. С. 40–45.
7. Борисов Г. А., Кукин В. Д. Об оптимизации электрических сетей с использованием эволюционного композитного алгоритма // Методы математического моделирования и информационные технологии: Труды ИПМИ КарНЦ РАН. Вып. 8. Петрозаводск, 2007. С. 71–75.
8. Борисов Г. А., Кукин В. Д. Об оптимизации параметров лесотранспортных сетей в современных условиях // Лесной журнал (Известия ВУЗов). 2009. № 1. С. 60–66.
9. Борисов Г. А., Кукин В. Д., Кузина В. И. Методы поиска наивыгоднейшего варианта сети лесовозных дорог // Лесной журнал (Известия ВУЗов). 2001. № 3. С. 63–70.
10. Венценов Ю. Н. Основы теории лесопромышленных производств. М.: Лесная промышленность, 1966. 158 с.
11. Гилберт Э. Н., Поллак Г. О. Минимальные деревья Штейнера // Кибернетический сборник, новая серия. Вып. 8. М.: Мир, 1971. С. 19–50.
12. Ильин Б. А., Кувалдин Б. И. Проектирование, строительство и эксплуатация лесовозных дорог. М.: Лесная промышленность, 1982. 384 с.
13. Кукин В. Д. Генетические алгоритмы и задача Штейнера с потоками и весами: подход к проблеме // Методы математического моделирования и информационные технологии: Труды ИПМИ КарНЦ РАН. Вып. 3. Петрозаводск, 2002. С. 170–177.
14. Кукин В. Д. Композитный эволюционный алгоритм для потоковой задачи Штейнера // Методы математического моделирования и информационные технологии: Труды ИПМИ КарНЦ РАН. Вып. 7. Петрозаводск, 2006. С. 143–153.
15. Кукин В. Д. О применении методов эволюционного моделирования к потоковой задаче Штейнера // Методы математического моделирования и информационные технологии: Труды ИПМИ КарНЦ РАН. Вып. 8. Петрозаводск, 2007. С. 120–130.
16. Кукин В. Д. Эволюционная модель для задачи Штейнера с потоками и зависящими от них весами // Известия РАН. Теория и системы управления. 2008. № 3. С. 115–123.
17. Кукин В. Д., Кузина В. И. Задача Штейнера и методика проектирования лесотранспортных сетей // Сб. трудов КарНЦ РАН. Вып. 1. Петрозаводск, 1994. С. 71–81.
18. Кукин В. Д., Кузина В. И. Оценка эффективности инвестиций в освоение лесосырьевой базы // Методы математического моделирования и информационные технологии: Труды ИПМИ КарНЦ РАН. Вып. 1. Петрозаводск, 1999. С. 175–180.
19. Кукин В. Д., Кузина В. И. Реализация концепции очередности освоения лесосырьевой базы в системе STEIN // Методы математического моделирования и информационные технологии: Труды ИПМИ КарНЦ РАН. Вып. 1. Петрозаводск, 1999. С. 169–174.
20. Кукин В. Д., Тяглик Л. В. Задача Штейнера в приложении к транспортным сетям леспромпхозов // Автоматизация проектирования транспортного и мелиоративного освоения лесных массивов: Материалы Всесоюзного симпозиума. Петрозаводск: КарФАН СССР, 1979. С. 50–54.
21. Лещинская Т. Б. Применение методов многокритериального выбора при оптимизации систем электроснабжения сельских районов // Электричество. 2003. № 1. С. 14–22.
22. Методические рекомендации по оценке инвестиционных проектов: Офиц. изд. 2-я ред. / Рук. В. В. Коссов, В. И. Лившиц, А. Г. Шахназаров. М.: ОАО «НПО Изд-во “Экономика”», 2000.
23. Невесский Н. М. Новые методы составления планов лесозаготовки лесных массивов. Вып. 1. М.: Гостехиздат, 1930. 40 с.
24. Расстрин Л. А. Системы экстремального управления. М.: Наука, 1974. 630 с.

**АЛЕКСАНДР ВАСИЛЬЕВИЧ ПИТУХИН**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии металлов и ремонта, декан лесоинженерного факультета ПетрГУ  
*pitukhin@psu.karelia.ru*

**АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ ПЕТРОВ**

преподаватель кафедры промышленного транспорта и геодезии, аспирант кафедры технологии металлов и ремонта лесоинженерного факультета ПетрГУ  
*sssn@onego.ru*

**ПРИМЕНЕНИЕ УСЕЧЕННОГО ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ ОТКАЗА УЧАСТКА АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ**

В статье обсуждается проблема низкого качества проектируемых, строящихся и находящихся в эксплуатации автомобильных дорог, в том числе лесовозных. Предлагается методика расчета вероятности безотказной работы участка автомобильной дороги при предположении о законе распределения величины дефектов как усеченного экспоненциального.

Ключевые слова: усеченное экспоненциальное распределение, дефект, покрытие автомобильной дороги, отказ

Лесопромышленный комплекс является одной из основополагающих отраслей Республики Карелии. Высокое качество продукции и эффективность инвестиций в лесопромышленный комплекс приведут к экономическому развитию региона. Однако, как было отмечено на заседании Коллегии Министерства лесного комплекса Республики Карелии 23.12.2009, существенной проблемой является состояние лесных дорог. Транспортная инфраструктура в настоящее время не в состоянии обеспечить внутри республиканский необходимый объем транзита до потребителей лесных ресурсов.

Лесовозные автомобильные дороги являются довольно капиталоемкими сооружениями. В связи с этим должна быть обеспечена надежная работа каждого конструктивного элемента автомобильной дороги. На стадии проектирования лесовозных дорог должны рассматриваться варианты, обеспечивающие максимально высокие транспортно-эксплуатационные качества при минимуме строительных затрат и материалоемкости. Задача оптимального распределения материальных ресурсов

на строительство и содержание лесовозных дорог также является весьма актуальной, так как стоимость вывозки древесины в значительной степени зависит от вложений, потраченных на строительство дороги и на ее содержание. Помимо этого, высокий уровень транспортно-эксплуатационных показателей дороги обеспечивает высокие темпы вывозки и низкие затраты на ремонт и содержание лесовозных автопоездов. Поэтому тема надежности лесовозных дорог (в частности, покрытий) является весьма актуальной.

Надежность дороги в целом зависит от технического уровня и эксплуатационного состояния элементов, входящих в нее. Покрытие лесовозной дороги является определяющим фактором, влияющим на условия движения автопоездов, поэтому надежность покрытий лесовозных автомобильных дорог играет ключевую роль. После того как дорога вводится в эксплуатацию, происходит постепенное нарушение первоначального состояния дорожной одежды под действием повторных нагрузок от транспортных средств и природно-климатических факторов.

Плохое состояние дороги приводит к серьезным экономическим издержкам, является препятствием для экономического роста. Поэтому несоблюдение условий строительства и содержания дорог оборачивается в итоге не только ростом расходов, но и снижением срока службы как самой дороги, так и транспортных средств, вызывая при этом рост числа дорожно-транспортных происшествий.

Учесть все факторы, влияющие на условия работы лесовозной автомобильной дороги, достаточно сложно. Значения параметров, характеризующих состояние дорожного покрытия в процессе эксплуатации, изменяются и являются случайными величинами. Поэтому для решения теоретических задач является целесообразным и обоснованным применение теории вероятностей.

При изучении особенностей работы дорожных покрытий нельзя рассматривать изолированно влияние на них природно-климатических факторов и механических воздействий. Причем необходимо производить комплексное рассмотрение влияния этих двух факторов, поскольку наибольшее разрушение покрытий наблюдается при неблагоприятных погодных условиях, так как происходит ослабление сопротивления материала и увеличивается эффект механического воздействия колес автомобилей. Циклические нагрузки на поверхность дороги от движущегося транспорта, осадки в виде дождя и снега, особенно при их замерзании и оттаивании в межсезонный период, вызывают увеличение дефектов, имеющихся на покрытии дороги. В связи с этим к материалам покрытия предъявляются самые жесткие требования по прочности, тепло- и морозостойчивости, водонепроницаемости, а также подверженности шлифованию и истиранию. Недостаточная морозостойчивость вызывает выкрашивание минеральных частиц. Это приводит к образованию выбоин и снижению срока службы дороги. С другой стороны, необходимо производить оценку соответствия используемых на вывозке древесины транспортных средств тем, которые были приняты при разработке проекта. Анализ проектов дорог, находящихся в эксплуатации на предприятиях лесопромышленного комплекса, выявил серьезные проблемы. Ранее используемые для вывозки отечественные лесовозы имели нагрузку на ось автомобиля, не превышающую 100 кН, что соответствовало расчетной нагрузке типа А. Характерной особенностью современной вывозки древесины является то, что многие участки дорог начинают работать в режиме тяжелого и интенсивного движения. Это вызывает необходимость использования более жестких технических требований в области увеличения расчетной нагрузки. Кроме того, даже при обеспечении максимальной рейсовой нагрузки ее нерациональное размещение на подвижном составе приводит к преждевременному разрушению лесовозных автомобильных дорог.

Непрерывное пользование лесной продукцией является одним из главных принципов ведения лесного хозяйства. При этом ключевым фактором является транспорт, который определяет экономическую доступность лесоматериалов. Его доля в себестоимости лесопродукции доходит до 40 %. Для уменьшения транспортных расходов необходимо обеспечить высокое качество дорог. Требуемые значения параметров дорожной одежды необходимо определять исходя из обеспечения минимальных величин эксплуатационных показателей в течение заданного периода действия лесовозных автомобильных дорог. Недостаточный уровень надежности покрытия является фактором, ограничивающим развитие и ведущим к увеличению транспортных расходов.

Высокие требования предъявляются в связи с этим и к автодорожному строительству. Основными дефектами при строительстве дорожного покрытия являются: недостаточное уплотнение, поперечные трещины, неровности, а также разрывы на поверхности покрытия [3]. В процессе эксплуатации лесовозной автомобильной дороги происходит постепенное развитие этих дефектов под действием транспортных средств и природно-климатических факторов, что в конечном счете приводит к образованию деформаций и разрушению дорожных одежд. Наиболее распространенными деформациями являются выбоины, трещины, выкрашивание, шелушение [3]. Деформации вызывают отказ участка лесовозной дороги и временное ограничение вывозки древесины либо не позволяют обеспечить движение в пределах установленных технических показателей.

На рис. 1 представлена конструкция дорожной одежды лесовозной автомобильной дороги.

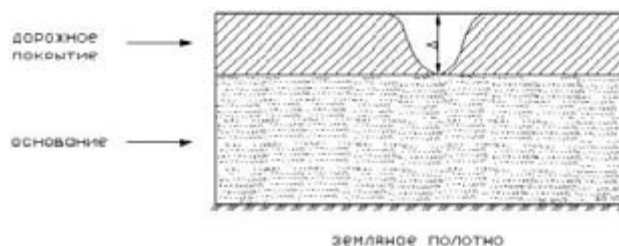


Рис. 1. Конструкция дорожной одежды лесовозной автомобильной дороги

Определим вероятность отказа участка лесовозной автомобильной дороги вследствие развития дефектов. Допустим, что для возникновения отказа на участке дороги длиной  $L$  достаточно одного дефекта предельной глубины  $\Delta$ . Полагая также, что время образования одной ямки предельной глубиной  $\Delta$  пропорционально разности между толщиной слоя  $\Delta$  и первоначальной глубиной дефекта  $D$ :

$$T = k(\Delta - D) \text{ или } t_i = k(\Delta - d_i), i = 1, \dots, N, \quad (1)$$

где  $\Delta$  – толщина слоя покрытия;  $D$  – глубина дефекта, являющаяся случайной величиной;  $d_i$  – первоначальная глубина  $i$ -го дефекта;  $t_i$  – время образования ямы от  $i$ -го дефекта;  $N$  – количество дефектов;  $k$  – износостойкость для данного материала покрытия.

Пусть  $D$  – случайная величина, имеющая усеченное экспоненциальное распределение (рис. 2, формула 2). Распределение усеченное, так как размер дефекта не может быть больше толщины слоя дорожного покрытия

$$f(d) = \frac{\lambda e^{-\lambda d}}{1 - e^{-\lambda \Delta}}. \quad (2)$$

Определим вероятность превышения размера первоначального дефекта некоторого значения  $d$ :

$$\begin{aligned} \Pr\{D \geq d\} &= \int_d^{\Delta} f(d) dd = \int_d^{\Delta} \frac{\lambda e^{-\lambda d}}{1 - e^{-\lambda \Delta}} dd = \\ &= \frac{1}{1 - e^{-\lambda \Delta}} \int_d^{\Delta} \lambda e^{-\lambda d} dd = \frac{1}{1 - e^{-\lambda \Delta}} \int_d^{\Delta} e^{-x} dx = \frac{e^{-\lambda d} - e^{-\lambda \Delta}}{1 - e^{-\lambda \Delta}}. \end{aligned} \quad (3)$$

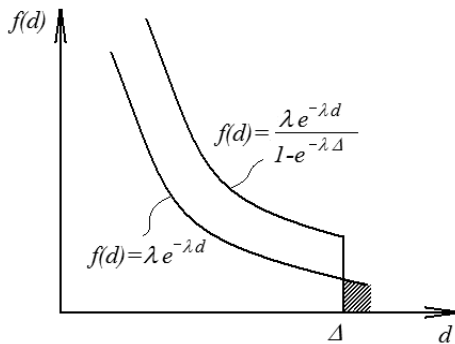


Рис. 2. Экспоненциальное и усеченное экспоненциальное распределения глубины дефекта  $D$

Найдем функцию распределения времени до образования ямы от произвольного дефекта  $G(t) = \Pr\{T \leq t\}$  (по определению функции распределения). Подставим в эту зависимость выражение (1). Тогда имеем:

$$\begin{aligned} G(t) &= \Pr\{T \leq t\} = \Pr\{k(\Delta - D) \leq t\} = \\ &= \Pr\left\{D \geq \Delta - \frac{t}{k}\right\} = \frac{e^{-\lambda(\Delta - \frac{t}{k})}}{1 - e^{-\lambda \Delta}} = \frac{e^{\frac{\lambda t}{k}} - 1}{e^{\lambda \Delta} - 1}. \end{aligned} \quad (4)$$

Время безотказной работы покрытия  $\tau$  должно определяться из условия  $\tau = \min(t_1, \dots, t_N)$ . Это время наискорейшего разрушения или появления первого дефекта, достигшего критического размера  $\Delta$ , наиболее слабого элемента.

В дальнейшем целесообразно определить функцию распределения времени (наработки) до отказа с использованием экстремальных распределений [1], [2].

Напомним:  $Y_n$  – наименьшее значение исследуемой случайной величины, то есть  $Y_n = \min(x_1, x_2, \dots, x_n)$  известной функции  $F(x)$ . Функция распределения наименьших значений, то есть случайной величины  $Y_n$ , имеет вид [2]:

$$G_n(y) = 1 - [1 - F(y)]^n. \quad (5)$$

В соответствии с этим находим вероятность отказа  $H(\tau)$ :

$$H(\tau) = \Pr\{\tau < \tau\} = G_N(\tau) = 1 - [1 - G(\tau)]^N. \quad (6)$$

При достаточно большом  $N$  имеем:

$$H(\tau) \approx 1 - e^{-NG(\tau)}. \quad (7)$$

Подставляя в формулу (7) выражение (4) для  $G(\tau)$ , получаем:

$$H(\tau) \approx 1 - \exp\left[-N \frac{e^{\frac{\lambda \tau}{k}} - 1}{e^{\lambda \Delta} - 1}\right].$$

Вероятность безотказной работы, соответственно, равна:

$$R(\tau) = 1 - H(\tau) \approx \exp\left[-N \frac{e^{\frac{\lambda \tau}{k}} - 1}{e^{\lambda \Delta} - 1}\right].$$

Таким образом, используя усеченное экспоненциальное распределение, можно определить вероятность появления отказа на участке лесовозной автомобильной дороги. В дальнейшем эти зависимости могут быть использованы для решения теоретических задач по определению требуемого уровня надежности автомобильной дороги.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем: Пер. с англ. М.: Мир, 1980. 608 с.
2. Питухин А. В. Вероятностно-статистические методы механики разрушения и теории катастроф в инженерном проектировании. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1998. 304 с.
3. Слободчиков Ю. В. Условия эксплуатации и надежность работы автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1987. 128 с.



УДК 630\*36

**ВЕНИАМИН НИКОЛАЕВИЧ ШИЛОВСКИЙ**доктор технических наук, профессор кафедры технологии металлов и ремонта лесоинженерного факультета ПетрГУ  
*tmir@psu.karelia.ru***ГРИГОРИЙ ЮРЬЕВИЧ ГОЛЬШТЕЙН**аспирант кафедры технологии металлов и ремонта лесоинженерного факультета ПетрГУ  
*grigory@psu.karelia.ru***ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ  
ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ОТКАЗОВ ГИДРОПРИВОДА ЛЕСНЫХ МАШИН**

В статье предложены методические подходы, математические модели расчета запасных частей для устранения параметрических отказов деталей, узлов и агрегатов лесозаготовительных машин в условиях рядовой эксплуатации.

Ключевые слова: распределение ресурсов, плотность распределения ресурсов, наработка детали, средний ресурс, интенсивность изнашивания, объем технических воздействий

При определении количества замен (запасных частей) для устранения параметрического отказа гидропривода ЛЗМ основной характеристикой процесса восстановления является функция восстановления [1], которая численно равна математическому ожиданию количества замен  $N_d$  при наработке  $T$ :

$$N_d = \sum_{i=1}^{\infty} F_i(T), \quad (1)$$

где  $F_i(T)$  – функция распределения ресурсов заменяемых деталей ( $i$ -х замен).

Чтобы выявить фактическое распределение ресурсов заменяемых деталей, требуются длительные эксплуатационные испытания, что затрудняет определение объема технических воздействий и расхода запасных частей. Одним из способов преодоления этих трудностей является метод расчета запасных частей на использовании скорости или интенсивности изнашивания деталей [2], так как получить такие данные можно при сравнительно небольшой наработке, не ожидая отказа детали (сопряжения).

Принимая процесс изнашивания близким к линейному [3], исходное уравнение для определения наработки детали до отказа приблизительно можно записать в следующем виде:

$$T_0 = \frac{\Delta_n - \Delta_0}{k}, \quad (2)$$

где  $T_0$  – наработка детали до отказа, моточас.;  $\Delta_n$  – предельно допустимое значение износа, мкм;  $\Delta_0$  – начальное значение износа, мкм;  $k$  – интенсивность изнашивания, мкм/1000 моточас.

Наработка детали до отказа зависит от многих случайных факторов, поэтому ее можно рассматривать как случайную величину, вид распределения которой может быть различным. Воспользуемся известным в математике приемом, согласно которому любую непрерывную функцию можно с любой степенью точности заменить многочленом  $n$ -й степени, то есть плотность интенсивности изнашивания можно записать в виде:

$$f(k) = a_0 + a_1 \cdot k + a_2 \cdot k^2 + \dots + a_n \cdot k^n, \quad (3)$$

где  $a_0, a_1, \dots, a_n$  – коэффициенты многочлена.

Зависимость (1) можно рассматривать как функцию случайного аргумента  $a$ . Плотность распределения ресурса можно выразить известной формулой:

$$f(T) = \omega[\phi(T)|\phi'(T)], \quad (4)$$

где  $\phi'(T)$  – обратная функция  $\phi(T)$ ;  $|\phi'(T)|$  – абсолютное значение производной от обратной функции.

С учетом выражений (2) и (3) и рекомендаций работы [2] плотность распределения ресурса можно представить в следующем виде:

$$f(T) = \sum_{i=0}^n \frac{a_n (\Delta_n - \Delta_0)^{n+1}}{T^{n+2}}. \quad (5)$$

По найденной плотности распределения, как известно, можно определить средний ресурс исследуемого сопряжения (детали):

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} T \cdot f(T) dT. \quad (6)$$

Согласно рекомендациям работ [1], [2], задавая минимальное  $K_1$  и максимальное  $K_2$  значения интенсивности изнашивания:

$$T_1 = \frac{\Delta_n - \Delta_0}{k_2} \text{ и } T_2 = \frac{\Delta_n - \Delta_0}{k_1},$$

средний ресурс детали с учетом его усеченного распределения может быть определен по формуле:

$$T_{cp} = \frac{(\Delta_n - \Delta_0) \left[ a_0 \cdot \ln \frac{k_2}{k_1} + \sum_{i=1}^n \frac{a_n}{n} (k_2^n - k_1^n) \right]}{\sum_{i=0}^n \frac{a_n}{n+1} (k_2^{n+1} - k_1^{n+1})}. \quad (7)$$

Для упрощения записи введем обозначения:

$$R_1(k) = a_0 \ln \frac{k_2}{k_1} + \sum_{i=1}^n \frac{a_n}{n} (k_2^n - k_1^n), \quad (8)$$

$$R_c(k) = \sum_{i=0}^n \frac{a_n}{n+1} \cdot (k_2^{n+1} - k_1^{n+1}). \quad (9)$$

С учетом принятых обозначений формула (7) будет иметь вид:

$$T_{cp} = \frac{R_1(k)(\Delta_n - \Delta_0)}{R_c(k)}. \quad (10)$$

Среднее квадратическое отклонение  $\sigma(T)$  среднего ресурса при этом равно:

$$\sigma(T) = \left[ \int_{-\infty}^{\infty} T^2 f(T) dT - \left( \int_{-\infty}^{\infty} T f(T) dT \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (11)$$

Подставив в формулу (11) значение функции для усеченного распределения и решив интегралы с учетом принятых обозначений (8) и (9), согласно работе [3], получим зависимость:

$$\sigma(T) = \frac{\Delta_n - \Delta_0}{R_c(k)} \sqrt{R_c(k) \cdot R_2(k) - R_1^2(k)}, \quad (12)$$

где

$$R_2(k) = a_0 \left( \frac{1}{k_1} - \frac{1}{k_2} \right) + a_1 \ln \frac{k_2}{k_1} + \sum_{i=2}^n \frac{a_n}{n-1} (k_2^{n-1} - k_1^{n-1}).$$

Расход запасных частей, используя выражения  $T_{cp}$  и  $\sigma(T)$ , можно определить по известной в теории надежности формуле:

$$M(T) = \frac{T}{T_{cp}} + \psi_{\alpha} \frac{\sigma(T) \sqrt{T}}{\sqrt{T_{cp}^3}}, \quad (13)$$

где  $M(T)$  – расход запчастей, шт.;  $T$  – наработка объекта с начала эксплуатации, моточас.;  $\psi_{\alpha}$  – квантиль нормального распределения в зависимости от принятой доверительной вероятности  $P = 1 - \alpha$ ;  $\alpha$  – риск недостаточности числа запасных частей.

Подставляя в формулу (13) зависимости (10) и (12), получим:

$$M(T) = \frac{R_c(k)T}{R_1(k)(\Delta_n - \Delta_0)} \cdot \left[ 1 + \frac{\psi \sqrt{\Delta_n - \Delta_0}}{\sqrt{T}} \cdot \sqrt{\frac{R_2(k)}{R_1(k)} - \frac{R_1(k)}{R_c(k)}} \right]. \quad (14)$$

Неизвестные коэффициенты многочлена (3):  $a_0, a_1, \dots, a_n$ , согласно рекомендациям работы [4], можно найти по экспериментальным данным интенсивностей изнашивания деталей, используя метод наименьших квадратов, а именно метод Чебышева. Выражение для определения искомых коэффициентов имеет вид:

$$f(k) = \frac{\sum W_i}{M} + \frac{\sum W_i \cdot V_1(k_i)}{\sum V_1^2(k_i)} + \dots + \frac{\sum W_i \cdot V_n(k_i)}{\sum V_n^2(k_i)} V_n(k), \quad (15)$$

где  $\sum W_i$  – сумма частот статистического ряда интенсивностей изнашивания;  $M$  – число ин-

тервалов статистического ряда;  $V_n(k_i)$  – коэффициенты полиномов Чебышева.

Согласно работе [4], зависимости  $V_n(k)$  определяются для каждого члена ряда (15) по следующим формулам:

$$V_1(k) = k - \frac{M+1}{2} B, \quad (16)$$

$$V_2(k) = \left( K - \frac{M+1}{2} \right)^2 - \frac{M^2-1}{12}, \quad (17)$$

$$V_3(k) = \left( k - \frac{M+1}{2} \right)^2 - \frac{3M^2+7}{20} \left( k - \frac{M+1}{2} \right), \quad (18)$$

$$V_4(k) = \left( k - \frac{M+1}{2} \right)^4 - \frac{1}{14} (3M^2-13) \left( k - \frac{M+1}{2} \right)^2 + \frac{3(M^2-1)(M^2-9)}{560}. \quad (19)$$

Ошибка ( $\varepsilon_n$ ) приближенного многочлена выражается формулой:

$$\varepsilon_n = \sqrt{\frac{\sum_n}{M - (n+1)}}, \quad (20)$$

где  $\sum_n$  – сумма квадратов разностей между экспериментальными данными и определяемым многочленом.

Рассмотрим применение метода Чебышева на условном числовом примере. При исследовании интенсивности изнашивания деталей шестеренного насоса получен статистический ряд, представленный в табл. 1.

Найдем для этого ряда многочлен  $n$ -й степени. Для этого вычислим сначала первый член ряда (15), то есть уравнение нулевого порядка:

$$f_0(k) = \frac{\sum W_i}{M} = \frac{1}{11} = 0,091.$$

Найдем сумму квадратов разностей для этого уравнения:

$$\sum_0 = \sum W_i^2 - \frac{(\sum W_i)^2}{M} = 0,1352 - \frac{1^2}{11} = 0,0442.$$

Вычисляем ошибку приближения:

$$\varepsilon_0 = \sqrt{\frac{0,0442}{11-1}} = 0,065.$$

Затем определим второй член ряда по формуле (15). Для этого, согласно формулам (16–19), делаем соответствующие вычисления или берем значения коэффициентов из таблицы [5], соответствующей числу интервалов ряда  $M=11$ .

Составим табл. 2, где значения  $V_i(k_i)$  приведены в четвертой колонке, а сумма квадратов – внизу этой колонки. Вычислим произведения  $W_i V_i(k_i)$  и занесем эти данные в пятую колонку табл. 2. Определим сумму этих произведений и запишем внизу пятой колонки.

Таблица 1

Исходные данные условного примера

Значение $k_i$ в интервале	0...1	1...2	2...3	3...4	4...5	5...6	6...7	7...8	8...9	9...10	10...11	сумма
Частность $W_i$	0,05	0,08	0,16	0,2	0,18	0,12	0,10	0,05	0,03	0,02	0,01	1,0
$W_i^2$	0,0025	0,0064	0,0256	0,04	0,0324	0,0144	0,01	0,0025	0,0009	0,0004	0,0001	0,132

Таблица 2

Результаты промежуточных расчетов

$k_i$	$W_i$	$W_i^2$	$V_1(k_i)$	$W_i V_1(k_i)$	$V_2(k_i)$	$W_i V_2(k_i)$	$V_3(k_i)$	$W_i V_3(k_i)$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0–1	0,05	0,0025	-5	-0,25	+15	+0,75	-30	-1,5
1–2	0,08	0,0064	-4	-0,32	+6	+0,48	+6	+0,48
2–3	0,16	0,0256	-3	-0,48	-1	-0,16	+22	+3,52
3–4	0,20	0,040	-2	-0,40	-6	-1,20	+23	+4,6
4–5	0,18	0,0324	-1	-0,18	-9	-1,62	+14	+2,52
5–6	0,12	0,0144	0	0	-10	-1,2	0	0
6–7	0,10	0,01	+1	+0,10	-9	-0,90	-14	-1,40
7–8	0,05	0,0025	+2	+0,10	-6	-0,30	-23	-1,15
8–9	0,03	0,0009	+3	+0,09	-1	-0,03	-22	-0,66
9–10	0,02	0,0004	+4	+0,08	+6	+0,12	-6	-0,12
10–11	0,01	0,0001	+5	+0,05	+15	+0,15	+30	+0,30
Сумма $\sum$	1,0	0,1352	$V_1^2(K_i)$ 110	-1,21	$V_2^2(K_i)$ 856	$[V_3(K_i)]^2$ 4299		+6,59

Подставив полученные данные, найдем второй член ряда (15):

$$\frac{\sum W_i V_i(k_i)}{\sum V_i^2(k_i)} \left( k - \frac{M+1}{2} \right) = \\ = \frac{-1,21}{110} \left( k - \frac{11+1}{2} \right) = 0,066 - 0,011k.$$

Сложив найденный результат с правой частью уравнения нулевого порядка, найдем уравнение первого порядка:

$$f_1(k) = 0,091 + 0,066 - 0,011k = 0,157 + 0,011k.$$

Вычислим разность квадратов и определим ошибку приближения:

$$\sum_1 = \sum_0 - \frac{[\sum W_i V_i(k_i)]^2}{\sum V_i^2(k_i)} = 0,0442 - \frac{-1,21^2}{110} = 0,0318. \\ \varepsilon_1 = \sqrt{\frac{0,0318}{11-2}} = 0,059.$$

Аналогично найдем третий член ряда (15) и уравнение второго порядка:

$$f_2(k) = 0,039 + 0,0437k - 0,00456k^2.$$

Ошибка приближения при этом составит  $\varepsilon_2 = 0,0418$ , то есть она снизилась по сравнению с  $\varepsilon_1$ . Следовательно, необходимо повышать дальше порядок многочлена, пока ошибка приближения не перестанет заметно уменьшаться.

Вычисляем четвертый член ряда (15) и находим уравнение третьего порядка:

$$f_3(k) = -0,107 + 0,159k - 0,0276k^2 + 0,0012k^3.$$

Ошибка приближения для этого уравнения составляет  $\varepsilon_3 = 0,0236$ . Ошибка приближения, как показывает практика расчетов [5], при дальнейших расчетах уменьшается мало. Вычислить многочлен выше четвертого и даже третьего порядка нет надобности.

Оценка погрешностей представленных зависимостей для определения ресурса деталей и числа запчастей применительно к конкретным сопряжениям конкретных узлов гидропривода ЛЗМ может быть осуществлена сопоставлением фактических и расчетных данных об износе и о расходе запасных частей в условиях рядовой эксплуатации в зависимости от фактической наработки исследуемых объектов.

Для ускорения расчетов запасных частей по изложенной методике может быть построена номограмма, состоящая из двух частей: левой и правой.

Один из вариантов возможной (условной) номограммы представлен на рисунке. На горизонтальных шкалах левой части номограммы отложены значения  $\Delta$ , на нижней от 0 до 650 мкм, а на верхней от 0 до 9700 мкм. Начало отсчета у них различное: у нижней – возрастание значений идет слева направо, у верхней – наоборот. Такое расположение этих шкал вызвано различным их применением. Верхняя шкала предназначена для деталей, имеющих большие отклонения предельно допустимых размеров  $\Delta$  и больше интенсивности изнашивания (поршневые и штоковые уплотнения и другие быстроизнашиваемые металлические детали), а нижняя – для деталей с небольшими отклонениями размеров и интенсивностями изнашивания. Для удобства записи значения  $\Delta$  на верхней шкале уменьшены в 100 раз, а на нижней – в 10 раз.

На вертикальной шкале левой части номограммы отложены значения

$$\Delta \frac{R_1(k)}{R_c(k)},$$

то есть средний ресурс детали.

Такое построение номограммы вызвано тем, что при подстановке в формулу (6) значения функции (5) получим интервал, который расходится при  $T=0$  и  $T=\infty$ , а на остальном промежутке сходится. Это хорошо согласуется с физической сущностью рассматриваемой модели процесса изнашивания, согласно которой принятое допущение о постепенном изменении размеров детали означает, что она не может отказать мгновенно, и наоборот – не может работать бесконечно долго без износа. В связи с этим, как уже говорилось, в данном случае необходимо рассматривать усеченное распределение. При этом коэффициент усечения ( $S$ ) можно найти из условия [4]:

$$S \int_{T_1}^{T_2} f(T) dT = 1.$$

Для нахождения величины среднего ресурса надо опустить перпендикуляр из точки, соответствующей значению износа  $\Delta$  для данной детали, до пересечения с линией, на которой указаны пределы варьирования интенсивности изнашивания ( $K_i$ ), а затем из этой точки провести горизонтальную линию до пересечения с вертикальной шкалой. При этом следует учитывать, что для нижней шкалы пучок веерных линий с обозначенными интенсивностями изнашивания выходит из левого нижнего угла, а для верхней шкалы – из правого.

Правая часть номограммы предназначена для определения потребности в запчастях в зависимости от среднего ресурса детали (определяется в левой части номограммы или задается), нара-

ботки объекта с начала эксплуатации  $T$  и доверительной вероятности  $P$ . На нижней горизонтальной шкале правой части номограммы отложены значения

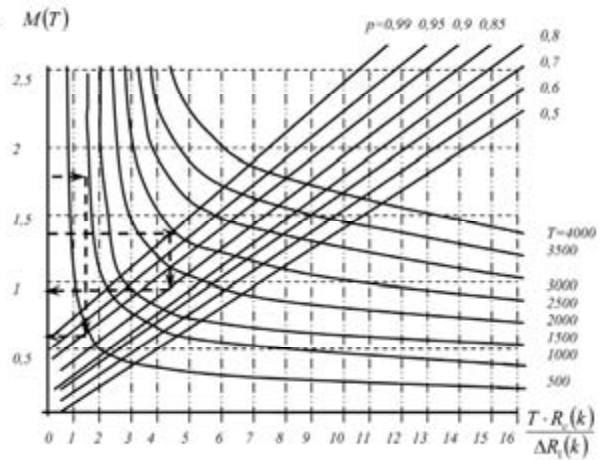
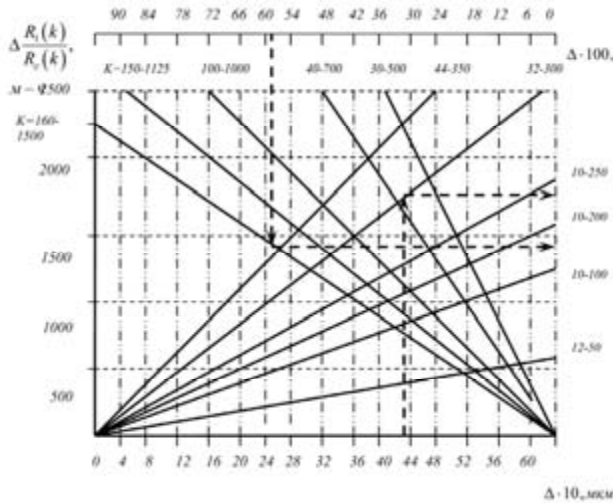
$$\frac{T \cdot R_c(k)}{\Delta R_c(k)},$$

то есть математическое ожидание расхода запасных частей, на вертикальной – потребность в запасных частях на ресурсную наработку объекта (наработку до предельного состояния).

Порядок определения потребности в запасных частях с помощью номограммы рассмотрим на примере. Находим точку пересечения перпендикуляра, восстановленного, например, из  $\Delta = 430$  мм нижней шкалы левой части номограммы, с линией, соответствующей пределам варьирования интенсивности изнашивания данной детали. Из этой точки проводим горизонтальную прямую до пересечения с кривой правой части номограммы, на которой указана соответствующая наработка на отказ, и из этой точки

проводим вертикальную прямую до пересечения с линией с заданной горизонтальной вероятностью. Полученную точку пересечения проектируем на вертикальную шкалу правой части номограммы, на которой указана искомая потребность в запасных частях. Порядок поиска решения на номограмме указан штриховыми линиями со стрелками.

Когда нет данных по интенсивности изнашивания и предельно допустимому отклонению размеров детали, но известен средний ее ресурс, потребность в запасных частях по номограмме определяется так. Из точки, соответствующей среднему ресурсу детали, на вертикальной шкале левой части номограммы проводим горизонтальную прямую до пересечения с линией, на которой указан средний ресурс до предельного состояния, в правой части номограммы. Затем из этой точки проводим вертикальную прямую до пересечения с линией, соответствующей заданной доверительной вероятности, проектируем эту точку на вертикальную шкалу правой части номограммы и находим потребность в запасных частях.



Номограмма для определения объема технических воздействий (замен деталей) при постепенных (параметрических) отказах

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности. М.: Наука, 1965.
2. Иващенко Н. И. Технология ремонта автомобилей. Киев: Высшая школа, 1977. 360 с.
3. Иващенко Н. И., Гульченко И. М. Влияние износа деталей цилиндропоршневой группы на внешние характеристики автотракторных двигателей // Проблемы трения и изнашивания. Вып. 6. Киев: Техника, 1974. С. 61–63.
4. Иващенко Н. И., Трикозюк В. А. К методике определения количества запасных частей по данным интенсивности изнашивания деталей автомобилей // Автомобильная промышленность. 1974. № 9. С. 38–41.
5. Кокс Д., Смит В. Теория восстановления: Пер. с англ. М.: Советское радио, 1967. 458 с.

УДК 621.7+621.9

АНАТОЛИЙ ФЕДОРОВИЧ БРЕЦКИХ

ведущий инженер-электроник ПетрГУ  
vsysun@psu.karelia.ru

ВАЛЕРИЙ ИВАНОВИЧ СЫСУН

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой электроники и электроэнергетики, декан физико-технического факультета ПетрГУ  
vsysun@psu.karelia.ru

## ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ ОБРАБОТКА

В статье подробно рассмотрена физика электрической эрозии и описана аппаратура, применяемая для резания, прошивания, маркировки материала, шлифовки и упрочнения поверхностей.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, электрический разряд, эрозия, поверхность

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) заключается в изменении формы, размеров, шероховатости и свойств поверхности заготовки под воздействием электрических разрядов в результате электрической эрозии. Метод был разработан во время Великой Отечественной войны Б. Р. и Н. И. Лазаренко, предложившими использовать обычно вредную электрическую эрозию контактов для технологических целей обработки материалов (см. об этом: [1], [2], [3], [4]). Для предотвращения сварки и сохранения локальности обработки используют низкие напряжения, импульсный электрический разряд, при котором нагрев от контакта не успевает распространиться на всю деталь, и перемещение детали. Наиболее целесообразно использовать электроэрозионную обработку для деталей из твердых сплавов и при профильной обработке, когда металлорежущая технология трудно применима. Схема процесса ЭЭО показана на рис. 1.

Процесс ЭЭО происходит в рабочей жидкости (РЖ), которая заполняет межэлектродное пространство (МЭП), при этом один из электродов – заготовка, а другой электрод – инструмент (ЭИ). С целью преимущественной эрозии заготовки, а не инструмента применяют стойкие к эрозии электроды (CuC, CuW, C и др.), определенную полярность тока (при коротких импульсах на электрод-инструмент подают минус (включение на прямую полярность), при очень длинных – плюс (включение на обратную полярность)), при возможности – перемещение электрода.



Рис. 1. Схема процесса ЭЭО

Типичные режимы:

- для черновой обработки сталей:  $U = 18 \div 36$  В,  $I = 20 \div 120$  А,  $t_n = 200 \div 2000$  мкс;
- для чистовой обработки сталей:  $U = 40 \div 180$  В,  $I = 1 \div 5$  А,  $t_n = 5 \div 200$  мкс;
- для чистовой обработки твердых сплавов:  $U = 100 \div 200$  В,  $I = 0,2 \div 2$  А,  $t_n = 1 \div 10$  мкс.

При электроэрозионной обработке в воздухе или газовой среде происходит перемешивание и взаимное нанесение материалов электродов друг на друга. Их взаимодействие, а также взаимодействие с газовой средой приводит к образованию и нанесению на заготовку новых сплавов и соединений (нитридов из азота воздуха, карбидов – при графитовом инструменте и т. д.). Происходит также диффузия новых соединений в заготовку, измельчение зерен в приповерхностном слое толщиной в десятки доли миллиметра. Такая обработка называется *электроэрозионным упрочнением* (ЭЭУ). Для стабилизации процесса обработки используется вибрация инструмента с частотой  $f_{ЭИ} \sim 50$  Гц.

## 1. ФИЗИКА ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭРОЗИИ

При сближении электродов до расстояния нескольких десятков микрометров в отдельных местах (микровыступы) напряженность поля даже при напряжениях в десятки вольт может достигнуть пробойного значения. Возникает электрический разряд.

Итак, первая стадия процесса – пробой, образование узкого канала проводимости. Пробой начинается при достижении средней напряженности поля

$$E_{ср} = \frac{U}{d} = (1 \div 2) \cdot 10^3 \text{ В/мм},$$

где  $U$  – напряжение пробоя,  $d$  – минимальное межэлектродное расстояние (рис. 2а).

Вторая стадия – это образование вокруг канала проводимости газовой полости из паров жидкости и металлов, расширение канала проводимости и газовой полости в рабочую жидкость со скоростью до 150–200 м/с (примерно скорость звука). При этом на наружной границе канала образуется фронт уплотнения, под микровыступом локализуется нагрев металла детали. Когда разрядная емкость мала, канал разряда существенно не успевает расшириться и разряд протекает в виде искры. При этом анод сильнее эродирует, чем катод. В случае заполнения зазора жидким диэлектриком расширение канала также затрудняется. За счет выделения энергии на электродах на границах разрядного канала образуются лунки проплавления, увеличивающиеся при увеличении амплитуды тока и длительности импульса (рис. 2б). Температуру в заготовке после протекания импульса тока можно найти, считая источник тока точечным и распространение тепла полусферическим с радиусом  $r$ .

$$T = T_0 + \frac{W_{и} \eta}{c \rho \cdot 8(\pi \alpha t_{и})^{3/2}} e^{-\frac{r^2}{4 \alpha t_{и}}},$$

где  $T_0$  – начальная температура,  $W_{и}$  – энергия импульса,  $\eta$  – КПД,  $c$  – теплоемкость,  $\rho$  – плотность,  $\alpha = \lambda / c \rho$  – температуропроводность,  $\lambda$  – теплопроводность.

Третья стадия протекает после прекращения тока. Канал разряда начинает деионизоваться, газовая полость и окружающая ее жидкость про-

должают расширяться по инерции, создавая в центре над лункой разрежение. Расплавленный металл в лунке вскипает и выбрасывается в межэлектродный промежуток, откуда выносятся рабочей жидкостью. Иногда для улучшения его удаления применяют прокачку рабочей жидкости. Чем более вязкая рабочая жидкость, тем лучше она захватывает и уносит продукты эрозии.

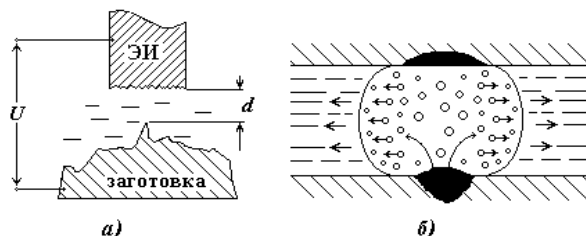


Рис. 2. Стадии пробоя:

а – образование узкого канала проводимости; б – образование вокруг канала проводимости газовой полости из паров жидкости и металлов, расширение канала проводимости и газовой полости в рабочую жидкость

## 2. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ОПЕРАЦИЙ

### 2.1. Электроэрозионная отрезка (ЭЭОт)

ЭИ 2 перемещается по направлению к заготовке 1 со скоростью  $V_{п.ЭИ}$ ; заготовка неподвижна. ЭЭОт выполняют в ванне с РЖ (с вибрацией ЭИ или без нее, рис. 3а).

ЭИ 2 вращается со скоростью  $V_{в.ЭИ}$  и подается на заготовку со скоростью  $V_{п.ЭИ}$ . Заготовка жестко закрепляется на рабочем столе или вращается со скоростью  $V_{в.з}$ . РЖ подают поливом через сопло 3 или погружением в ванную с РЖ (рис. 3б).

ЭИ 2 (проволока или лента) движется со скоростью  $V_{п.ЭИ}$  (рис. 3в).

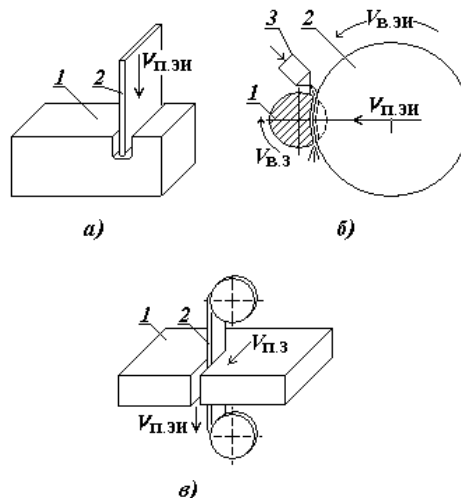


Рис. 3. Электроэрозионная отрезка

### 2.2. Электроэрозионное вырезание (ЭЭВ)

Операция ЭЭВ (рис. 4) обеспечивается перемещением заготовки 1, закрепленной на столе

4, по координатам  $X$  и  $Y$  со скоростями  $V_{п.х}$  и  $V_{п.у}$  и при движении проволочного ЭИ 2 относительно заготовки со скоростью  $V_{п.эи}$ .

ЭЭВ производится с погружением электродов в РЖ и поливом РЖ; перемещение заготовки по заданной траектории осуществляется по копиру 3, скрепленному с заготовкой через прокладку 5, по программе или фотошаблону.

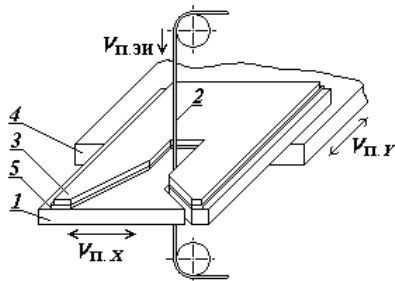


Рис. 4. Электроэрозионное вырезание

### 2.3. Электроэрозионное прошивание (ЭЭПр)

Происходит подача ЭИ 2 в направлении на заготовку 1 со скоростью  $V_{п.эи}$ , вращение ЭИ и заготовки со скоростями  $V_{в.эи}$  и  $V_{в.з}$  и вибрации ЭИ с частотой  $f_{эи}$  (рис. 5).

Обработку производят прямым копированием в ванне с РЖ с одновременной прокачкой ее через ЭИ (или без прокачки); для стабилизации процесса обработка производится с вибрацией ЭИ; возможна обработка групповыми ЭИ.

ЭЭПр отверстий с криволинейной осью обеспечивается подачей ЭИ 2 относительно заготовки 1 со скоростью  $V_{п.эи}$  и вибрацией с частотой  $f_{эи}$ .

Обработка производится прямым копированием в ванне с РЖ; прокачка РЖ через ЭИ используется редко; для стабилизации обработки ЭИ придают вибрацию.

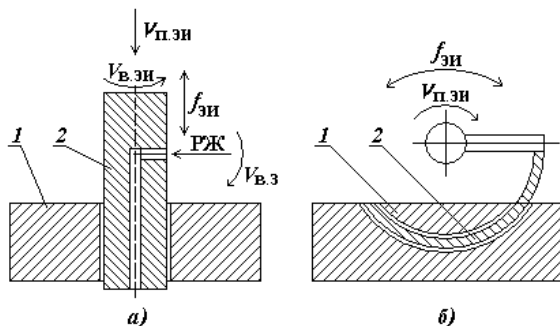


Рис. 5. Электроэрозионное прошивание

### 2.4. Электроэрозионное объемное копирование (ЭЭОК)

Одноконтурная схема обеспечивает подачу ЭИ 2 со скоростью  $V_{п.эи}$  (рис. 6).

Обработка производится прямым копированием в ванне с РЖ с прокачкой (или без прокачки) ее через каналы 3 в ЭИ; для стабилизации обработки используют вибрацию ЭИ, а для повышения точ-

ности обработки – осцилляцию с окружной скоростью  $V_{о.эи}$ .

Многоконтурная схема работает от одного регулятора подачи; все движения аналогичны одноконтурной схеме; заготовка 1 неподвижна.

Блок ЭИ состоит из секций 2 и 6, изолированных прокладкой 4; обработка производится от одного или нескольких генераторов импульсов (ГИ); операция выполняется с погружением электродов в РЖ и прокачкой ее через каналы 3 и 5.

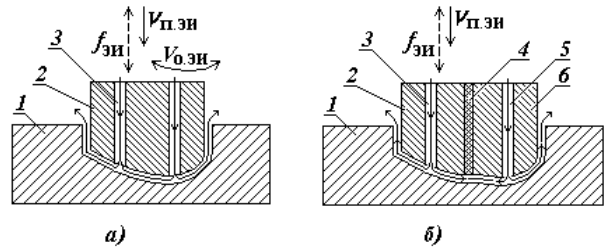


Рис. 6. Электроэрозионное объемное копирование

### 2.5. Электроэрозионное шлифование (ЭЭШ)

При электроэрозионном шлифовании происходит подача РЖ поливом через сопло 3.

Круглое ЭЭШ (рис. 7а) обеспечивается вращением ЭИ 2 с окружной скоростью  $V_{в.эи}$ , дискретной подачей в направлении заготовки со скоростью  $V_{п.по.эи}$  и продольной возвратно-поступательной подачей  $V_{п.пр.эи}$ ; заготовка 1 вращается с окружной скоростью  $V_{в.з}$ .

При плоском ЭЭШ (рис. 7б) необходимо обеспечить вращение ЭИ 2 с окружной скоростью  $V_{в.эи}$ , вертикальную дискретную подачу в направлении заготовки 1 со скоростью  $V_{п.эи}$ . Заготовка имеет продольное возвратно-поступательное перемещение со скоростью  $V_{п.пр.з}$  и поперечное дискретное со скоростью  $V_{п.по.з}$ .

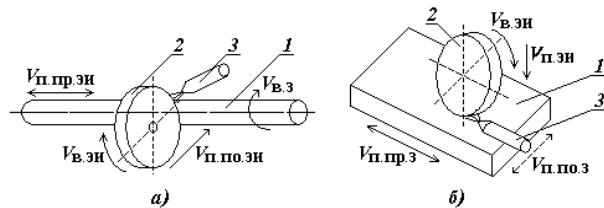


Рис. 7. Электроэрозионное шлифование:  
а – круглое; б – плоское

### 2.6. Электроэрозионное маркирование (ЭЭМ)

Электроэрозионное маркирование производится аналогично электроэрозионному копированию, но без осциллирующего движения ЭИ.

### 2.7. Электроэрозионное упрочнение (ЭЭУ)

Ручное ЭЭУ обеспечивается вибрацией ЭИ 2 с частотой  $f_{эи}$ ; контактирование ЭИ с заготовкой



1 обеспечивается ручным подводом электромагнитного вибратора 3 с закрепленным в нем ЭИ к заготовке и ручным перемещением инструмента (строчками) (рис. 8).

Межэлектродная среда – воздух или безокислительная газовая; шаг строчек не должен превышать 1/4 диаметра лунки. Данная операция осуществляется при необходимости изменения физико-химических свойств поверхностных слоев заготовок.

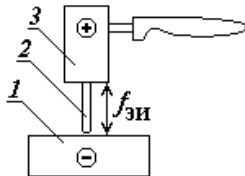


Рис. 8. Электроэрозионное упрочнение

### 3. ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

1. Производительность  $Q$  – отношение объема или массы удаленного металла ко времени обработки. При разрезании и упрочнении под производительностью понимают отношение площади обработки (среза) ко времени обработки.

Производительность пропорциональна энергии импульса и частоте  $Q = k \cdot W_{\text{и}} \cdot f$ , где коэффициент пропорциональности не постоянен, а зависит от соотношения между амплитудой тока и длительностью импульса, а также от частоты. Для максимальной производительности необходимо достичь оптимального соотношения между  $I_{\text{макс}}$  и  $t_{\text{и}}$ .

Для повышения производительности при электроэрозионной обработке применяют многоконтурную и многоэлектродную схемы обработки.

Типичные значения производительности  $Q = 50 \div 500 \text{ мм}^3/\text{мин}$ .

2. Точность – степень соответствия формы и размеров готовой детали чертежу. Точность определяется:

- точностью изготовления электрода-инструмента,
- эрозией инструмента,
- погрешностью обработки.

Типичные значения точности (технологический зазор  $\delta$ , рис. 9):

- $\delta = 0,15 \div 0,5 \text{ мм}$ , точность  $0,01 \div 0,005 \text{ мм}$  при черновой обработке,
- $\delta = 0,05 \div 0,005 \text{ мм}$ , точность  $0,002 \div 0,005 \text{ мм}$  при чистовой обработке.

3. Качество поверхности определяется шероховатостью (высота неровностей). Высота неровности « $R$ » зависит от глубины лунки и степени перекрытия лунок. Для лучшего качества поверхности нужно уменьшать энергию импульса и увеличивать частоту, а также уменьшать подачу. Существует эмпирическая зависимость высоты микронеровностей  $R_{\text{макс}}$  от отношения средней силы тока  $I_{\text{ср}}$  к частоте импульсов  $f$  при ЭЭО заготовок из стали углеродистой, низколегированной и жаропрочной на никелевой основе при медном ЭИ:

$$R_{\text{макс}} (\text{мкм}) = 20 \left( \frac{I_{\text{ср}}}{f} \right)^{0,54} = 20 (I_{\text{макс}} \cdot t_{\text{и}})^{0,54},$$

где единицы измерения  $I_{\text{ср}} - \text{А}$ ,  $f - \text{кГц}$ ,  $t_{\text{и}} - \text{мс}$ .

Средняя шероховатость  $R_{\text{ср}}$  составляет:

- $0,3 \div 0,6 \text{ мкм}$  при чистовой обработке сталей,
- $0,2 \div 0,3 \text{ мкм}$  – твердых сплавов,
- $20 \div 40 \text{ мкм}$  при черновой обработке,
- до  $200 \text{ мкм}$  при обдирке.

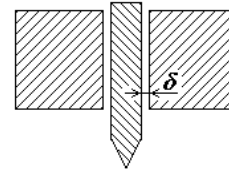


Рис. 9. Технологический зазор

### 4. РАБОЧИЕ ЖИДКОСТИ

Рабочие жидкости должны удовлетворять целому ряду требований:

- при пробое важна диэлектрическая прочность жидкости, что обеспечивает малые пробойные межэлектродные промежутки;
- на стадии разряда существенной является способность связать и удалить разложившиеся вещества, не оставляя окисных и других пленок на электродах;
- после разряда особое значение имеет вязкость рабочей среды, которая способствует захвату продуктов эрозии. Одновременно с помощью рабочей среды осуществляется охлаждение рабочей зоны и предотвращение оплавления поверхности электродов;
- рабочая жидкость дополнительно должна иметь высокую температуру вспышки, низкую испаряемость, хорошую фильтруемость, отсутствие запаха и низкую токсичность.

В качестве рабочих жидкостей могут быть использованы:

1. Масло индустриальное И12А, И30А, И40А (вязкость  $\nu = 12 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ ).
2. Смесь керосина с маслом И12А, 1:1,  $\nu = 6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ .
3. Сырье углеводородное,  $\nu \approx 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ .
4. Трансформаторное масло,  $\nu = 2,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ .
5. Рабочая жидкость РЖ-3,  $\nu \leq 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ .
6. Рабочая жидкость РЖ-8,  $\nu = (6 \div 8,5) \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Отметим, что керосин имеет вязкость  $\nu = 0,018 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ , вода –  $\nu = 0,01 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Для маркирования широко применяют РЖ – дизельное топливо.

Все эти рабочие жидкости по отношению к воде имеют существенно большую вязкость и меньшую коррозионную способность, но сильнее разлагаются и загрязняют электроды. Кроме того, они дороги.

### 5. ЭЛЕКТРОД-ИНСТРУМЕНТ

ЭИ должен обеспечивать стабильную работу во всем диапазоне рабочих режимов и макси-

мальную производительность при малом износе. ЭИ должен быть достаточно жестким, суммарная деформация (усилия прокатки РЖ, температурная деформация и др.) не должна превышать 0,3 % допуска на основные размеры детали. Конструкция ЭИ должна быть технологичной, а стоимость – ниже стоимости основного изделия (штампа, пресс-формы и т. д.) не менее, чем в три раза. На поверхности ЭИ не должно быть вмятин, трещин, царапин, расслоения.

При обработке углеродистых инструментальных сталей и жаропрочных сплавов на никелевой основе используют графитовые и медные ЭИ. Для черновой ЭО из этих материалов применяют ЭИ из алюминидовых сплавов и чугуна, а при обработке отверстий – ЭИ из латуни.

При обработке твердых сплавов и тугоплавких материалов на основе вольфрама, молибдена и других металлов применяют ЭИ из композиционных материалов, содержащих медь, вольфрам и другие добавки, так как при графитовых ЭИ не обеспечивается высокая производительность из-за низкой стабильности процесса, а ЭИ из меди имеют большой износ.

Электроды-инструменты для вырезки обычно изготавливают из вольфрамовой, молибденовой или латунной проволоки. Вольфрамовая проволока имеет большую удельную прочность, но низкую удельную проводимость и применяется при диаметрах проволоки  $d_{пр} \leq 0,08$  мм. Молибден имеет большую проводимость, чем вольфрам,  $d_{пр} \leq 0,1 \div 0,2$  мм; латунь и медь применяют при диаметрах  $d_{пр} \geq 0,1 \div 0,3$  мм.

При прошивании электроды-инструменты изготавливают в виде стержней и трубок с отверстием для подачи рабочей жидкости (рис. 10).

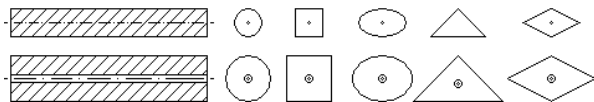


Рис. 10. Форма электродов-инструментов

## 6. ТИПОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ

В таблице приведены типовые технологические режимы, обеспечивающие оптимальную производительность, шероховатость и износ инструмента.

Технологические характеристики обработки твердого сплава ВК 8 электродом из латуни

$t_{ц}$ , мкс	$I_{ср}$ , А	$f$ , кГц	$Q$ , мм <sup>3</sup> /мин	$R$ , мкм	$S$ , мм <sup>2</sup>
62	30	8	48	20	500
12	27	44	43,5	2,5	500
5	25	100	36,5	2,5	500
2,5	17	200	27	2,5	500
2,5	8	200	13	1,25	250
1,1	3	440	3,5–4	0,63	50
0,6	1,7	440	1,9	0,63	50

## 7. ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

### Генераторы импульсов

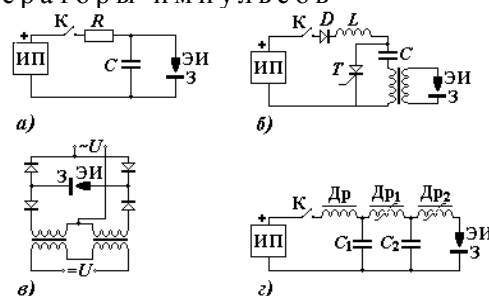


Рис. 11:

а – релаксационный RC-генератор, б – управляемый генератор, в – магнитно-насыщенный генератор, г – многозвенный магнитный генератор, ЭИ – электрод-инструмент, З – заготовка (деталь), К – коммутатор, ИП – источник питания

### Типовые станки

- 4720М, МА4720У – настольный копировально-прошивочный,  $Q = 70$  мм<sup>3</sup>/мин,  $R = 0,4 \div 0,8$  мкм, точность –  $0,03 \div 0,04$  мм, программное перемещение стола;
- 4К722АФ1, 4Д722В – копировально-прошивочный, координатный, особо высокой точности с адаптивно-программным управлением,  $Q = 500$  мм<sup>3</sup>/мин, точность –  $0,01 \div 0,02$  мм;
- 4П724ФЗМ – копировально-прошивочный с ЧПУ,  $Q = 200$  мм<sup>3</sup>/мин, точность –  $0,05$  мм;
- 4Б611, 4В611 – переносной для извлечения остатков сломанного инструмента, скорость углубления – до 15 мм/мин;
- 4531ФЗ – вырезной проволоочный для профильных деталей, поверхность среза ~ 40 мм<sup>2</sup>/мин;
- ЭФА – фотокопировальный станок, 20 мм<sup>2</sup>/мин.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Под ред. В. Н. Волосатова. Л.: Машиностроение, 1986. 719 с.
2. Справочник по электроэрозионной обработке материалов / Под ред. Е. Ф. Немилова. Л.: Машиностроение, 1989. 164 с.
3. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов / Под ред. В. П. Смоленцева. М.: Высшая школа, 1983. 307 с.
4. Электроэрозионная обработка металлов / Под ред. Никашевича И. Т. Минск: Наука и техника, 1988. 216 с.

УДК 537.525.1

**МАКСИМ СЕРГЕЕВИЧ ГОЛУБЕВ**

аспирант кафедры общей физики 1-го физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета  
*maksider@yandex.ru*

**ЕЛЕНА СОСЛАНОВНА ДЗЛИЕВА**

кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры общей физики 1-го физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета  
*Viktor.Karasev@pobox.spbu.ru*

**МАКСИМ АНАТОЛЬЕВИЧ ЕРМОЛЕНКО**

аспирант кафедры общей физики 1-го физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета  
*Viktor.Karasev@pobox.spbu.ru*

**АРТЕМ ЮРЬЕВИЧ ИВАНОВ**

аспирант кафедры общей физики 1-го физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета  
*artyom\_ivanov@hotmail.ru*

**ВИКТОР ЮРЬЕВИЧ КАРАСЕВ**

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики 1-го физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета  
*Viktor.Karasev@pobox.spbu.ru*

**МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПЫЛЕВОГО ОБЛАКА**

После произведения 3D-сканирования плазменно-пылевой структуры в статье предлагается метод для определения типа объемной упаковки в структуре. Парная корреляционная функция, построенная для изучаемой структуры, сравнивается с эталонной, построенной по модельной решетке с положениями частиц, имеющими случайный сдвиг относительно положения узлов идеальной решетки. Метод позволяет адекватно выявить тип упаковки в изучаемой структуре.

Ключевые слова: самоорганизованные системы, пылевая плазма, фазовые состояния и переходы в пылевой плазме

Как известно, для исследования структурных особенностей пылевой плазмы применяются методы коллоидной химии [2], [4]. Эти методы позволяют оценивать степень упорядоченности частиц в отдельном сечении структуры.

Размер частиц – 1 мкм. Вещество частиц –  $\text{LiNbO}_3$ . Разряд постоянного тока в смеси 3:1  $\text{Ne-H}_2$ , давление  $P = 1,3$  Торр,  $I = 0,9$  А, горизонтальный размер – 7 мм.

Для этого служат автокорреляционные функции, оценивающие степень трансляционной и ориентационной упорядоченности в структуре. Трансляционный порядок оценивается по средней плотности упаковки частиц в зависимости от расстояния до выделенной частицы.

Ориентационная упорядоченность определяется по среднему отклонению ориентации линий, соединяющих соседние частицы, от ожидаемой для того или иного типа упаковки. Параметры аппроксимации полученных для структуры функций позволяют произвести классификацию структуры в соответствии с имеющейся теорией двумерного

плавления КТНУ [3], [4]. В случае ориентационной автокорреляционной функции таким параметром аппроксимации является показатель степени огибающей экспоненты. Для ориентационной корреляционной функции это параметры степенной или экспоненциальной аппроксимаций.

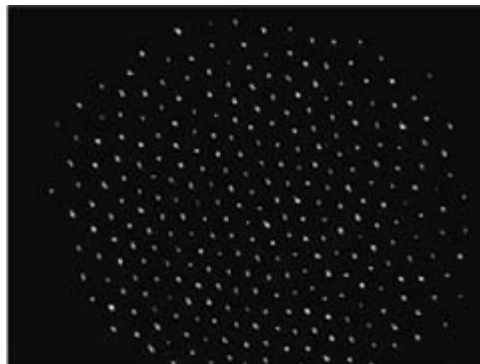


Рис. 1. Фотография горизонтального сечения середины плазменно-пылевой структуры

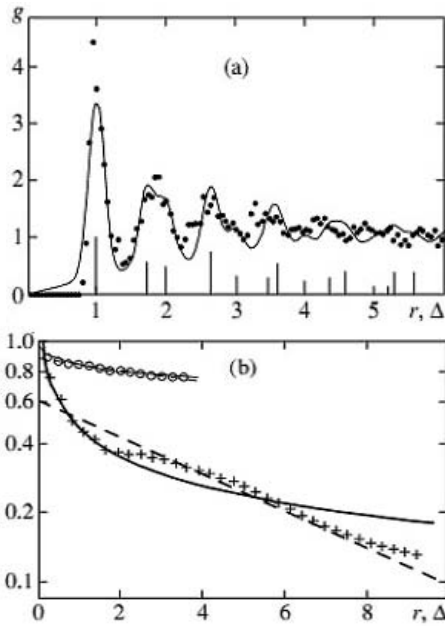


Рис. 2. (a) – парная корреляционная функция  $g(r)$ ; (b) – функция корреляции ориентации «связей»  $g_o(r)$ . «+» –  $g_o(r)$  для всей структуры, «o» –  $g_o(r)$  для домена с наибольшей упорядоченностью

Функции построены для сечения структуры, изображенной на рис. 1.

Для определения неоднородностей в сечении пылевого облака используют локальные трансляционный и ориентационный параметры [1]. На изображение сечения структуры накладывается карта значений параметров, на которой яркостью области обозначены значения этих параметров. Рис. 1–3 иллюстрируют применение нами корреляционных методов для определения состояния структуры по координатам частиц в двумерном горизонтальном сечении.

Светлые области – домены гексагональной упаковки.

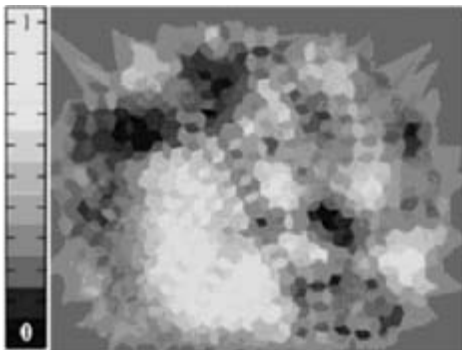


Рис. 3. Карта ориентационного корреляционного параметра  $g_o(0)$  для структуры, показанной на рис. 1

Для изучения структуры трехмерного объекта возможно обобщение применяемых в плоском случае приемов. В частности, в случае трансляционной автокорреляционной функции удастся сделать построение по прямой аналогии с плоским случаем.

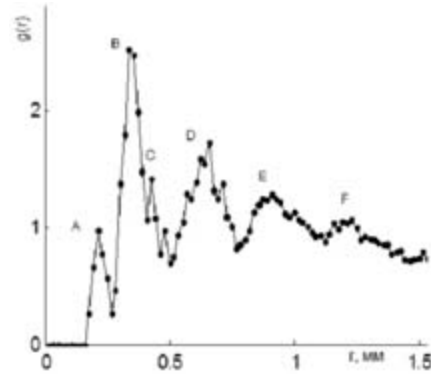


Рис. 4. Парная корреляционная функция для трехмерного объекта

Операция определения плотности частиц в кольце, описанном около выделенной частицы, в зависимости от радиуса кольца изменяется несущественно. Теперь около выделенной частицы описываются концентрические сферы. Определяется плотность попадающих в сферический слой частиц, и полученная зависимость плотности от радиуса усредняется по всем частицам структуры. Результатом этой операции становится трехмерная функция  $g(r)$  (рис. 4).

Для определения свойств структуры по полученной функции необходимо создать эталонную корреляционную функцию, построенную по модельной решетке с фиксированным типом упаковки частиц. Сравнение с такой функцией и даст возможность диагностики.

Для выстраивания модельной упаковки необходимо учесть основные параметры структуры. Их можно определить из имеющегося массива координат ее частиц. Это среднее межчастичное расстояние, наличие анизотропии и тому подобные основные особенности структуры.

Например, для многослойной структуры, полученной в разряде постоянного тока, среднее межчастичное расстояние в горизонтальном сечении составило 0,4 мм, а среднее расстояние между четко различаемыми слоями в структуре – 0,2 мм. С учетом этой анизотропии эталонная автокорреляционная функция для модельной структуры с гранецентрированным типом упаковки выглядит следующим образом (рис. 5).

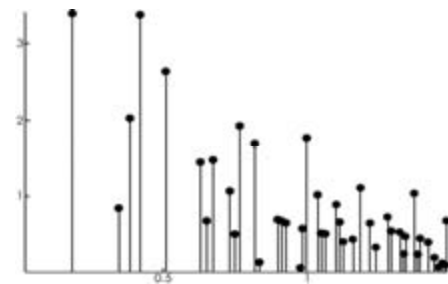


Рис. 5. Парная корреляционная функция для модельной гранецентрированной решетки, модифицированной с учетом анизотропии изучаемой структуры

Положения первых максимумов показанной на рисунке функции совпали с первыми максимумами функции  $g(r)$ , полученной из эксперимента. Однако наличие большого числа побочных максимумов затрудняет адекватное сравнение исходной функции с эталонной. В качестве решения этой проблемы предлагается создать разброс в положениях частиц модельной структуры. Максимумы эталонной функции становятся существенно более плавными, и их число уменьшается за счет слияния с соседними (рис. 6).

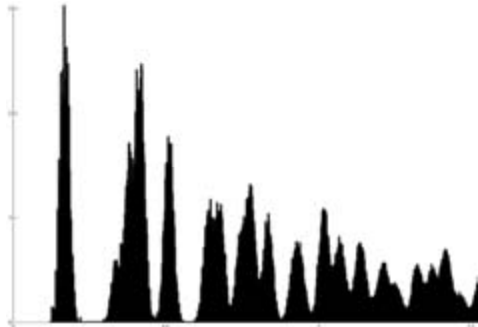


Рис. 6. Парная корреляционная функция для модельной структуры с добавлением разброса в положениях частиц

Величина разброса имеет нормальное распределение.

Этот метод позволяет классифицировать наблюдаемые на опыте трехмерные объекты как по степени упорядоченности, так и по типу упаковки в случае высокоупорядоченных структур (рис. 7).

Сравнение проводилось с гексагональной (а), с тетрагональной (модифицированной кубической) (b), с ромбической (модифицированной гранецентрированной fcc) (c) решетками. Наилучшее соответствие – на рис. 7с.

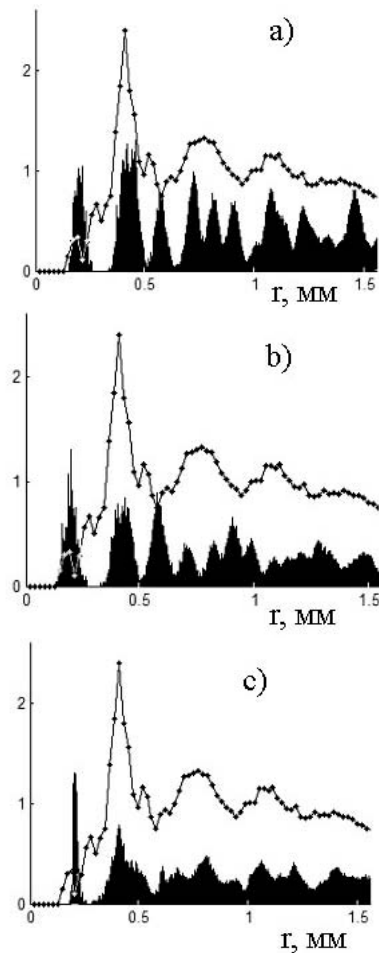


Рис. 7. Сравнение  $g(r)$  высокоупорядоченной структуры с анизотропными функциями  $g(r)$  модельных решеток, координаты которых возмущены случайной величиной, распределенной по нормальному закону со средним отклонением в 3 % от величины межчастичного расстояния

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карасев В. Ю., Эйхвальд А. И., Дзлиева Е. С., Иванов А. Ю. Об упорядоченных пылевых структурах, формируемых в тлеющем разряде // ЖЭТФ. 2008. Т. 133. Вып. 2. С. 460–466.
2. Grier D. G., Murray Ch. A. The microscopic dynamics of freezing in supercooled colloidal fluids // J. Chem. Phys. 1994. Vol. 100. P. 9088–9095.
3. Nelson D. R. Phase Transitions and Critical Phenomena / Ed. by C. Domb and J. L. Leibowitz. London: Academic Press, 1983. Vol. 7. P. 1–45.
4. Quinn R. A., Cui C., Goree J., Pieper J. B., Thomas H., Morfill G. E. Structural analysis of a Coulomb Lattice in a dusty plasma // Phys. Rev. E. 1996. Vol. 53. № 2. P. R2049–R2052.

УДК 537.533.9: 537.525.5: 533.9.07

**СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ ГРИГОРЬЕВ**

научный сотрудник Института сильноточной электроники  
Сибирского отделения РАН  
*grigoriev@opee.hcei.tsc.ru*

**ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ ДЕВЯТКОВ**

научный сотрудник Института сильноточной электроники  
Сибирского отделения РАН  
*vlad@opee.hcei.tsc.ru*

**ВЛАДИМИР ВИКТОРОВИЧ ДЕНИСОВ**

инженер Института сильноточной электроники Сибирского  
отделения РАН  
*volodyadenisov@yandex.ru*

**НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ КОВАЛЬ**

доктор технических наук, заведующий лабораторией  
плазменной эмиссионной электроники Института сильно-  
точной электроники Сибирского отделения РАН  
*koval@opee.hcei.tsc.ru*

**ИЛЬЯ ВИКТОРОВИЧ ЛОПАТИН**

младший научный сотрудник Института сильноточной  
электроники Сибирского отделения РАН  
*lopatin@opee.hcei.tsc.ru*

**ВЛАДИМИР ВИКТОРОВИЧ ШУГУРОВ**

младший научный сотрудник Института сильноточной  
электроники Сибирского отделения РАН  
*shugurov@opee.hcei.tsc.ru*

**ВЛАДИСЛАВ ВИКТОРОВИЧ ЯКОВЛЕВ**

инженер Института сильноточной электроники Сибирского  
отделения РАН  
*vlad000@rambler.ru*

## **ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ НАНОСТРУКТУРНЫХ СЛОЕВ И ПОКРЫТИЙ**

В статье представлены вакуумные ионно-плазменные и электронно-лучевые установки для модификации поверхности материалов и изделий, разработанные в Институте сильноточной электроники Сибирского отделения РАН. Они позволяют проводить ионно-плазменную очистку и активацию поверхности изделий и ее азотирование с последующим нанесением сверхпрочных наноструктурных покрытий либо электронно-лучевую обработку поверхности с ее оплавлением, изменяющую ее фазовый состав (вплоть до наноструктурирования), шероховатости и твердости.

Ключевые слова: плазма, электроразрядное оборудование, ионно-плазменные технологии, азотирование, осаждение покрытий, электронный пучок, модификация поверхности

Ионно-плазменная обработка материалов и изделий, в том числе очистка и активация поверхности, создание поверхностных слоев с измененным химическим и фазовым составом, увеличенной твердостью и коррозионной стойкостью, напыление различных функциональных покрытий, получила широкое распространение в науке и промышленности.

К распространенным методам модификации поверхности можно отнести ионное травление и активацию, ионно-плазменное азотирование, электродуговое либо магнетронное напыление покрытий. Комбинирование вышеупомянутых методов модификации поверхности позволяет существенно улучшить потребительские свойства обрабатываемых изделий и оптимизировать те или иные харак-

теристики модифицированных поверхностей для конкретных конечных требований.

С целью комбинирования различных методов ионно-плазменной обработки в едином технологическом цикле в Институте сильноточной электроники СО РАН (ИСЭ СО РАН) были созданы специализированные технологические установки «ДУЭТ», «ТРИО» и «КВАДРО» [4], [6], [7]. В данной работе представлены описание этих установок и примеры реализации технологических процессов с их использованием. В описываемых установках возможна реализация в едином технологическом цикле последовательно нескольких различных операций обработки материалов и изделий. К этим операциям относятся: предварительный нагрев и обезгаживание, ионная очистка,

травление и активация поверхности изделий дуговой плазмой; химико-термическая обработка (азотирование) для формирования на поверхности обрабатываемого изделия диффузионного слоя с использованием плазмы несамостоятельного дугового разряда низкого давления; нанесение электродуговым плазменно-ассистированным методом однослойных и многослойных сверхтвердых ( $> 40$  ГПа) нанокристаллических покрытий на основе чистых металлов или их соединений (нитридов, карбонитридов, карбидов). Для этого установки оснащены генераторами газовой и металлической плазмы. Кроме того, в данной статье описана установка электронно-лучевой обработки поверхности изделий «СОЛО», на которой реализованы процессы электронно-пучковой полировки поверхности металлов и сплавов и процессы сверхбыстрой заковки поверхности изделий, приводящие к наноструктуризации поверхностного слоя.

## 1. КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ СВЕРХТВЕРДЫХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ

1.1. Автоматизированные установки для получения сверхтвердых наноструктурированных покрытий комбинированным методом азотирования и плазмоассистированного вакуумно-дугового напыления

Установки «ДУЭТ», «ТРИО», «КВАДРО» являются линейкой развития оборудования для реализации комплексного метода ионно-плазменной обработки поверхности материалов и изделий. Комплексный метод обработки, реализованный в данных установках, включает в себя плазменное азотирование и плазмоассистированное вакуумно-дуговое нанесение твердых и сверхтвердых ( $> 40$  ГПа) покрытий. В процессе создания данных установок последовательно улучшались параметры плазмогенераторов, источников питания разрядов и системы автоматизации работы установки.

Основное назначение описываемых установок – упрочнение режущего инструмента из быстрорежущей стали и твердых сплавов штамповой оснастки, пресс-форм и других деталей машин и механизмов путем вакуумного ионно-плазменного азотирования в плазме несамостоятельного дугового разряда и нанесения на их поверхность металлических и композиционных покрытий методом электродугового плазменно-ассистированного напыления сверхтвердых наноструктурированных слоев.

### 1.1.1. Описание установки для комплексной ионно-плазменной обработки поверхности деталей и изделий «ДУЭТ»

Установка оборудована двумя плазменными источниками: плазменным источником с накаливаемым катодом ПИНК [2] для генерации объемной газоразрядной дуговой плазмы и дуговым

катодным распылителем для осаждения комплексных покрытий типа TiN. Плазмогенераторы могут работать как в независимом режиме, так и совместно – дуэтом. Установка включает в себя рабочую вакуумную камеру, вакуумную систему, систему газового питания, систему водяного охлаждения, систему электропитания и систему управления с элементами автоматизации. Общий вид установки показан на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид установки «ДУЭТ»

Функционально управление установкой разделено на два модуля: технологический и вакуумный.

Автоматизированная система управления установки, обеспечивающая безопасность работы и позволяющая автоматизировать процесс вакуумной откачки, конструктивно выполнена в виде отдельной стойки и состоит из двух контроллеров, каждый из которых отвечает за работу своего модуля: технологического и вакуумного. Контроллеры в соответствии с вшитыми в них алгоритмами преобразуют команды, получаемые с панелей управления, в рабочие импульсы аналоговых и дискретных выходов и контролируют их прохождение.

Рабочая камера, изготовленная из нержавеющей стали и имеющая внутренние размеры  $750 \times 750 \times 750$  мм, автоматически откачивается турбомолекулярным насосом со скоростью откачки  $1000$  л/с до давления  $10^{-3}$  Па. Плазмогенератор ПИНК расположен на верхнем фланце камеры, а катодный дуговой испаритель – на боковом. Стенки камеры, вал манипулятора и корпуса плазмогенераторов оборудованы водяными системами охлаждения, подача воды в которые контролируется автоматизированной системой управления. Система вакуумных клапанов работает от сжатого воздуха, а цикл откачки полностью автоматизирован. Отрицательное электрическое смещение на обрабатываемые детали и изделия прикладывается либо от низковольтного (до  $-300$  В), либо от высоковольтного (до  $-1500$  В) источников питания с непрерывной регулировкой, оборудованных системой подавления дуг, предотвращающей длительное существование микродуг на поверхности обрабаты-

ваемых изделий. Управление этими источниками питания производится вручную. Источник питания плазмогенератора ПИНК снабжен защитной системой, препятствующей переходу разряда в режим горения с катодным пятном. Рабочие газы подаются на установку посредством двухканальной автоматизированной системы СНА-2. Для работы главным образом используются два вида газа – аргон и азот. Контроль и индикация давления в вакуумной системе осуществлены с использованием цифровых вакуумметров, разработанных в ИСЭ СО РАН.

С внутренней стороны рабочей камеры на вращающемся валу крепится стол, на который устанавливаются напыляемые инструменты. Стол имеет 12 позиций, в каждую позицию устанавливается по одному инструменту или кассета с инструментами. Вращение вала с закрепленным на нем столом обеспечивает вращение каждого инструмента или кассеты вокруг своей оси и вращение вокруг оси стола. В центре стола имеется гнездо для установки инструмента или кассеты в центре камеры. Установка «ДУЭТ» используется для отработки новых режимов электродугового плазмоассистированного напыления функциональных покрытий с использованием многокомпонентных катодов.

### 1.1.2. Описание установки для комплексной ионно-плазменной обработки поверхности деталей и изделий «ТРИО»

В состав установки «ТРИО» входят: газоразрядный источник ПИНК, обеспечивающий ток несамостоятельной дуги до 250 А без катодного пятна, этот источник предназначен для нагрева, очистки и активации поверхности изделия, а также плазменного ассистирования при напылении функциональных покрытий; два дуговых испарителя с током до 150 А, которые служат для распыления материала катода и нанесения функциональных покрытий. Плазмогенераторы могут работать как в независимом режиме, так и совместно. Установка включает рабочую вакуумную камеру, вакуумную систему, систему газового питания, систему водяного охлаждения, систему электропитания и автоматическую систему управления.

Главным исполнительным устройством схемы автоматического управления является промышленный контроллер ADAM-5000. Управление компонентами системы осуществляется как дискретными, так и аналоговыми сигналами.

Общий вид и меню управления технологическим процессом установки приведены на рис. 2.

Водоохлаждаемая вакуумная камера установки выполнена в форме горизонтального цилиндрического сосуда диаметром 500 мм и длиной 500 мм с двумя боковыми технологическими дверцами. На боковых дверцах, а также на верхней части камеры имеются фланцы для установки источников плазмы. На нижней плоскости корпуса камеры имеется фланец для установки механизма вращения манипулятора.

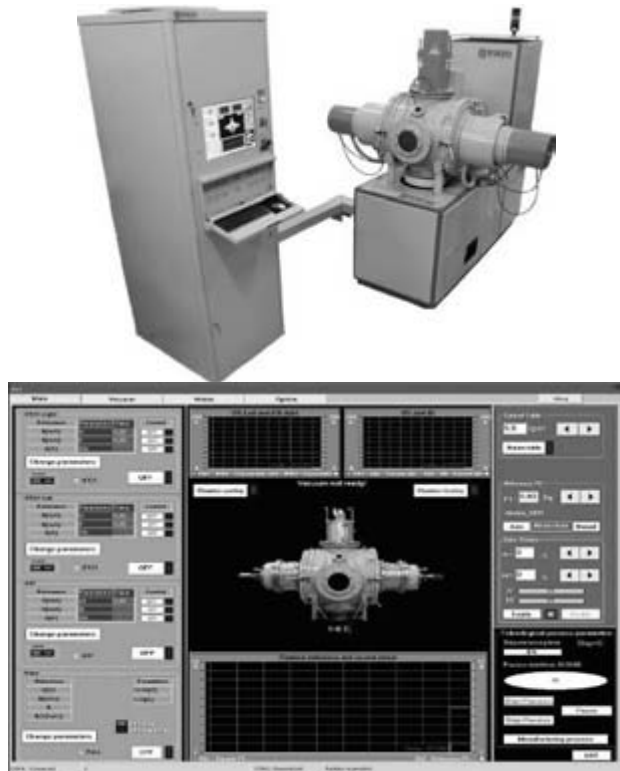


Рис. 2. Общий вид и меню управления технологическим процессом комплексной вакуумной ионно-плазменной установки «ТРИО»

Вакуумная камера откачивается посредством двух пластинчато-роторных насосов со скоростью откачки 11 л/мин и турбомолекулярного насоса со скоростью откачки 500 л/мин.

Коммутирующие элементы вакуумной системы имеют электромагнитное управление, а затвор – электромеханический привод. В качестве высоковакуумного датчика в камере используется цифровой вакуумметр на основе вакуумной лампы ПМИ-51; форвакуум в камере, в турбомолекулярном насосе и в вакуумной магистрали измеряется тремя цифровыми вакуумметрами на основе вакуумной лампы ПМТ-2.

Система напуска газа состоит из автоматических натекаателей со встроенными электронными блоками управления. Напуск газов осуществляется в требуемых пропорциях при заранее заданном давлении. Максимальное время выхода на режим составляет 10 с. В качестве рабочих газов могут использоваться азот, аргон либо другие газы в зависимости от требуемой обработки. Газы могут подаваться в камеру по одному или в заданной пропорции.

Источник отрицательного электрического смещения на обрабатываемые изделия представляет собой управляемый источник постоянного напряжения, коммутируемый к нагрузке через высокочастотный управляемый ключ. Источник отрицательного электрического смещения позволяет изменять напряжение смещения (0–1000 В), частоту следования импульсов (2–40 кГц) и ко-



эффицент заполнения импульсов (10–90 %), обеспечивая средний ток до 10 А. Источники питания разрядов являются инверторными с функцией стабилизации тока и автоматизированным управлением по цифровому интерфейсу.

Система автоматического управления установки «ТРИО» предусматривает алгоритмы автоматической откачки (с возможностью ручного управления). Предусмотрены защиты по давлению, охлаждению, а также по последовательности коммутации исполнительных устройств, при этом есть два уровня защит: программный и аппаратный.

Управление технологическими процессами может осуществляться как в ручном, так и в автоматическом режиме с возможностью установки параметров каждого технологического источника отдельно. Изменение во времени всех основных параметров фиксируется и выводится в главном окне программного интерфейса, а также протоколируется.

Установка «ТРИО» используется для обработки малых партий промышленных деталей и изделий, в частности инструмента.

### 1.1.3. Описание установки для комплексной ионно-плазменной обработки поверхности деталей и изделий «КВАДРО»

В состав установки «КВАДРО» входят газоразрядный источник ПИНК, обеспечивающий ток несамостоятельной дуги до 250 А без катодного пятна, газоразрядный источник ПИХПК (плазменный источник с холодным полым катодом) [1], обеспечивающий ток дуги с катодным пятном до 250 А. Оба источника предназначены для нагрева, очистки и активации поверхности изделия, а также плазменного ассистирования при напылении функциональных покрытий. При этом ПИНК предназначен для работы с инертными газами и азотом, а ПИХПК – для работы с активными газами – кислородом и углеводородами. Два дуговых испарителя с током до 200 А служат для распыления материала катода и нанесения функциональных покрытий. Плазмогенераторы могут работать как в независимом режиме, так и совместно. Установка включает рабочую вакуумную камеру, вакуумную систему, систему газового питания, систему водяного охлаждения, систему электропитания и автоматическую систему управления.

Общий вид установки приведен на рис. 3.

Главным исполнительным устройством схемы автоматического управления является промышленный контроллер ADAM-5000. Управление компонентами системы осуществляется как дискретными, так и аналоговыми сигналами.

На рис. 4 показано меню управления вакуумом и технологическим процессом.

Вакуумная камера выполнена в виде вертикального цилиндрического сосуда с боковым проемом, закрываемым дверцей. На верхней и боковых стенках камеры, а также на дверце имеются

фланцы для установки источников плазмы. На нижней плоскости корпуса имеется фланец для установки механизма вращения. Отверстия в боковых стенках камеры могут закрываться подвижными заслонками, предотвращающими нежелательное запыление внутренних полостей дуговых испарителей. Рабочая камера автоматически откачивается турбомолекулярным насосом со скоростью откачки 500 л/с до давления  $10^{-3}$  Па.



Рис. 3. Общий вид комплексной вакуумной ионно-плазменной установки «КВАДРО»

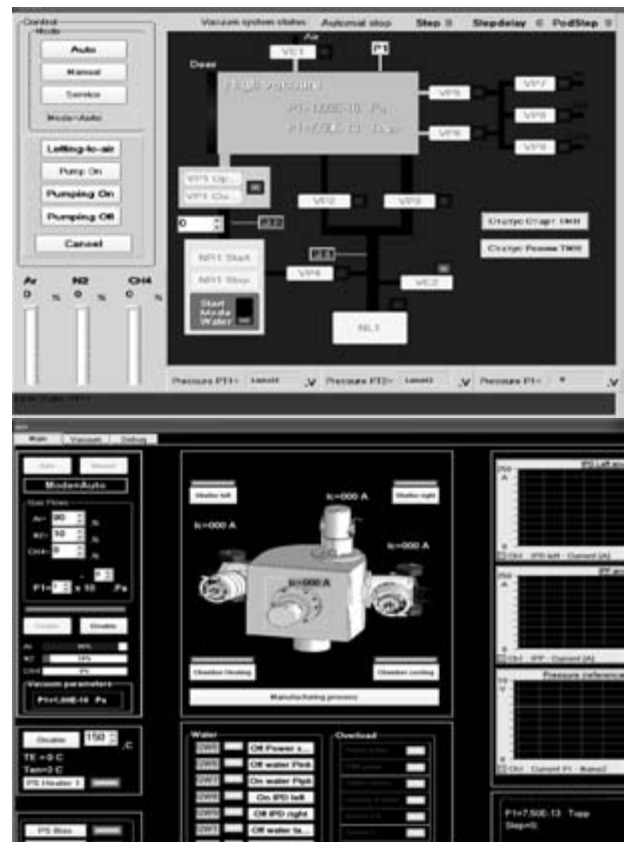


Рис. 4. Меню управления вакуумом и технологическим процессом

Плазмогенератор ПИНК расположен на верхнем фланце камеры, ПИХПК – на дверце камеры, дуговые испарители с системой фильтрации капель – на боковых фланцах. Стенки камеры, вал манипулятора и корпуса плазмогенераторов оборудованы водяными системами охлаждения, подача воды в которые контролируется автоматизированной системой управления. Система вакуумных клапанов работает от сжатого воздуха, а цикл откачки полностью автоматизирован. Отрицательное электрическое смещение на обрабатываемые детали и изделия прикладывается от блока смещения стола. Данный блок включает в себя инвертор электрического смещения ELB-10/900 и ключевой генератор паузы ELS-20/900 и позволяет регулировать амплитуду, частоту и коэффициент заполнения импульсов напряжения смещения на деталь. Кроме того, имеется возможность подачи постоянного смещения с функцией гашения микродуг. Источники питания разрядов являются инверторными с функцией стабилизации тока и автоматизированным управлением по цифровому интерфейсу. Газораспределение и стабилизация давления осуществляются автоматической системой, включающей распределительные клапаны и пьезоэлектрические регуляторы расхода газа. Газовое питание установки трехканальное, с возможностью установки процентного соотношения потоков газов. Контроль давления осуществляется широкодиапазонным активным вакуумметром WRG-S фирмы BOC EDWARDS.

Манипулятор установки «КВАДРО» аналогичен манипулятору установки «ДУЭТ».

Инфракрасный нагрев деталей осуществляется с помощью двух ТЭНов, установленных на днище вакуумной камеры вдоль задней стенки. Регулировка температуры ТЭНов осуществляется с помощью регулируемых твердотельных реле, а ее контроль – термопарой.

## 1.2. Типичные процессы и результаты применения комплексной ионно-плазменной обработки

На рис. 5 приведена типичная температурно-временная диаграмма процесса ионно-плазменной обработки, реализуемая на описанных установках. Буквами на рисунке обозначены характерные этапы технологического процесса. А – этап нагрева и очистки деталей; в этот момент включен генератор газовой плазмы и на образец подается отрицательное электрическое смещение, в качестве плазмообразующего газа используется инертный аргон, очистка и нагрев деталей производится ионами, извлеченными из объемной плазмы несамостоятельного дугового разряда, заполняющей рабочую камеру. Далее следует этап В – азотирование; в этот момент инертный газ аргон заменяется азотом, а ток разряда и напряжение смещения на детали подбираются таким образом, чтобы температура деталей держалась заданной. На этом этапе поддержание температуры и очистка поверхности изделий обеспечиваются ионами азота, бомбарди-

рующими обрабатываемую поверхность, при этом ионы и атомы азота диффундируют вглубь образца. Следующим этапом обработки является этап С – очистка поверхности от оксидов, карбидов и высших нитридов; на данном этапе азот заменяется аргоном, а ток разряда и напряжение смещения на деталь устанавливаются такими, чтобы обеспечить эффективную подготовку поверхности к напылению и изменить температуру детали для следующего этапа. Этап D – напыление наноструктурированного сверхтвердого покрытия. На этом этапе включаются генераторы металлической плазмы, генератор газовой плазмы не выключается и производит дополнительную ионизацию рабочего газа, осуществляя ионно-плазменное асистирующее процессу напыления покрытия; рабочий газ может выбираться как реактивным, так и активным, в зависимости от характера требуемого напыления. Токи разрядов плазмогенераторов, напряжение смещения на детали и давление могут задаваться различными в зависимости от требуемой температуры изделий и стехиометрического состава покрытия. После напыления следует этап E – охлаждение изделий в вакууме; данный этап требуется для предотвращения окисления поверхности обработанных изделий и растрескивания покрытия вследствие быстрого охлаждения на воздухе.

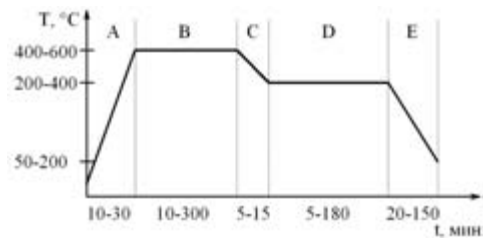


Рис. 5. Типовая температурно-временная диаграмма процесса обработки изделий

Температура и время процесса могут выбираться в зависимости от материала, из которого изготовлено изделие, требований к поверхности изделий и их массы.

В результате описываемой ионно-плазменной обработки достигается микротвердость поверхности до 20–45 ГПа (рис. 6) при глубине обработки 50–500 мкм. Износостойкость поверхности увеличивается в 2–3 раза.

## 2. МЕТОД ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ

### 2.1. Автоматизированная установка для поверхностной обработки металлических и металлокерамических материалов импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности

Данная установка продолжает серию оборудования поверхностной обработки изделий с помощью электронного пучка [2], [3], [6]. Установка

предназначена для обработки поверхности металлических и металлокерамических изделий интенсивным импульсным низкоэнергетическим пучком субмиллисекундной длительности. При создании данной установки были улучшены параметры электронного источника, разработан сканирующий двухкоординатный манипулятор для увеличения площади, обрабатываемой электронным пучком, и реализована работа всех узлов и устройств установки под управлением персонального компьютера с возможностью программного задания и контроля параметров электронного пучка и проведения с его помощью обработки по заранее составленной программе.

Ионно-плазменной обработке по такой технологии подвергаются режущий инструмент, элементы конструкций машин и механизмов (рис. 7).

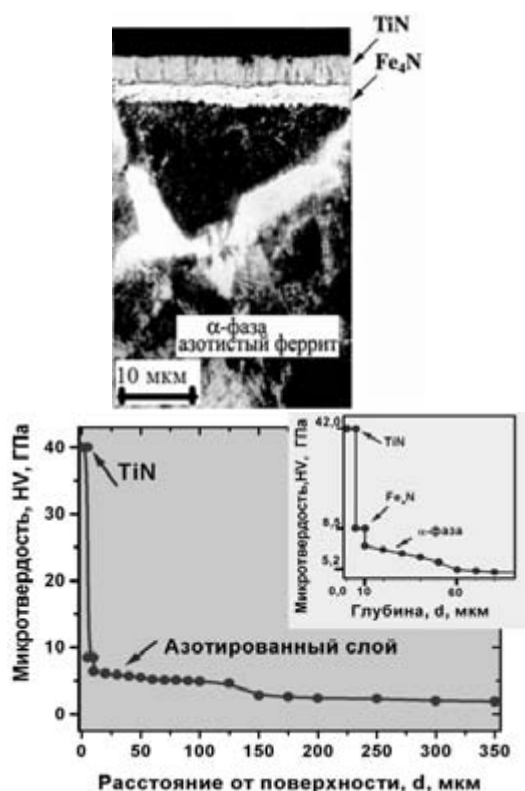


Рис. 6. Фотография микрошлифа стали-4140 и распределение твердости по глубине образца



Рис. 7. Фотографии изделий, обработанных по комбинированной технологии (верхний ряд) и азотированных (нижний ряд)

В состав представляемой установки входят: импульсный электронный источник на основе плазменного катода с сеточной стабилизацией плазменной границы, вакуумная камера прямоугольной формы со смотровым окном и двухкоординатным столом-манипулятором, блоки питания электронного источника, система управления установкой на основе персонального компьютера и работающих под его управлением блоков на основе микроконтроллеров, система газового питания, система диагностики параметров электронного источника и электронного пучка.

Общий вид установки приведен на рис. 8.



Рис. 8. Общий вид установки для импульсной поверхностной модификации электронным пучком и окон управляющей программы

Конструктивно установка состоит из трех модулей:

1. Стойка управления и контроля, включающая в себя управляющий компьютер (ПК), контроллеры вакуумной системы, системы газового питания и контроллеры манипулятора. Работа с управляющей программой ПК возможна как с помощью клавиатуры и манипулятора мышь, так и с использованием сенсорного экрана при нажатии на соответствующие элементы установки, отображаемые на экране монитора.

2. Блок, включающий в себя вакуумную камеру с системой вакуумной откачки и манипулятором, электронный источник, вертикально установленный на верхней стенке камеры, и накопительные емкости высоковольтного источника ускоряющего напряжения.

3. Стойка с блоками питания (БП) импульсного электронного источника. Управление БП возможно как в автономном режиме (с панели контроллера БП), так и под управлением ПК.

Вакуумная камера откачивается посредством пластинчато-роторного насоса со скоростью откачки 5 л/с и турбомолекулярного насоса со скоростью откачки 500 л/с. Использование турбомолекулярного насоса позволяет стабилизировать скорость откачки системы и значительно снизить поступление паров масла в рабочий объем камеры, что необходимо для устойчивой работы электронного источника. Для контроля за вакуумом в уста-

новке используются цифровые вакуумметры на основе термопарных вакуумных преобразователей ПМТ-2 (вакуумметр АТВ-2.1) и ионизационных ПМИ-51 (АИВ-51.1), включенные в состав системы управления. Для обеспечения напуска рабочего газа (Ar) и регулировки его давления используется газовый нагнетатель типа РРГ-10. В камере установлен манипулятор, обеспечивающий перемещение обрабатываемых деталей с общим весом до 25 кг по двум координатам. Перемещение стола манипулятора, имеющего отверстия для закрепления обрабатываемых деталей, производится с помощью двух шаговых двигателей, вынесенных за пределы вакуумной камеры.

Работая на частоте 10–20 Гц, электронный источник, имея в этом режиме среднюю мощность до 5–8 кВт, способен кроме импульсной обработки поверхности проводить предварительный объемный нагрев деталей, что позволяет повысить качество поверхностной обработки для ряда обрабатываемых материалов. Обработка в этом случае проводится в два этапа. На первом этапе производится нагрев детали импульсами тока малой амплитуды с высокой частотой повторения. На втором этапе используется большой ток пучка, достаточный для модификации поверхности за один или несколько импульсов. Для предотвращения перегрева стола манипулятора предусмотрено его водяное охлаждение.

На рис. 9 представлена блок-схема установки.

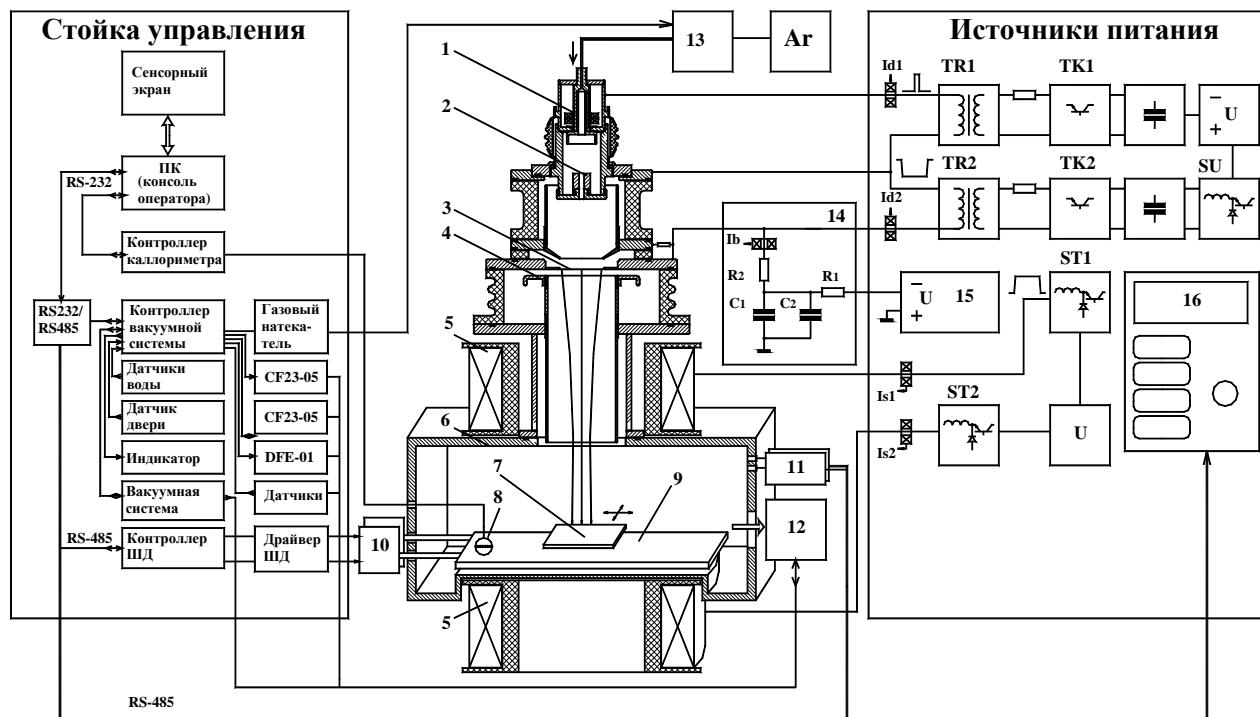


Рис. 9. Блок-схема установки

Генерация импульсного электронного пучка производится в плазмонаполненном диоде с транспортирующим магнитным полем на основе вакуумной дуги низкого давления, зажигаемой между электродами 2, 3 с помощью инициирующего разряда, предварительно созданного между электродами 1, 2. Питание разрядов осуществляется от вторичных обмоток высоковольтных разделительных трансформаторов TR1, TR2. Регулировка длительности основного разряда и, соответственно, длительности импульса электронного пучка производится с помощью транзисторных ключей ТК1, ТК2. Источники питания ST1, ST2, выполненные как управляемые стабилизаторы тока, служат для формирования импульсного магнитного поля. Электроны, извлекаемые через ячейки сетки электрода 3, проходя в трубе дрейфа 4 в транспортирующем магнитном поле (0.03–0.05 Тл), создаваемом соленоидом 5, попадают в вакуумную камеру 6 и на обрабатываемые детали 7. Детали крепятся на столе манипулятора 9 и могут перемещаться при помощи двух шаговых двигателей 10. Питание ускоряющего промежутка электронного источника осуществляется от высоковольтных накопительных емкостей (блок конденсаторов 14), заряжаемых от источника постоянного напряжения 15. Работа всех источников питания электронной пушки производится под управлением контроллера 16, позволяющего работать с электронным источником как автономно (работа в этом случае проводится с использованием клавиатуры и LCD-индикатора контроллера), так и в составе системы управления на базе управляющего компьютера (PC). Откачка рабочей камеры производится вакуумной системой 12. Контроль за давлением в элементах вакуумной системы осуществляется с помощью цифровых вакуумметров 11. Напуск рабочего газа (Ar) и регулировка давления в рабочей камере в рабочем режиме производятся с помощью газового натекателя 13.

В состав установки входят также аппаратно-программные средства контроля за работой электронного источника и средства диагностики электронного пучка. Измерение импульсных токов в цепях электронного источника производится с помощью поясов Роговского Id1, Id2, сигналы с которых могут регистрироваться как с помощью дополнительного внешнего осциллографа, так и с помощью встроенных средств измерений (осциллографической USB-приставки к ПК) с отображением осциллограмм на экране монитора системы управления. В этом случае осциллограммы токов в цепях электронного источника отображаются в специальном окне программы виртуального осциллографа. Датчики Is1, Is2 (на основе эффекта Холла) позволяют при необходимости контролировать токи в катушках соленоидов. Параметры электронного пучка в области воздействия им на обрабатываемые изделия могут быть измерены калориметрическим методом. Для проведе-

ния подобных измерений в составе установки используется многоканальный калориметр, с помощью которого можно измерять плотность энергии электронного пучка, полную энергию электронного пучка за один импульс и оценивать распределение энергии по сечению пучка. Датчик калориметра 8, представляющий собой набор цилиндров Фарадея с закрепленными на них термисторами, подключается к контроллеру калориметра, работающему под управлением специальной программы на управляющем компьютере. Измерение энергии пучка производится путем сравнения температуры цилиндров Фарадея с помощью термисторов до и после воздействия на них импульса тока электронного пучка.

Система управления на основе управляющего компьютера обеспечивает автоматическую откачку вакуумной системы и предотвращает возникновение аварийных ситуаций, в том числе блокирует ошибочные действия оператора. Текущее состояние установки отображается на трехцветном световом индикаторе, расположенном над ней. При использовании источников бесперебойного питания выполняется безопасное отключение установки, в том числе производится автоматическое закрытие вакуумного затвора с механическим приводом, питание двигателя которого осуществляется от частотного преобразователя DFE-01. Также производится безаварийное отключение турбомолекулярного насоса, запитанного от частотных преобразователей CF23-05. В рабочем режиме программное обеспечение PC обеспечивает установление заданного рабочего давления, задание режимов работы электронного источника и управление движением стола манипулятора по заданной программе. Важной особенностью программы управления манипулятором является то, что кроме ручного управления движением стола манипулятора реализован и программный режим. В этом случае будет выполняться набор команд, задаваемых в специальном окне редактора. Программа управления может содержать не только команды управления манипулятором, но и команды управления электронным источником. Программа обработки конкретного изделия может быть сохранена в отдельном файле на PC и впоследствии многократно использоваться для обработки подобных изделий в автоматическом режиме.

Таким образом, созданная автоматизированная установка для модификации поверхности металлических и металлокерамических материалов и изделий с помощью интенсивного импульсного субмиллисекундного электронного пучка обеспечивает современный уровень сервиса и безопасную работу. Автоматизация процесса обработки позволяет улучшить степень воспроизводимости результатов импульсной электронно-лучевой обработки поверхности материалов и изделий, а наличие средств диагностики электронного пучка и оперативное управление его параметрами позволяют проводить выбор и оптимизацию режи-

мов электронно-пучковой обработки для широкого круга материалов и изделий.

## 2.2. Применение низкоэнергетичных импульсных электронных пучков

Электронный пучок, попадая на обрабатываемую поверхность, производит сверхбыстрый нагрев (в течение импульса) до температуры плавления материала подложки. Затем происходит быстрое охлаждение за счет отвода тепла в более глубокие холодные слои подложки. В результате

сверхбыстрой закалки в приповерхностном слое толщиной от нескольких единиц до нескольких десятков микрон формируется улучшенная структура обрабатываемого материала. Очищается поверхность, отжигаются легкоплавкие примеси, в сталях формируется закалочная структура, повышается твердость поверхности. Кроме того, в жидкой фазе в вакууме за счет сил поверхностного натяжения происходит выравнивание рельефа поверхности (полировка). Примеры использования электронного пучка приведены на рис. 10 и 11.

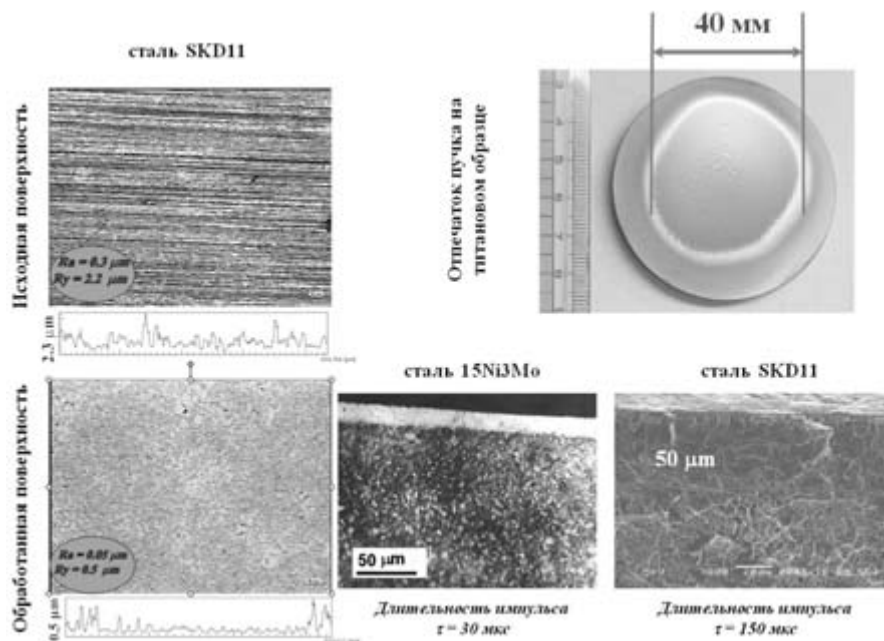


Рис. 10. Поверхность стали SKD11 до и после электронно-пучковой обработки, автограф электронного пучка  $\varnothing 40$  мм на титане, поперечные шлифы стали 15 Ni3Mo и SKD11 после обработки электронным пучком

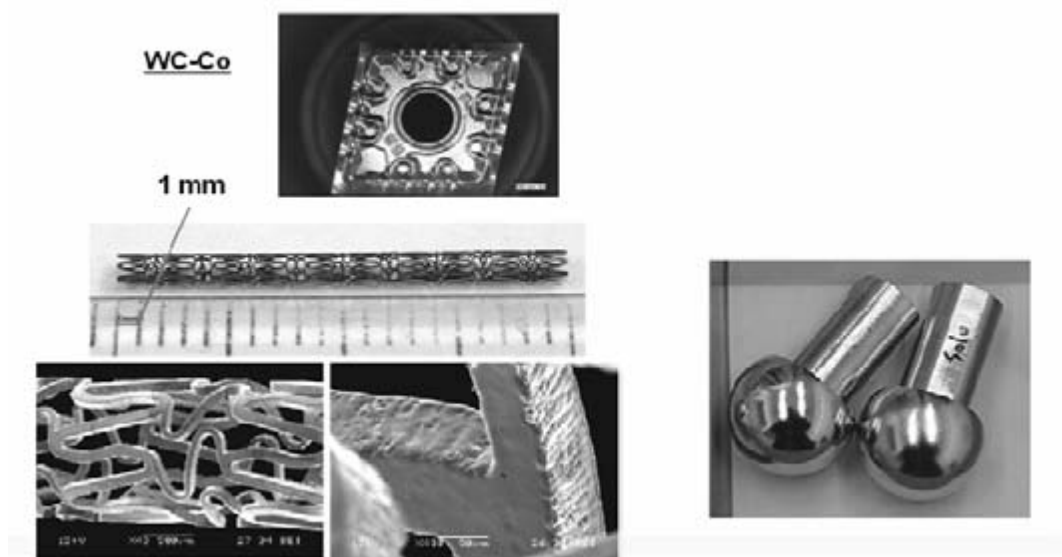


Рис. 11. Примеры использования электронно-пучковой обработки поверхности штампов из WC-Co-сплава, стентов и искусственных суставов

Установка может применяться для электронно-пучковой полировки поверхности металлических и металлокерамических изделий, импульсной закалки поверхности из расплавленного состояния, кондиционирования поверхности путем удаления легкоплавких компонентов и других

процессов, требующих концентрированных потоков энергии в виде импульсного электронного пучка. При оптимизации режимов импульсной электронно-пучковой обработки реализуются процессы наноструктуризации поверхностного слоя материалов и изделий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Винтизенко Л. Г., Григорьев С. В., Коваль Н. Н. и др. Дуговые разряды низкого давления с полым катодом и их применение в генераторах плазмы и источниках заряженных частиц // Известия вузов. Физика. 2001. № 9. С. 28–35.
2. Коваль Н. Н., Сочугов Н. С., Девятков В. Н., Григорьев С. В., Арсланов И. Р., Миков А. В., Подковыров В. Г., Уемура К. Автоматизированный энергокомплекс для импульсной поверхностной обработки материалов электронным пучком // Известия вузов. Физика. 2006. № 8, приложение. С. 51–54.
3. Коваль Н. Н., Щанин П. М., Девятков В. Н., Толкачев В. С., Винтизенко Л. Г. Установка для обработки поверхности металлов электронным пучком // Приборы и техника эксперимента. 2005. № 1. С. 135–140.
4. Denisov V. V., Koval N. N., Lobach M. I., Mikov A. V., Shugurov V. V., Yakovlev V. V. Automated Vacuum Ion-Plasma Setup «TRIO» for Making Nanostructure Coatings // Proc. 9th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows, Tomsk, Russia, September 21–26, 2008. P. 31–34.
5. Koval N. N., Schanin P. M., Devjatkov V. N., Tolkachev V. S., Vintizenko L. G. Modification of the structure and phase composition of structural steel by a microsecond e-beam // Proc. 7<sup>th</sup> International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. 2004. P. 43–46.
6. Lopatin I. V., Akhmadeev Yu. Kh., Denisov V. V., Koval N. N., Mikov A. V., Yakovlev V. V., Seredinin A. Vacuum ion-plasma setup «QUADRO» for complex treating of materials and tools // Известия вузов. Физика. 2007. № 9, приложение. С. 98–101.
7. Schanin P. M., Koval N. N., Lopatin I. V., Goncharenko I. M., Grigoriev S. V., Tolkachev V. S., Vintizenko L. G., Kiselev V. N., Uemura K. Vacuum ion-plasma installation «DUET» // Proc. 6th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows, September 23–28, 2002, Tomsk, Russia. P. 112–116.

УДК 533.9.01

**ИВАН НИКОЛАЕВИЧ ДЕРБЕНЕВ**

аспирант Троицкого института инновационных и термоядерных исследований (г. Троицк, Московская область)  
*ivan\_derbenev@mail.ru*

**АНАТОЛИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ ФИЛИППОВ**

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Троицкого института инновационных и термоядерных исследований (г. Троицк, Московская область)  
*fav@triniti.ru*

### ЭКРАНИРОВАНИЕ ЗАРЯДА МАКРОЧАСТИЦЫ В НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЕ С УЧЕТОМ КОНВЕРСИИ ИОНОВ

Изучено влияние процесса конверсии ионов на характер экранирования заряда пылевой частицы или зонда в плазме с внешним источником ионизации газа. Установлено, что конверсия приводит к трехкомпонентному составу плазмы и вызывает изменение характера экранирования заряда пылевой частицы. Показано, что распределение потенциала вокруг пылевой частицы в этом случае описывается суперпозицией трех потенциалов Дебая с разными постоянными экранирования.

Ключевые слова: плазма, неравновесная плазма, пылевая плазма, экранирование, конверсия, аргон

В настоящее время исследования пылевой плазмы находятся в фокусе внимания многих научных лабораторий ввиду широкой распространенности такой плазмы в природе и в плазменных приложениях [17], [18], [20]. Особый интерес представляет исследование характера экранирования электрического поля заряженных микро- и наночастиц в плазме, так как именно характером экранирования определяется как степень воздействия этих частиц на свойства плазмы, так и электростатический потенциал их взаимодействия друг с другом. Данная проблема имеет важное значение для развития теории зондовых измерений и теории пылевой или комплексной плазмы. Ранее в работах [15], [16], [22], [23] было показано, что экранирование заряда пылевой частицы в неравновесных условиях в плазме с одним доминирующим сортом ионов не описывается теорией Дебая – Хюккеля. Так, в двухкомпонентной плазме как с постоянным источником ионизации газа, так и с самостоятельной ионизацией газа, пропорциональ-

ной плотности электронов, экранирование в общем случае описывается двумя экспонентами с разными постоянными [15], [16], [22], [23].

В настоящей работе рассмотрена трехкомпонентная плазма с двумя сортами ионов аргона:  $\text{Ar}^+$  и  $\text{Ar}_2^+$ . Для аналитических и численных оценок так же, как и в работах [15], [16], [22], [23], выбрана модель точечного стока, учитывающая поглощение электронов и ионов частицей или зондом. Поскольку и здесь используется линеаризация исходных уравнений, модель применима лишь для случаев, допускающих такую линеаризацию. Эти исследования также важны для проблемы создания автономного источника электрической энергии с использованием радиоактивных частиц конденсированной дисперсной фазы микронных размеров [1], [12], [19]. Рабочей средой этого источника является пылевая плазма, в которой ионизация газа осуществляется частицами радиоактивного распада. Такая плазма по своим свойствам подобна плазме несамоостоятельного газового разряда в газах, со-



державших пылевые частицы, об исследованиях которого сообщалось в [13].

### 1. АСИМПТОТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ЭКРАНИРОВАНИЯ В ПЛАЗМЕ С ДВУМЯ СОРТАМИ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ ИОНОВ

Рассмотрим экранирование в плазме, создаваемой внешним источником ионизации газа при повышенных давлениях. В качестве примера в настоящей работе рассмотрена плазма аргона, в которой достаточно однородная ионизация газа осуществляется высокоэнергетическими электронами пучка. Основные процессы, влияющие на состав такой плазмы, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные процессы с участием электронов и ионов в плазме аргона с внешним источником ионизации газа

Процесс	Константа скорости	Использованное в настоящей работе значение константы	Источник
$\text{Ar} + e_b \rightarrow \text{Ar}^+ + e + e_b$	$Q_{\text{ion}}$	$10^{14} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$	[13]
$\text{Ar} + e \rightarrow \text{Ar}^+ + 2e$	$k_{\text{ion}}$	0	—
$\text{Ar}^+ + e \rightarrow \text{Ar} + h\nu$	$\beta_{\text{ph}}$	$2,7 \times 10^{-13} \text{ Т}_e^{-0,75} \text{ см}^3/\text{с}$	[9]
$\text{Ar}^+ + 2e \rightarrow \text{Ar} + e$	$\beta_3$	$8,75 \times 10^{-27} \text{ Т}_e^{-4,5} \text{ см}^6/\text{с}$	[9]
$\text{Ar}^+ + 2\text{Ar} \rightarrow \text{Ar}^2 + \text{Ar}$	$k_{3i}$	$3 \times 10^{-31} \text{ см}^6/\text{с}$	[2], [14]
$\text{Ar}^2 + e \rightarrow 2\text{Ar}$	$\beta_2$	$0,85 \times 10^{-6} (0,026/\text{Т}_e)^{0,67} \text{ см}^3/\text{с}$	[15]

$e_b$  – электроны пучка,  $e$  – плазменные электроны,  $\text{T}_e$  – температура электронов в эВ.

Для установления характера экранирования заряда макрочастиц в плазме с двумя сортами положительных ионов воспользуемся асимптотической теорией экранирования, развитой в работах [15], [16], [22], [23]. Поместим макрочастицу в центр сферической системы координат и положим, что макрочастица имеет сферически-симметричную форму. В дрейфово-диффузионном приближении уравнения, описывающие нестационарный процесс зарядки макрочастицы, имеют вид [7], [8]:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \text{div } \mathbf{j}_e = Q_{\text{ion}} + k_{\text{ion}} n_e n_{\text{Ar}} - (\beta_{\text{ph}} + \beta_3 n_e) n_e n_{i1} - \beta_2 n_e n_{i2}$$

$$\frac{\partial n_{i1}}{\partial t} + \text{div } \mathbf{j}_{i1} = Q_{\text{ion}} + k_{\text{ion}} n_e n_{\text{Ar}} - (\beta_{\text{ph}} + \beta_3 n_e) n_e n_{i1} - k_{3i} n_{i1} n_{\text{Ar}}^2 \quad (1)$$

$$\frac{\partial n_{i2}}{\partial t} + \text{div } \mathbf{j}_{i2} = k_{3i} n_{i1} n_{\text{Ar}}^2 - \beta_2 n_e n_{i2}$$

$$\Delta \phi = -4\pi e (n_{i1} + n_{i2} - n_e), \quad (2)$$

где

$$\mathbf{j}_e = k_e n_e \nabla \phi - D_e \nabla n_e,$$

$$\mathbf{j}_{i1} = -k_{i1} n_{i1} \nabla \phi - D_{i1} \nabla n_{i1}, \quad (3)$$

$$\mathbf{j}_{i2} = -k_{i2} n_{i2} \nabla \phi - D_{i2} \nabla n_{i2},$$

где  $k_\sigma$  и  $D_\sigma$  – подвижности и коэффициенты диффузии электронов ( $\sigma = e$ ), одноатомных ( $\sigma = i1$ ) и двухатомных ионов ( $\sigma = i2$ ), соответственно,  $Q_{\text{ion}}$  – интенсивность объемной ионизации внешним источником,  $\beta_1 = \beta_{\text{ph}} + \beta_3 n_e$  – суммарный коэффициент рекомбинации электронов и одноатомных ионов аргона,  $\beta_{\text{ph}}$  – коэффициент фоторекомбинации и  $\beta_3$  – коэффициент трехтельной электрон-ионной рекомбинации,  $\beta_2$  – коэффициент рекомбинации электронов и двухатомных ионов аргона,  $k_{3i}$  – константа скорости процесса конверсии одноатомных ионов аргона в двухатомные,  $\phi$  – потенциал самосогласованного поля,  $n_\sigma$  – концентрация плазменных частиц  $\sigma$ -сорта,  $n_{\text{Ar}}$  – концентрация атомов аргона. Отметим, что ионизацией собственными электронами плазмы в несамостоятельных разрядах можно пренебречь [10].

На систему (1) наложим следующие граничные условия [7], [8]:

$$n_e|_{r=r_0} = 0, \quad n_{i1}|_{r=r_0} = 0, \quad n_{i2}|_{r=r_0} = 0,$$

$$\partial \phi / \partial r|_{r=r_0} = -e q_{\text{int}} / r_0^2, \quad n_e|_{r=\infty} = n_{e0}, \quad (4)$$

$$n_{i1}|_{r=\infty} = n_{i10}, \quad n_{i2}|_{r=\infty} = n_{i20}, \quad \phi|_{r=\infty} = 0,$$

где  $r_0$  – радиус макрочастицы,  $n_{e0}$ ,  $n_{i10}$ ,  $n_{i20}$  – концентрация электронов и ионов в невозмущенной плазме,  $q_{\text{int}}$  – заряд макрочастицы, найденный интегрированием потоков на нее:

$$q_{\text{int}}(t) = 4\pi r_0^2 \int_0^t (j_e - j_{i1} - j_{i2})|_{r=r_0} dt. \quad (5)$$

Концентрация заряженных частиц в невозмущенной плазме определяется системой уравнений:

$$Q_{\text{ion}} + \nu_{\text{ion}} n_{e0} - (\beta_{\text{ph}} + \beta_3 n_{e0}) n_{e0} n_{i10} - \beta_2 n_{e0} n_{i20} = 0,$$

$$\nu_3 n_{i10} - \beta_2 n_{e0} n_{i20} = 0, \quad (6)$$

$$n_{e0} - n_{i10} - n_{i20} = 0,$$

где  $\nu_{\text{ion}} = k_{\text{ion}} n_{\text{Ar}}$ ,  $\nu_3 = k_{3i} n_{\text{Ar}}^2$ . Из последних двух уравнений находим:

$$n_{i10} = \frac{\beta_2 n_{e0}^2}{\beta_2 n_{e0} + \nu_3}, \quad n_{i20} = \frac{\nu_3 n_{e0}}{\beta_2 n_{e0} + \nu_3}. \quad (7)$$

Подставив эти решения в первое уравнение системы (6), для нахождения концентрации электронов получим алгебраическое уравнение 4-й степени:

$$\beta_2 \beta_3 n_{e0}^4 + \beta_{\text{ph}} \beta_2 n_{e0}^3 + \beta_2 (\nu_3 - \nu_{\text{ion}}) n_{e0}^2 - (\beta_2 Q_{\text{ion}} + \nu_{\text{ion}} \nu_3) n_{e0} - \nu_3 Q_{\text{ion}} = 0. \quad (8)$$

Согласно правилу знаков Декарта, это уравнение имеет единственное положительное решение. Этот вывод справедлив и в случае, когда трехтельной электрон-ионной рекомбинацией и/или фоторекомбинацией можно пренебречь (когда и  $\beta_3 = 0$ , и  $\beta_{\text{ph}} = 0$ , требование устойчивости плазмы приводит к неравенству  $\nu_3 > \nu_{\text{ion}}$ ).

В стационарном состоянии система уравнений (1) принимает вид:

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \mathbf{j}_e &= Q_{\text{ion}} + v_{\text{ion}} n_e - (\beta_{\text{ph}} + \beta_3 n_e) n_e n_{i1} - \beta_2 n_e n_{i2}, \\ \operatorname{div} \mathbf{j}_{i1} &= Q_{\text{ion}} + v_{\text{ion}} n_e - (\beta_{\text{ph}} + \beta_3 n_e) n_e n_{i1} - v_3 n_{i1}, \\ \operatorname{div} \mathbf{j}_{i2} &= v_3 n_{i1} - \beta_2 n_e n_{i2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Нас будет интересовать асимптотическое поведение эффективного потенциала на расстояниях  $r \gg r_0$ , когда все коэффициенты в (9) можно считать независимыми от координат [15], [16]. Так как эффективный потенциал является убывающим с расстоянием, начиная с некоторого радиуса  $R_l$  можно провести линеаризацию уравнений (9). Пусть выполнены соотношения Эйнштейна:

$$\frac{D_e}{k_e} = \frac{T_e}{e}, \quad \frac{D_{i1}}{k_{i1}} = \frac{T_{i1}}{e}, \quad \frac{D_{i2}}{k_{i2}} = \frac{T_{i2}}{e}, \quad (10)$$

здесь  $T_e$ ,  $T_{i1}$ ,  $T_{i2}$  – температура электронов и ионов в энергетических единицах (если соотношения Эйнштейна не выполняются, что обычно имеет место для электронов в разрядных условиях, то под температурой будем подразумевать характеристическую энергию  $eD_\sigma/k_\sigma$ ).

Линеаризуем систему, используя выражения для потоков в диффузионно-дрейфовом приближении (3) и соотношения Эйнштейна (10):

$$\begin{aligned} \frac{en_0}{T_e} \Delta \phi - \Delta u_e &= - \frac{(\beta_{\text{ph}} + 2\beta_3 n_{e0}) n_{i0} - v_{\text{ion}}}{D_e} u_e - \\ &- \frac{\beta_{\text{ph}} + \beta_3 n_{e0}}{D_e} n_{e0} u_1 - \frac{\beta_2}{D_e} (n_{e0} u_2 + n_{20} u_e) - \frac{S_e}{D_e} \delta(\mathbf{r}), \\ - \frac{en_{i0}}{T_{i1}} \Delta \phi - \Delta u_1 &= - \frac{(\beta_{\text{ph}} + 2\beta_3 n_{e0}) n_{i0} - v_{\text{ion}}}{D_{i1}} u_e - \\ &- \frac{\beta_{\text{ph}} + \beta_3 n_{e0}}{D_{i1}} n_{e0} u_1 - \frac{v_3}{D_{i1}} u_1 - \frac{S_{i1}}{D_{i1}} \delta(\mathbf{r}), \\ - \frac{en_{i2}}{T_{i2}} \Delta \phi - \Delta u_2 &= \frac{v_3}{D_{i2}} u_1 - \frac{\beta_2}{D_{i2}} (n_{e0} u_2 + n_{20} u_e) - \\ &- \frac{S_{i2}}{D_{i2}} \delta(\mathbf{r}), \\ \Delta \phi &= -4\pi e (u_1 + u_2 - u_e) - 4\pi e q \delta(\mathbf{r}), \end{aligned} \quad (11)$$

где  $u_\sigma = u_\sigma(r)$  – отклонения плотности частиц сорта  $\sigma$  от равновесных значений вследствие поглощения плазмы макрочастицей и воздействия ее электрического поля  $u_\sigma(r) = n_\sigma(r) - n_{0\sigma}$ . Для учета граничных условий на границе плазма – макрочастица здесь введены стоки электронов и ионов  $S_\sigma \delta(\mathbf{r})$ , а также заряд макрочастицы  $eq \delta(\mathbf{r})$ , где  $\delta(\mathbf{r})$  – дельта-функция. В стационарном состоянии сток электронов и суммарный сток ионов равны друг другу:

$$S_e = S_{i1} + S_{i2}, \quad (12)$$

но при зондовых измерениях они могут и не совпадать. Отметим, что введенные здесь заряд и стоки не равны истинным, а являются некими

эффективными величинами, значения которых в рамках развиваемой теории не могут быть найдены [15], [16]. Их можно найти, сопоставляя результаты теории с результатами численных расчетов, что будет сделано ниже. Отметим, что потоки частиц плазмы зависят от заряда макрочастицы, поэтому  $q$ ,  $S_e$ ,  $S_{i1}$  и  $S_{i2}$  не являются независимыми величинами.

Применив к уравнениям (11), (12) трехмерное интегральное преобразование Фурье

$$U_{\sigma \mathbf{k}} = \int u_\sigma(\mathbf{r}) \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) d\mathbf{r},$$

$$\Phi_{\mathbf{k}} = \int \phi(\mathbf{r}) \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) d\mathbf{r}$$

и проведя небольшие алгебраические преобразования, получим:

$$\begin{aligned} (k^2 + a_{11}) U_{e\mathbf{k}} + a_{12} U_{i1\mathbf{k}} + a_{13} U_{i2\mathbf{k}} &= b_1, \\ a_{21} U_{e\mathbf{k}} + (k^2 + a_{22}) U_{i1\mathbf{k}} + a_{23} U_{i2\mathbf{k}} &= b_2, \\ a_{31} U_{e\mathbf{k}} + a_{32} U_{i1\mathbf{k}} + (k^2 + a_{33}) U_{i2\mathbf{k}} &= b_3, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\Phi_{\mathbf{k}} = \frac{4\pi e}{k^2} (U_{i1\mathbf{k}} + U_{i2\mathbf{k}} - U_{e\mathbf{k}} + q). \quad (15)$$

Здесь введены обозначения:

$$k_{de}^2 = \frac{4\pi e^2 n_{e0}}{T_e}, \quad k_{d1}^2 = \frac{4\pi e^2 n_{i0}}{T_{i1}}, \quad k_{d2}^2 = \frac{4\pi e^2 n_{i2}}{T_{i2}};$$

$$a_{11} = k_{de}^2 + \frac{v_{im} + \beta_2 n_{20}}{D_e}, \quad a_{12} = -k_{de}^2 + \frac{\beta_1 n_{e0}}{D_e},$$

$$a_{13} = -k_{de}^2 + \frac{\beta_2 n_{e0}}{D_e}, \quad b_1 = k_{de}^2 q - \tilde{S}_e, \quad a_{21} = -k_{d1}^2 + \frac{v_{im}}{D_{i1}},$$

$$a_{22} = k_{d1}^2 + \frac{\beta_1 n_{e0} + v_3}{D_{i1}}, \quad a_{23} = k_{d1}^2, \quad b_2 = -k_{d1}^2 q - \tilde{S}_{i1},$$

$$a_{31} = -k_{d2}^2 + \frac{\beta_2 n_{20}}{D_{i2}}, \quad a_{32} = k_{d2}^2 - \frac{v_3}{D_{i2}},$$

$$a_{33} = k_{d2}^2 + \frac{\beta_2 n_{e0}}{D_{i2}}, \quad b_3 = -k_{d2}^2 q - \tilde{S}_{i2}, \quad \tilde{S}_e = S_e/D_e,$$

$$\tilde{S}_{i1} = S_{i1}/D_{i1}, \quad \tilde{S}_{i2} = S_{i2}/D_{i2}, \quad \beta_1 = \beta_{\text{ph}} + \beta_3 n_{e0},$$

$$v_{im} = (\beta_{\text{ph}} + 2\beta_3 n_{e0}) n_{i0} - v_{\text{ion}}.$$

Детерминант системы уравнений (14) определяется выражением:

$$D = k^6 + \alpha_1 k^4 + \alpha_2 k^2 + \alpha_3, \quad (16)$$

где

$$\alpha_1 = a_{11} + a_{22} + a_{33},$$

$$\alpha_2 = a_{11} a_{22} - a_{12} a_{21} + a_{11} a_{33} - a_{13} a_{31} + a_{22} a_{33} - a_{23} a_{32},$$

$$\alpha_3 = a_{11} a_{22} a_{33} - a_{11} a_{23} a_{32} + a_{12} a_{23} a_{31} - a_{12} a_{21} a_{33} + a_{13} a_{21} a_{32} - a_{13} a_{31} a_{22}.$$

Используя определения коэффициентов  $a_{ik}$  ( $i=1,3$ ;  $k=1,3$ ), найдем:

$$\alpha_1 = k_d^2 + \frac{n_{e0} + \beta_2 n_{20}}{D_e} + \frac{\beta_1 n_{e0} + v_3}{D_{i1}} + \frac{\beta_2 n_{e0}}{D_{i2}}, \quad (17)$$

$$\alpha_2 = k_{de}^2 \left[ \frac{\beta_1 n_{e0} + v_{im} + v_3}{D_{i1}} + \frac{\beta_2 (n_{e0} + n_{20})}{D_{i2}} \right] +$$

$$+ k_{d1}^2 \left[ \frac{\beta_1 n_{e0} + v_{im} + \beta_2 n_{20}}{D_e} + \frac{\beta_2 n_{e0} + v_3}{D_{i2}} \right] +$$

$$+ k_{d2}^2 \left[ \frac{v_{im} + \beta_2 (n_{e0} + n_{20})}{D_e} + \frac{\beta_1 n_{e0} + v_3}{D_{i1}} \right] + \quad (18)$$

$$+ \frac{\beta_1 \beta_2 n_{e0} n_{20} + v_3 (v_{im} + \beta_2 n_{20})}{D_e D_{i1}} +$$

$$+ \frac{v_{im} \beta_2 n_{e0}}{D_e D_{i2}} + \frac{\beta_2 n_{e0} (\beta_1 n_{e0} + v_3)}{D_{i1} D_{i2}},$$

$$\alpha_3 = [v_{im} (v_3 + \beta_2 n_{e0}) +$$

$$+ \beta_2 (n_{e0} + n_{20}) (v_3 + \beta_1 n_{e0})] \times$$

$$\times \left( \frac{k_{de}^2}{D_{i1} D_{i2}} + \frac{k_{d1}^2}{D_e D_{i2}} + \frac{k_{d2}^2}{D_e D_{i1}} \right). \quad (19)$$

Так как  $v_{im} \geq 0$ , отсюда видно, что все коэффициенты кубического уравнения относительно  $k^2$  уравнения (16) положительны, поэтому согласно правилу знаков Декарта оно не имеет положительных действительных корней. В общем случае анализ уравнения (16) затруднен вследствие громоздкости коэффициентов. Проведенные численные расчеты в аргоне при изменении давления в диапазоне 0,001–1 бар и скорости ионизации газа от  $10^{12}$  до  $10^{20}$  см<sup>-3</sup> с<sup>-1</sup> показали, что все корни этого уравнения действительны и, соответственно, отрицательны, поэтому детерминант можно представить в виде:

$$D = (k^2 + k_1^2)(k^2 + k_2^2)(k^2 + k_3^2). \quad (20)$$

Отсюда ясно, что экранирование в плазме с двумя сортами положительных ионов в общем случае будет определяться тремя постоянными, которые можно найти аналитически, но мы не будем выписывать эти выражения, так как для реальных вычислений они малоприменимы ввиду невысокой точности получаемых решений. Поэтому постоянные экранирования в настоящей работе будем находить численными методами.

Решения системы линейных уравнений (14) имеют вид:

$$U_{ek} = D^{-1} [b_1 k^4 + (b_1 a_{33} + b_1 a_{22} - b_2 a_{12} - b_3 a_{13}) k^2 +$$

$$+ b_1 (a_{22} a_{33} - a_{23} a_{32}) + b_2 (a_{13} a_{32} - a_{12} a_{33}) +$$

$$+ b_3 (a_{12} a_{23} - a_{13} a_{22})], \quad (21)$$

$$U_{ik} = D^{-1} [b_2 k^4 + (b_2 a_{11} + b_2 a_{33} - b_1 a_{21} - b_3 a_{23}) k^2 +$$

$$+ b_1 (a_{31} a_{23} - a_{21} a_{33}) + b_2 (a_{11} a_{33} - a_{13} a_{31}) +$$

$$+ b_3 (a_{21} a_{13} - a_{11} a_{23})], \quad (22)$$

$$U_{2k} = D^{-1} [b_3 k^4 + (b_3 a_{11} + b_3 a_{22} - b_1 a_{31} - b_2 a_{32}) k^2 +$$

$$+ b_1 (a_{21} a_{32} - a_{22} a_{31}) + b_2 (a_{31} a_{12} - a_{11} a_{32}) +$$

$$+ b_3 (a_{11} a_{22} - a_{21} a_{12})]. \quad (23)$$

На основе (21)–(23) находим:

$$U_{1k} + U_{2k} - U_k = \frac{B_1 k^4 + B_2 k^2 + B_3}{D}, \quad (24)$$

где

$$B_1 = -b_1 + b_2 + b_3, \quad (25)$$

$$B_2 = -b_1 (a_{21} + a_{22} + a_{31} + a_{33}) +$$

$$+ b_2 (a_{11} + a_{12} - a_{32} + a_{33}) +$$

$$+ b_3 (a_{11} + a_{13} + a_{22} - a_{23}), \quad (26)$$

$$B_3 = b_1 (a_{21} a_{32} - a_{21} a_{33} - a_{22} a_{31} - a_{22} a_{33} + a_{23} a_{31} + a_{23} a_{32}) +$$

$$+ b_2 (a_{11} a_{33} - a_{11} a_{32} + a_{12} a_{31} + a_{12} a_{33} - a_{13} a_{31} - a_{13} a_{32}) +$$

$$+ b_3 (a_{11} a_{22} - a_{11} a_{23} - a_{12} a_{21} - a_{12} a_{23} + a_{13} a_{21} + a_{13} a_{22}). \quad (27)$$

Подставив последнее выражение в (15), Фурье-образ потенциала в случае трех различных постоянных экранирования представим в виде:

$$\Phi_k = \frac{4\pi e}{k^2} \left( q + \frac{C_1 k_1^2}{k^2 + k_1^2} + \frac{C_2 k_2^2}{k^2 + k_2^2} + \frac{C_3 k_3^2}{k^2 + k_3^2} \right), \quad (28)$$

где коэффициенты  $C_1, C_2, C_3$  являются решением системы:

$$\begin{cases} C_1 k_1^2 + C_2 k_2^2 + C_3 k_3^2 = B_1, \\ (k_2^2 + k_3^2) k_1^2 C_1 + (k_1^2 + k_3^2) k_2^2 C_2 + (k_1^2 + k_2^2) k_3^2 C_3 = B_2, \\ k_1^2 k_2^2 k_3^2 (C_1 + C_2 + C_3) = B_3. \end{cases} \quad (29)$$

Коэффициенты (25)–(27) через параметры плазмы выражаются следующим образом:

$$B_1 = -q k_d^2 + \hat{S}_e - \hat{S}_{i1} - \hat{S}_{i2}, \quad (30)$$

$$B_2 = (\hat{S}_e - q k_{de}^2) \left[ \frac{\beta_1 n_{e0} + v_{im} + v_3}{D_{i1}} + \frac{\beta_2 (n_{e0} + n_{20})}{D_{i2}} \right] -$$

$$- (\hat{S}_{i1} + q k_{d1}^2) \left[ \frac{\beta_1 n_{e0} + v_{im} + \beta_2 n_{20}}{D_e} + \frac{\beta_2 n_{e0} + v_3}{D_{i2}} \right] -$$

$$- (\hat{S}_{i2} + k_{d2}^2) \left[ \frac{v_{im} + \beta_2 (n_{e0} + n_{20})}{D_e} + \frac{\beta_1 n_{e0} + v_3}{D_{i1}} \right], \quad (31)$$

$$B_3 = -q [v_{im} (v_3 + \beta_2 n_{e0}) +$$

$$+ \beta_2 (n_{e0} + n_{20}) (v_3 + \beta_1 n_{e0})] \left( \frac{k_{de}^2}{D_{i1} D_{i2}} + \frac{k_{d1}^2}{D_e D_{i2}} + \frac{k_{d2}^2}{D_e D_{i1}} \right). \quad (32)$$

Сравнение последнего выражения с коэффициентом  $\alpha_3$  уравнения (16) показывает, что

$$B_3 = -q \alpha_3 \equiv -q k_1^2 k_2^2 k_3^2. \quad (33)$$

Решениями системы (29) являются:

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{(k_2^2 - k_3^2)(B_1 k_1^4 - B_2 k_1^2 + B_3)}{D_0 k_1^2}, \\ C_2 &= \frac{(k_2^2 - k_1^2)(B_1 k_2^4 - B_2 k_2^2 + B_3)}{D_0 k_2^2}, \\ C_3 &= \frac{(k_1^2 - k_2^2)(B_1 k_3^4 - B_2 k_3^2 + B_3)}{D_0 k_3^2}, \end{aligned} \quad (34)$$

где

$$D_0 = k_1^4 (k_2^2 - k_3^2) + k_2^4 (k_3^2 - k_1^2) + k_3^4 (k_1^2 - k_2^2).$$

Выполнив обратное Фурье-преобразование, из (28) находим:

$$\phi(r) = \frac{e}{r} (q + C_1 + C_2 + C_3 - C_1 e^{-k_1 r} - C_2 e^{-k_2 r} - C_3 e^{-k_3 r}). \quad (35)$$

Из последнего уравнения системы (29) и выражения (33) следует, что

$$C_1 + C_2 + C_3 = -q.$$

Поэтому окончательно из (35) находим

$$\phi(r) = -\frac{e}{r} (C_1 e^{-k_1 r} + C_2 e^{-k_2 r} + C_3 e^{-k_3 r}). \quad (36)$$

В случае двух совпадающих постоянных экранирования, то есть при наличии кратных корней уравнения (16), будем иметь (совпадающие постоянные обозначим как  $k_2$  и  $k_3$ :  $k_2 = k_3$ ):

$$\phi(r) = -\frac{e}{r} [C'_1 e^{-k_1 r} + C'_2 e^{-k_2 r} + C'_3 (1 + \frac{1}{2} k_2 r) e^{-k_2 r}], \quad (37)$$

где

$$\begin{aligned} C'_1 &= \frac{B_1 k_1^4 - B_2 k_1^2 + B_3}{k_1^2 (k_1^2 - k_2^2)^2}, \\ C'_2 &= \frac{B_1 k_2^2 (k_2^2 - 2k_1^2) + B_2 k_1^2 - B_3}{k_2^2 (k_1^2 - k_2^2)^2}, \\ C'_3 &= \frac{B_1 k_2^4 - B_2 k_2^2 + B_3}{k_2^4 (k_1^2 - k_2^2)}. \end{aligned} \quad (38)$$

В случае трех совпадающих постоянных экранирования ( $k_1 = k_2 = k_3$ ) потенциал макрочастицы будет описываться выражением:

$$\phi(r) = -\frac{eq}{r} e^{-k_1 r} (1 + C''_2 k_1 r - C''_3 k_1^2 r^2), \quad (39)$$

где

$$\begin{aligned} C''_2 &= \frac{7B_1 k_1^4 - 3B_2 k_1^2 - B_3}{8q k_1^6}, \\ C''_3 &= \frac{B_1 k_1^4 - B_2 k_1^2 + B_3}{8q k_1^6}. \end{aligned} \quad (40)$$

В случае трех одинаковых постоянных экранирования они равны:

$$k_1 = k_2 = k_3 = \frac{1}{3} \alpha_1, \quad (41)$$

а возможность появления таких постоянных экранирования в плазме определяется условиями:

$$\alpha_2 = \frac{1}{3} \alpha_1^2, \quad \alpha_3 = \left(\frac{1}{3} \alpha_1\right)^3. \quad (42)$$

Далее рассмотрим частные случаи, которые реализуются в различных приложениях и для которых можно получить простые аналитические решения для постоянных экранирования.

## 2. ЭКРАНИРОВАНИЕ ПРИ БОЛЬШИХ И МАЛЫХ СКОРОСТЯХ КОНВЕРСИИ ИОНОВ

### 2.1. Большая скорость конверсии ионов

При высоких давлениях для не очень плотной и/или холодной плазмы, когда выполнено условие

$$\beta_2 n_{e0} \ll k_3 n_{Ar}^2, \quad (43)$$

рекомбинацией одноатомных ионов можно пренебречь. В этом случае  $n_{10} \approx 0$ ,  $k_{d1} \approx 0$  и  $n_{20} \approx n_{e0} \equiv n_0$ . Также положим, что  $k_{i0n} = 0$ , так как при высоких давлениях устойчиво и однородно горит только несамостоятельный газовый разряд с внешним источником ионизации газа, в котором самостоятельная ионизация пренебрежимо мала [10] (см. также [3], [5], [6]). Теперь из (16) находим:

$$\left( k^2 + \frac{v_3 + \beta_1 n_0}{D_{i1}} \right) \left[ k^4 + k^2 (k_d^2 + k_s^2) + 2k_{se}^2 k_{de}^2 + 2k_{si}^2 k_{di}^2 \right], \quad (44)$$

где  $k_s^2 = k_{se}^2 + k_{si}^2$ ,  $k_{se}^2 = \beta_2 n_0 / D_e$ ,  $k_{si}^2 = \beta_2 n_0 / D_{i2}$ . Один из корней уравнения (44) дает постоянную экранирования

$$k_3 = \sqrt{(v_3 + \beta_1 n_0) / D_{i1}}. \quad (45)$$

Легко показать из (34), что коэффициент  $C_3$  в (36) для этой постоянной в рассматриваемом случае равен нулю. Из выражения в квадратных скобках (44) для двух других постоянных экранирования находим:

$$\begin{aligned} k_{1,2}^2 &= \frac{1}{2} (k_d^2 + k_s^2) \pm \\ &\pm \sqrt{\frac{1}{4} (k_d^2 + k_s^2)^2 - 2k_{se}^2 k_{de}^2 - 2k_{si}^2 k_{di}^2}, \end{aligned} \quad (46)$$

где  $k_{di}^2 = k_{d2}^2$ , в рассматриваемом случае  $k_{di}^2 = 4\pi e^2 n_0 / T_{i2}$ . Выражение (46) совпадает с полученным в работах [15], [16]. Отметим, что в изотермической плазме для рассматриваемого случая возможно появление двух одинаковых постоянных экранирования (подробнее см. в [15], [16]).

### 2.2. Малая скорость конверсии ионов

Теперь рассмотрим случай, когда конверсией одноатомных ионов в двухатомные можно пренебречь. Этот случай реализуется при выполнении противоположного (43) условия, например при высоких температурах газа, так как константа трехчастичной конверсии ионов с ростом температуры падает как  $T^{-3/2}$  [20] или при низких давле-

ниях газа. В этом случае  $n_{20} \approx 0$ ,  $k_{d2} \approx 0$ ,  $n_{10} \approx n_{e0} \equiv n_0$ , и из (16) для детерминанта находим:

$$\left(k^2 + \frac{\beta_2 n_0}{D_{i2}}\right) \left[ k^4 + k^2 (k_d^2 + k_{ve}^2 + k_{\beta i}^2) + k_{de}^2 (k_{\beta i}^2 + k_{vi}^2) + k_{d1}^2 (k_{\beta e}^2 + k_{ve}^2) \right], \quad (47)$$

где  $k_{ve}^2 = v_{im}^2/D_e$ ,  $k_{vi}^2 = v_{im}^2/D_{i1}$ ,  $k_{\beta e}^2 = \beta_1 n_0/D_e$ ,  $k_{\beta i}^2 = \beta_1 n_0/D_{i1}$ . Одна из постоянных экранирования равна:

$$k_3 = \sqrt{\beta_2 n_0/D_{i2}}, \quad (48)$$

но, как легко показать из (34), коэффициент  $C_3$  в (36) для этой постоянной равен нулю. Здесь мы не будем приводить общее решение для двух других постоянных экранирования, а рассмотрим более частные случаи, когда можно пренебречь фоторекомбинацией и когда можно пренебречь трехтельной рекомбинацией.

### 2.2.1. Малая скорость фоторекомбинации

Этот случай, в котором  $\beta_1 = \beta_3 n_0$ ,  $v_{im} = 2\beta_3 n_0 - v_{ion}$ , реализуется в достаточно плотной плазме, когда трехтельная рекомбинация преобладает, то есть при выполнении условия

$$\beta_3 n_0 \gg \beta_{ph}. \quad (49)$$

Например, в термической плазме концентрация электронов и ионов определяется соотношением Саха [9]:

$$\frac{n_{e0} n_{i0}}{n_{Ar}} = 2 \frac{g_i}{g_a} \left( \frac{2\pi m T}{h^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{I_{Ar}}{T}\right) = A \frac{g_i}{g_a} T^{3/2} \exp\left(-\frac{I_{Ar}}{T}\right), \quad (50)$$

где  $A = 4,85 \times 10^{15} \text{ см}^{-3} \text{ К}^{-3/2} = 6,06 \times 10^{21} \text{ см}^{-3} \text{ эВ}^{-3/2}$  [9],  $g_i$  – статистический вес иона (для  $\text{Ar}^+$   $g_i = 6$ ),  $g_a$  – статистический вес атома (для  $\text{Ar}$   $g_a = 1$ ),  $h$  – постоянная Планка,  $I_{Ar}$  – потенциал ионизации атомов ( $I_{Ar} = 15,76 \text{ эВ}$ ),  $T$  – температура газа в энергетических единицах. Сопоставляя выражения для коэффициентов рекомбинации, представленные в табл. 1, и используя (50), можно определить критическую температуру, при которой скорости двух рассматриваемых процессов рекомбинации сравниваются друг с другом. При атмосферном давлении в чистом аргоне это произойдет при температуре газа, равной  $\sim 0,5 \text{ эВ}$ . При более низкой температуре в процессах гибели электронов будет преобладать фоторекомбинация. Если в термической плазме будут присутствовать атомы щелочных металлов с низким потенциалом ионизации, то граничная температура будет существенно меньшей.

В плазме несамостоятельного разряда при  $T_e = T_i = 0,0258 \text{ эВ}$  фоторекомбинацией можно пренебречь при скоростях ионизации газа внешним источником, превышающих  $10^5 \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ . С ростом электронной температуры граничная скорость ионизации также растет.

Далее ограничимся рассмотрением изотермической плазмы, в которой  $k_{de}^2 = k_{d1}^2 = \frac{1}{2} k_d^2$ . Тогда из (46) для постоянных экранирования в плазме с внешним источником ионизации газа при  $v_{ion} = 0$  (с учетом  $k_{ve}^2 = 2\beta_3 n_0^2/D_e$ ,  $k_{vi}^2 = 2\beta_3 n_0^2/D_{i1}$ ,  $k_{\beta e}^2 = \beta_3 n_0^2/D_e$ ,  $k_{\beta i}^2 = \beta_3 n_0^2/D_{i1}$ ) получим:

$$k_{1,2}^2 = \frac{1}{2} \left\{ k_d^2 + \beta_3 n_0^2 \left( \frac{2}{D_e} + \frac{1}{D_{i1}} \right) \pm \sqrt{\left[ k_d^2 + \beta_3 n_0^2 \left( \frac{2}{D_e} + \frac{1}{D_{i1}} \right) \right]^2 - 6k_d^2 \beta_3 n_0^2 \left( \frac{1}{D_e} + \frac{1}{D_{i1}} \right)} \right\}.$$

Так как всегда выполнено условие  $D_e \gg D_{i1}$ ,

$$k_{1,2}^2 = \frac{1}{2} \left\{ k_d^2 + \frac{\beta_3 n_0^2}{D_{i1}} \pm \sqrt{\left( k_d^2 - \frac{\beta_3 n_0^2}{D_{i1}} \right)^2 - 2k_d^2 \frac{\beta_3 n_0^2}{D_{i1}}} \right\}. \quad (51)$$

Из (51) видно, что возможно появление комплексных постоянных экранирования при выполнении условия

$$2k_d^2 \frac{\beta_3 n_0^2}{D_{i1}} > \left( k_d^2 - \frac{\beta_3 n_0^2}{D_{i1}} \right)^2. \quad (52)$$

Выражение (52) представим в виде:

$$2 \frac{k_d^2}{n_0} \cdot \frac{\beta_3 n_0}{D_{i1}} > \left( \frac{k_d^2}{n_0} - \frac{\beta_3 n_0}{D_{i1}} \right)^2. \quad (53)$$

Величина  $k_d^2/n_0$  не зависит от концентрации электронов и ионов, поэтому при заданной температуре  $T$  левая часть (53) с ростом скорости ионизации газа линейно растет, причем эта зависимость проходит через начало координат, а правая часть (53) падает. Следовательно, эти кривые обязательно пересекутся, и это произойдет при скорости ионизации газа

$$Q_{ion} = \frac{8(2 - \sqrt{3})^3 \beta_{1L}^2}{\beta_3^2}, \quad (54)$$

где  $\beta_{1L} = 4\pi e k_{i1}$  – коэффициент рекомбинации Ланжевена одноатомных ионов. При дальнейшем увеличении скорости ионизации условие (52) начнет нарушаться после достижения

$$Q_{ion} = \frac{8(2 + \sqrt{3})^3 \beta_{1L}^2}{\beta_3^2}.$$

На рис. 1 приведены зависимости критической скорости ионизации газа, согласно (54), от температуры изотермической плазмы. На этом графике также приведена кривая потерь одно-

атомных ионов за счет конверсии в двухатомные, которые, как видно на рисунке, на несколько порядков меньше потерь в процессе трехтельной рекомбинации (практически совпадающих со скоростью ионизации газа). Потери за счет фото-рекомбинации при этих скоростях ионизации газа оказались пренебрежимо малыми. Из рис. 1 видно, что условие (53) может быть выполнено только при очень высоких скоростях ионизации газа, недостижимых на практике. Также нужно отметить, что при таких высоких скоростях ионизации газа температура электронов будет существенно отличаться от газовой и ионной температур.

Далее рассмотрим термическую плазму ( $T_e = T_{il} = T$ ), в которой  $Q_{ion} = 0$ . Теперь  $v_{ion} = \beta_3 n_0^2$  или  $n_0 = \sqrt{v_{ion} / \beta_3}$ ,  $k_{ve}^2 \equiv k_{\beta e}^2 = \beta_3 n_0^2 / D_e$ ,  $k_{vi}^2 \equiv k_{\beta i}^2 = \beta_3 n_0^2 / D_{il}$ . Для определения постоянных экранирования из (47) получаем уравнение:

$$k^4 + k^2 (k_d^2 + k_{\beta e}^2 + k_{\beta i}^2) + k_d^2 (k_{\beta e}^2 + k_{\beta i}^2) = 0. \quad (55)$$

Из (55) находим:

$$k_1^2 = k_d^2, \quad k_2^2 = k_{\beta e}^2 + k_{\beta i}^2,$$

то есть одна из постоянных экранирования совпадает с дебаевской. В этом случае возможно равенство  $k_1 = k_2$ . Найдем параметры термической плазмы, при которых это равенство будет иметь место:

$$\frac{8\pi e^2 n_0}{T} = \beta_3 n_0^2 \left( \frac{1}{D_e} + \frac{1}{D_{il}} \right).$$

Так как  $D_e \gg D_{il}$ , отсюда получим:

$$\frac{8\pi e^2 n_0 D_{il}}{T} \approx \beta_3 n_0 \quad \text{или} \quad 2\beta_L \approx \beta_3 n_0, \quad (56)$$

где  $\beta_L = 4\pi e k_{il}$  – ланжевеновский коэффициент рекомбинации одноатомных ионов. Оценки с использованием соотношения Саха показывают, что равенство (56) возможно только при очень высоких давлениях. В этой области параметров приведенные в табл. 1 зависимости вряд ли применимы.

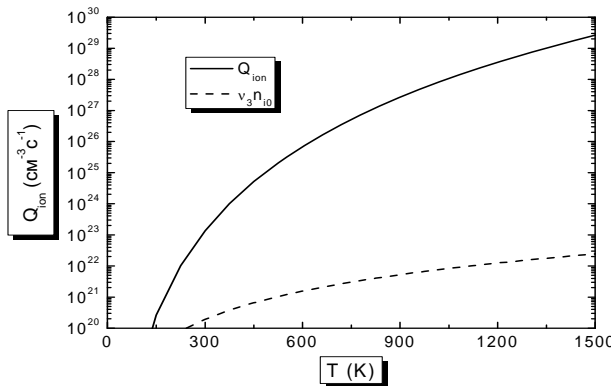


Рис. 1. Значения критической скорости ионизации газа в зависимости от температуры при концентрации газа  $N = 2,5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , согласно (54), выше которых появятся комплексные значения постоянных экранирования

### 2.2.2. Малая скорость трехчастичной рекомбинации

В этом случае  $\beta_1 = \beta_{ph}$ ,  $v_{im} = \beta_{ph} n_0 - v_{ion}$ , и из (47) в обозначениях [15], [16], [22], [23] получим:

$$k^4 + k^2 (k_d^2 + k_s^2 - k_{ie}^2) + k_{de}^2 (2k_{si}^2 - k_{ii}^2) + k_{d1}^2 (2k_{se}^2 - k_{ie}^2) = 0, \quad (57)$$

где

$$k_{ve}^2 = (\beta_{ph} n_0 - v_{ion}) / D_e = k_{se}^2 - k_{ie}^2,$$

$$k_{vi}^2 = (\beta_{ph} n_0 - v_{ion}) / D_{il} = k_{si}^2 - k_{ii}^2, \quad k_{\beta e}^2 = k_{se}^2, \quad k_{\beta i}^2 = k_{si}^2.$$

Это выражение совпадает с полученным в работах [15], [16], [22], [23] уравнением для нахождения постоянных экранирования в двухкомпонентной плазме.

### 3. ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ ПОСТОЯННЫХ ЭКРАНИРОВАНИЯ И ПРОЦЕССА ЗАРЯДКИ МАКРОЧАСТИЦ

Для проверки полученных результатов проведем численные расчеты зарядки пылевых частиц. Систему нестационарных уравнений (1)–(2) с граничными условиями (4) будем решать численно, методом конечных разностей [7], [8]. В качестве внешней границы будем использовать сферу с радиусом, равным радиусу ячейки Зейтца – Вигнера

$$a_d = \left( \frac{4}{3} \pi n_d \right)^{-1/3},$$

$$n_e|_{r=a_d} = n_{e0}, \quad n_{i1}|_{r=a_d} = n_{i0}, \quad n_{i2}|_{r=a_d} = n_{i20}, \quad (58)$$

$$\phi|_{r=a_d} = 0,$$

где  $n_d$  – концентрация макрочастиц, которая выбиралась такой, чтобы исключить влияние внешней границы на результаты расчетов. Концентрации электронов и ионов в невозмущенной плазме находились численно из системы (6). В качестве начальных данных задавались нулевые значения потенциала во всей ячейке, и в большинстве расчетов полагалось, что ячейка Зейтца – Вигнера заполнена плазмой с равновесной концентрацией.

Расчеты проведены для аргона, коэффициенты переноса электронов в котором были рассчитаны на основе численного решения уравнения Больцмана для ФРЭЭ с сечениями из [24]. При  $T_e = 300 \text{ К}$  подвижность и коэффициент диффузии электронов при концентрации атомов аргона  $n_{Ar} = 2,5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$  равны:  $k_e = 9,98 \times 10^4 \text{ см}^2/(\text{В с})$ ,  $D_e = 2580 \text{ см}^2/\text{с}$ . При  $T_e = 300 \text{ К} = 0,026 \text{ эВ}$ ,  $Q_{ion} = 10^{14} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$  коэффициенты рекомбинации равны:  $\beta_2 = 8,5 \times 10^{-7} \text{ см}^3/\text{с}$ ,  $\beta_{ph} = 4,188 \times 10^{-12} \text{ см}^3/\text{с}$ ,  $\beta_3 = 1,22 \times 10^{-19} \text{ см}^6/\text{с}$ ,  $\beta_1 = 1,329 \times 10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}$ . При атмосферном давлении коэффициенты переноса ионов равны ( $T_i = 300 \text{ К}$ ) [11]:  $k_{i1} = 1,30 \text{ см}^2/(\text{В с})$ ,  $D_{i1} = 3,364 \times 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$ ,  $k_{i2} = 2,094 \text{ см}^2/(\text{В с})$ ,  $D_{i2} = 5,419 \times 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$ .

Температура электронов во всей расчетной области полагалась постоянной; соответственно, полагались постоянными все коэффициенты переноса и рекомбинации. Более подробно методика расчета заряда макрочастиц описана в [7], [8].

На рис. 2 приведены начальные распределения электронов и ионов в расчетной ячейке и установившиеся, стационарные распределения. Видно, что возмущение, вызванное поглощением электронов и ионов пылевой частицей радиусом 1 микрон, простирается на сотни микрон. Также видно, что даже при таком низком давлении, как  $10^3$  Па, концентрация молекулярных ионов уже превышает концентрацию атомарных.

На рис. 3 представлены зависимости заряда макрочастицы от времени при трех разных давлениях. Видно, что с уменьшением давления время выхода заряда на стационарный уровень также уменьшается, что обусловлено ростом коэффициента амбиполярной диффузии ионов с уменьшением давления, в то время как характерный размер области нарушения квазинейтральности плазмы вокруг макрочастицы, пропорциональный дебаевскому радиусу экранирования, слабо зависит от давления. Поэтому характерное время пересечения ионом области пространственного заряда вокруг пылевой частицы с уменьшением давления уменьшается и время формирования пространственного профиля концентрации ионов также уменьшается.

На рис. 4, 5 приведены зависимости потенциала от расстояния до центра макрочастицы, полученные в численном расчете и согласно асимптотической теории экранирования. Из рис. 4, 5 видно, что расчетный потенциал хорошо описывается суперпозицией трех экспонент с постоянными экранирования, вычисленными из (16). С увеличением давления, как видно из сравнения рис. 4 и 5, наименьшая постоянная экранирования также растет и потенциал макрочастицы при более высоком давлении быстрее спадает с расстоянием.

В табл. 2 представлены постоянные экранирования и коэффициенты  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_3$  зависимости (36) потенциала от расстояния, вычисленные из выражений (34) с использованием полученных в численном расчете значений заряда и стоков электронов и ионов для разных давлений аргона при  $T_e = 0,028$  эВ. Также приведены значения этих коэффициентов, найденные сравнением расчетных распределений потенциалов (см. рис. 4, 5) с кривыми, полученными из зависимости (36). При расчете распределений потенциала из (36) использовались полученные из формулы (16) постоянные экранирования. Видно, что с ростом давления согласие между полученными двумя способами значениями коэффициентов улучшается и при атмосферном давлении они практически совпадают друг с другом. Отличие коэффициентов связано с отмеченным выше обстоятельством, что заряды и стоки в модели точечных стоков являются некими эффективными величинами, которые отличаются от истинных и в рамках асимптотической теории

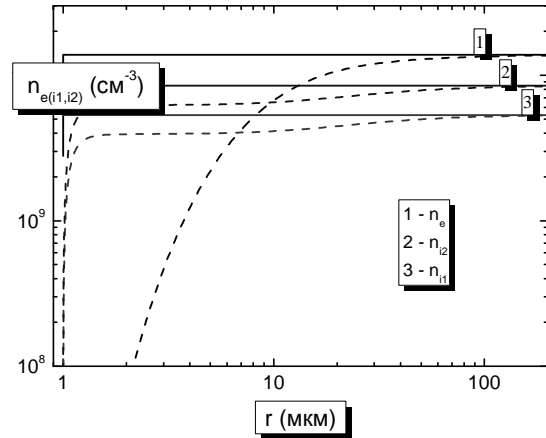


Рис. 2. Зависимости концентрации электронов и ионов от расстояния до частицы:

При давлении  $10^3$  Па в аргоне при  $Q_{\text{ion}} = 10^{14} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ ,  $T_e = 300 \text{ K}$ ,  $n_d = 10^5 \text{ cm}^{-3}$ : сплошные линии – в момент времени  $t = 0$ , пунктирные линии – стационарные распределения при  $t = 100$  мкс;  $n_e$  – концентрация электронов,  $n_{i1}$  – концентрация атомарных и  $n_{i2}$  – концентрация молекулярных ионов

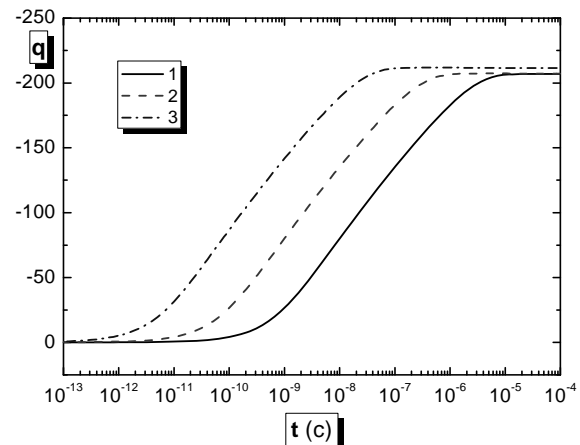


Рис. 3. Эволюция заряда макрочастицы во времени в аргоне при разных давлениях: 1 –  $10^5$  Па, 2 –  $10^4$  Па, 3 –  $10^3$  Па

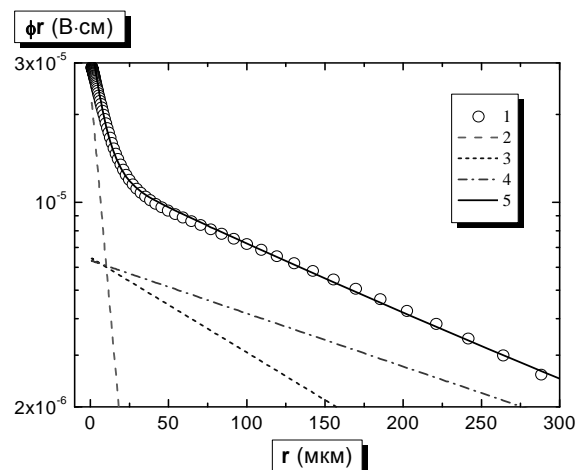


Рис. 4. Зависимости потенциала от расстояния до частицы при давлении  $10^3$  Па:

1 – расчетные точки (три раза прорежены), 2 – распределение потенциала с первой постоянной экранирования, 3 – со второй, 4 – с третьей, 5 – их сумма

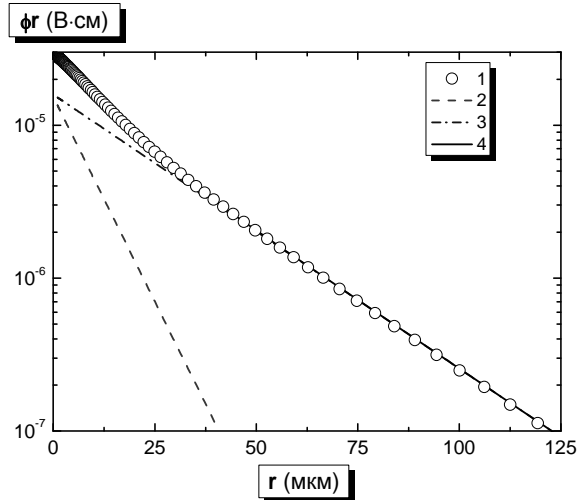


Рис. 5. Зависимости потенциала от расстояния до частицы при давлении  $10^5$  Па:

1 – расчетные точки (два раза прорезаны), 2 – распределение потенциала со второй постоянной экранирования, 3 – с третьей, 4 – их сумма (распределение с первой постоянной экранирования в данном масштабе проходит значительно ниже оси абсцисс)

Таблица 2

Постоянные экранирования и коэффициенты  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_3$  зависимости (36) потенциала от расстояния при  $T_e = 0,0258$  эВ

р, бар		0.01	0.1	1
$k_{sh1}$	Численное решение (16), $\text{см}^{-1}$	0,1391	0,2361	7,466
$k_{sh2}$		$7,480 \times 10^{-3}$	0,1232	0,1232
$k_{sh3}$		$4,182 \times 10^{-3}$	$1,305 \times 10^{-2}$	$4,125 \times 10^{-2}$
$C_1$	Из (34)	133,617	$1,969 \times 10^{-2}$	$-1,984 \times 10^{-7}$
	Из численных расчетов	175	–	–
$C_2$	Из (34)	–0,1044	125,531	106,295
	Из численных расчетов	45	140	106,295
$C_3$	Из (34)	77,961	81,699	100,621
	Из численных расчетов	44	83	110

не могут быть найдены. Из табл. 2 также видно, что с ростом давления коэффициент  $C_1$  становится, как и отмечалось выше, пренебрежимо малым (в численных расчетах постоянные экранирования пронумерованы по убыванию, поэтому  $C_1$  соответствует  $k_{sh1}$ , который при высоких давлениях практически совпадает с  $k_3$ , вычисленной из (45) (см. рис. 4, 5)).

На рис. 6–8 приведены зависимости постоянных экранирования от давления аргона при

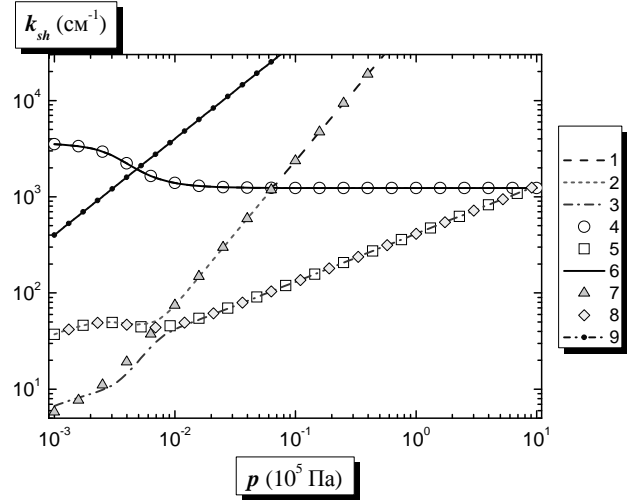


Рис. 6. Зависимости постоянных экранирования от давления аргона при  $T_e = 0,0258$  эВ: 1 –  $k_{sh1}$ , 2 –  $k_{sh2}$ , 3 –  $k_{sh3}$ , 4 –  $k_1$  из (46), 5 –  $k_2$  из (46), 6 –  $k_d$ , 7 –  $k_3$  из (45), 8 –  $k_3$  из (48), 9 –  $l_{i1}^{-1}$

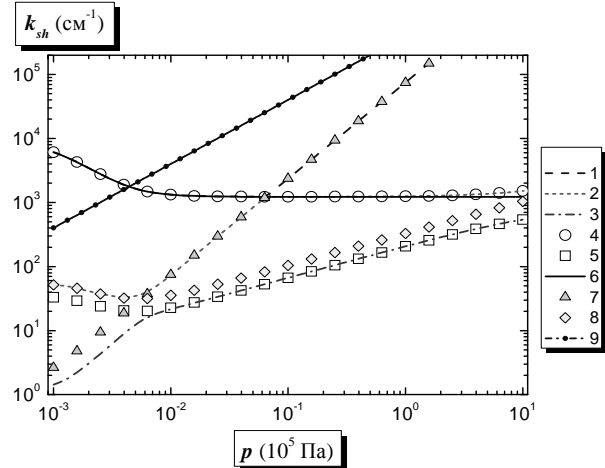


Рис. 7. Зависимости постоянных экранирования от давления аргона при  $T_e = 0.1$  эВ. (Обозначения, как на рис. 6.)

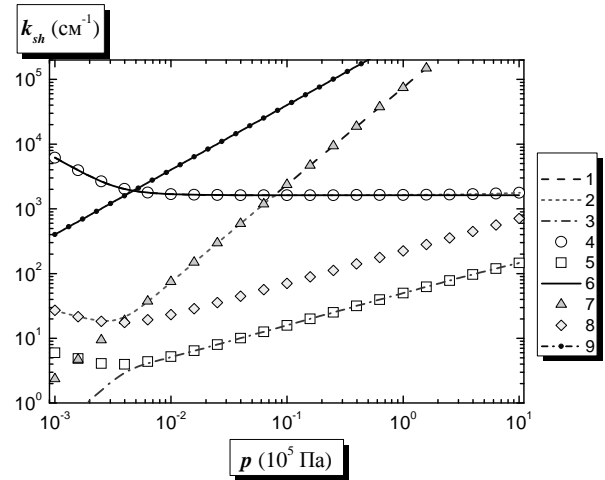


Рис. 8. Зависимости постоянных экранирования от давления аргона при  $T_e = 1$  эВ. (Обозначения, как на рис. 6.)



скорости ионизации газа  $Q_{\text{ion}} = 10^{14} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Численные решения уравнения (16) обозначены как  $k_{sh1}$ ,  $k_{sh2}$  и  $k_{sh3}$ . Особое внимание обратим на то, что постоянные экранирования в исследованном диапазоне давлений нигде не пересекаются (см. рис. 9, где представлены области сближения зависимостей  $k_{sh1}$  и  $k_{sh2}$  в увеличенном масштабе), то есть уравнение (16) в этом диапазоне не имеет совпадающих корней. Величины  $k_1$  и  $k_2$  рассчитаны из соотношения (46), а  $k_3$  – из (45) и (48).

Из анализа рис. 6–8 можно сделать следующие выводы:

1. Одна из постоянных экранирования практически совпадает с дебаевской;
2. Есть диапазон давлений, примерно от  $10^3$  до  $10^4$  Па, где все три постоянные экранирования сравнимы друг с другом;
3. Постоянные экранирования в плазме с одним сортом положительных ионов практически совпадают с двумя постоянными экранирования в двухионной плазме;
4. Выражение (45) хорошо описывает одну из постоянных экранирования, а (48) – описывает ее же, но только в изотермической плазме или только при низких давлениях.

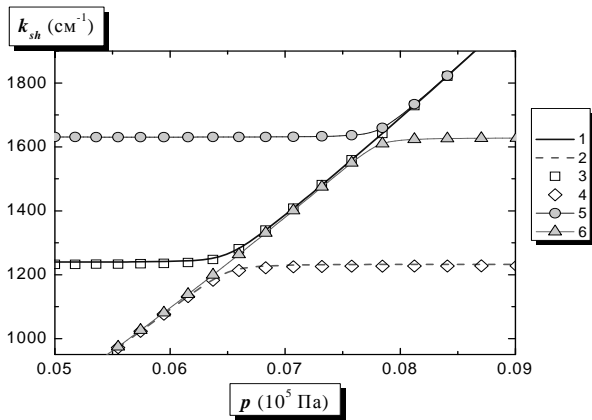


Рис. 9. Зависимости постоянных экранирования от давления аргона при  $T_e = 0,0258$  (1, 2), 0,1 (3, 4) и 1 эВ (5, 6): 1, 3, 5 –  $k_{sh1}$ , 2, 4, 6 –  $k_{sh2}$

Растущая зависимость первой постоянной экранирования после области сближения, отмеченной кружочком, объясняется процессом конверсии ионов, скорость которой растет квадратично с давлением. Эта постоянная экранирования в данной области определяется выражением (46) и, следовательно, растет с ростом давления газа. Но, как уже отмечалось выше, коэффициент в (36) при этой постоянной экранирования в этой области мал, к тому же на малых расстояниях линеаризованная теория вряд ли применима.

В заключение обсудим вопрос об области применимости использованной в настоящей работе гидродинамической модели зарядки. Уравнения непрерывности для положительных ионов применимы при выполнении условий:

$$l_{i1} = L, l_{i2} = L, \quad (59)$$

где  $l_{i1}$ ,  $l_{i2}$  – длина свободного пробега одноатомных и комплексных ионов соответственно,  $L$  – характерный размер задачи. На рис. 6–8 приведены зависимости обратной длины пробега одноатомных ионов аргона от давления, ниже которых применимо диффузионно-дрейфовое приближение для описания переноса ионов (при низких давлениях основным сортом ионов являются одноатомные ионы). Из рис. 6–8 видно, что при давлениях выше  $10^3$  Па условия (59) для всех постоянных экранирования выполнены. Что касается электронной компоненты, то зависимость постоянных экранирования от коэффициентов переноса электронов практически отсутствует, поэтому изменением подвижности и коэффициента диффузии электронов в окрестности макрочастицы можно пренебречь. Константы скоростей рождения и гибели электронов и ионов (которые зависят от температуры электронов), как было показано в работе [14], практически не зависят от расстояния до поверхности пылевой частицы, поскольку температура электронов в области нарушения квазинейтральности плазмы меняется незначительно. Это является следствием высокой теплопроводности электронной компоненты по сравнению с коэффициентом амбиполярной диффузии, формирующей область пространственного заряда (более подробно см. в [14]). Поэтому изменением констант скоростей также можно пренебречь. Итак, мы можем сделать окончательный вывод о том, что использованная в настоящей работе гидродинамическая модель зарядки применима при выполнении условий (59).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе на основе модели точечного стока получен вид экранированного потенциала макрочастицы в плазме с двумя сортами положительных ионов. Численно получены значения постоянных экранирования в плазме с внешним источником ионизации газа. Установлено, что при наличии ионов двух сортов выражение для распределения потенциала в окрестности заряженной макрочастицы является суперпозицией трех экспонент в общем случае с тремя разными постоянными экранирования. Численные расчеты показали, что одна из постоянных экранирования близка к дебаевской. При повышенных давлениях коэффициент при экспоненте с наибольшей постоянной оказывается пренебрежимо мал, к тому же сама экспонента быстро затухает на малых расстояниях. Также установлено, что две из трех постоянных экранирования во всем исследованном диапазоне параметров плазмы практически совпадают с постоянными экранирования в плазме с одним сортом положительных ионов. Также показано, что есть диапазон давлений, где оказываются важными все три экспоненты.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 07-02-00504-а.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов В. Ю., Паль А. Ф., Пустовалов А. А. и др. Радиоизотопные генераторы электрического тока // *Изотопы: свойства, получение, применение* / Под ред. В. Ю. Баранова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. Т. 2. С. 259–290.
2. Брау Ч. Эксимерные лазеры / Под ред. Ч. Роудза; Пер. с англ. М.: Мир, 1981. С. 137.
3. Журавлев Б. В., Напартович А. П., Паль А. Ф. и др. К вопросу о характере контрагирования несамостоятельного разряда // *Физика плазмы*. 1988. Т. 14. № 2. С. 233–240.
4. Иванов В. А. Диссоциативная рекомбинация молекулярных ионов в плазме инертных газов // *УФН*. 1992. Т. 162. № 1. С. 35–70.
5. Королева И. Л., Лопанцева Г. Б., Напартович А. П. и др. Неустойчивость несамостоятельного разряда в смеси  $\text{CO}_2$ -лазера // *ТВГ*. 1990. Т. 28. № 5. С. 847–852.
6. Манкелевич Ю. А., Паль А. Ф., Попов Н. А. и др. Динамика тока и механизмы развития неустойчивости несамостоятельного тлеющего разряда в азоте // *Физика плазмы*. 2001. Т. 27. № 11. С. 1035–1045.
7. Паль А. Ф., Серов А. О., Старостин А. Н. и др. Несамостоятельный разряд в азоте с конденсированной дисперсной фазой // *ЖЭТФ*. 2001. Т. 119. № 2. С. 272–285.
8. Паль А. Ф., Старостин А. Н., Филиппов А. В. Зарядка пылевых частиц в создаваемой продуктами радиоактивного распада плазме при повышенных давлениях // *Физика плазмы*. 2001. Т. 27. № 2. С. 155–164.
9. Райзер Ю. П. *Физика газового разряда*. М.: Наука, 1987. 592 с.
10. Рахимов А. Т., Письменный В. Д., Велихов Е. П. Несамостоятельный газовый разряд, возбуждающий непрерывные  $\text{CO}_2$ -лазеры // *УФН*. 1977. Т. 122. № 7. С. 419–437.
11. Смирнов Б. М. Ионы и возбужденные атомы в плазме. М.: Атомиздат, 1974. 456 с.
12. Филиппов А. В. Фотовольтаический источник энергии на основе упорядоченных плазменно-пылевых структур // *Энциклопедия низкотемпературной плазмы*. Серия А. Прогресс в физике и технике низкотемпературной плазмы. Т. 1–2. Пылевая плазма / Под ред. В. Е. Фортова. М.: Янус-К, 2006. С. 409–428.
13. Филиппов А. В., Бабичев В. Н., Дятко Н. А. и др. Механизм образования плазменно-пылевых структур при атмосферном давлении // *ЖЭТФ*. 2006. Т. 129. Вып. 2. С. 386–399.
14. Филиппов А. В., Дятко Н. А., Паль А. Ф., Старостин А. Н. Самосогласованная модель зарядки пылевых частиц при повышенных давлениях на основе метода моментов // *Физика плазмы*. 2003. Т. 29. № 3. С. 214–226.
15. Филиппов А. В., Загородний А. Г., Момот А. И. и др. Экранирование заряда в плазме с внешним источником ионизации // *ЖЭТФ*. 2007. Т. 131. № 1. С. 164–179.
16. Филиппов А. В., Загородний А. Г., Паль А. Ф., Старостин А. Н. Экранировка заряда микрочастицы в плазме с внешним источником ионизации // *Письма в ЖЭТФ*. 2005. Е. 81. № 4. С. 180–185.
17. Фортвов В. Е., Храпак С. А., Храпак А. Г. и др. Пылевая плазма // *УФН*. 2004. Т. 174. № 5. С. 495–544.
18. Цытович В. Н., Морфилл Г. Е., Томас В. Х. Комплексная плазма: IV. Теория комплексной плазмы. Приложения // *Физика плазмы*. 2004. Т. 30. № 10. С. 877–929.
19. Filippov A. V., Pal' A. F., Starostin A. N. et al. Atomic battery based on ordered dust plasma structures // *Ukr. J. Phys.* 2005. Vol. 50. № 2. P. 137–143.
20. Lam S. K., Zheng C.-E., Lo D. et al. Kinetics of  $\text{Ar}^{2+}$  in high-pressure pure argon // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2000. Vol. 33. P. 242–251.
21. Kortshagen U. Nonthermal plasma synthesis of semiconductor nanocrystals // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2009. Vol. 42. 113001. P. 1–22.
22. Pal' A. F., Filippov A. V., Starostin A. N. An experimental and theoretical study of the high-pressure dusty plasma created by a stationary e-beam // *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2005. Vol. 47. P. B603–B615.
23. Starostin A., Filippov A., Pal' A. et al. Shielding and Interaction of Dust Particles in Non-Equilibrium Plasma // *Contributions to Plasma Physics*. 2007. Vol. 47. № 4–5. P. 388–401.
24. Tachibana K. Excitation of the  $1s_5$ ,  $1s_4$ ,  $1s_3$ , and  $1s_2$  levels of argon by low-energy electrons // *Phys. Rev. A*. 1986. Vol. 34. P. 1007.

УДК 544.77.052.2:553.9-032.3

**НАТАЛЬЯ НИКОЛАЕВНА РОЖКОВА**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник,  
заведующий лабораторией физико-химических исследова-  
ний нанокристаллических материалов Института геологии  
КарНЦ РАН

*rozhkova@krc.karelia.ru*

### **АГРЕГАЦИЯ НАНОЧАСТИЦ УГЛЕРОДА В ШУНГИТАХ И УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ АЛМАЗАХ**

Исследованы агрегационные структуры, образующиеся в устойчивых водных дисперсиях наночастиц (НЧ) шунгитового углерода и ультрадисперсного алмаза детонационного синтеза. От структурно-динамических свойств гидратной оболочки, которая формируется благодаря особенностям свойств поверхности НЧ, зависят устойчивость водных дисперсий, кинетика агрегационных процессов и морфология формирующихся структур.

Ключевые слова: наночастицы, шунгитовый углерод, нанокристаллический алмаз, агрегация

Сложность контроля над процессами, в которых участвуют наночастицы, связана с их агрегацией. Эта проблема особенно актуальна для углеродсодержащих материалов нового поколения, получаемых плазменными методами, к которым относятся фуллерены, нанотрубки и ультрадисперсные алмазы из-за их высокоразвитой поверхности и реакционной способности. Для эффективного применения новых материалов необходимо понять условия стабилизации наноразмерных элементов углерода, агрегирующих на стадии формирования структур. Наибольшие сложности связаны с пониманием процессов в водных дисперсиях НЧ углерода. От структурно-динамических свойств гидратной оболочки, которая формируется свойствами поверхности НЧ, зависят устойчивость системы, кинетика агрегационных процессов и морфология получающихся структур.

В работе приведены результаты исследования структур, образующихся в водных дисперсиях НЧ шунгитового углерода и ультрадисперсного алмаза детонационного синтеза.

Высокоразвитая поверхность НЧ углерода предопределяет особенности физико-химических свойств, большие скорости процессов массо- и теплообмена в материалах на их основе. Сложность контроля над процессами, в которых участвуют НЧ, объясняется усилением взаимодействия между НЧ, приводящего к их агрегации.

Эта проблема приобретает особенную актуальность при изучении углеродсодержащих материалов нового поколения, к которым относятся фуллереноподобные наночастицы, нанотрубки, луковичные структуры и ультрадисперсные алмазы, из-за их высокоразвитой поверхности и реакционной способности. Для их эффективного применения необходимо понять условия стабилизации наноразмерных элементов углерода, так как они агрегируют уже на стадии формирования структур [8]. Структура и динамика образования наномасштабной углеродной сетки может быть описана при сравнительном изучении углеродных НЧ благодаря их морфологическому и генетическому подобию [5].

Морфологически подобные структуры могут быть выращены из растворов и из расплавов. Кристаллы хорошего качества растут в метастабильной области фазовой диаграммы, в то время как высокая нестабильность межфазных границ в области перенасыщения может приводить к образованию фрактальных структур из НЧ или их агрегатов. В процессе эволюции дисперсных систем могут возникать наномасштабные периодические структуры. Такие структуры, по видимому, формируют трехмерную сетку шунгитового углерода (ШУ), что предопределяет интерес к механизмам агрегации и стабилизации НЧ в шунгитах [11].

В водных коллоидных растворах НЧ углерода механизмы взаимодействия усложняются, поскольку необходимо учитывать короткодействующие ориентационные взаимодействия, включающие в себя систему сопряженных водородных связей молекул воды, формирующей гидратную оболочку НЧ. От структурно-динамических свойств этой оболочки, которая формируется свойствами поверхности НЧ, и молярности расположения активных центров зависят устойчивость системы, кинетика агрегационных процессов и морфология получающихся структур [7].

Исследование водных коллоидов наночастиц ШУ и ультрадисперсного алмаза детонационно-го синтеза позволяет провести сравнительный анализ структур, формирующих эти материалы.

#### СТРУКТУРНАЯ ИЕРАРХИЯ ШУНГИТОВОГО УГЛЕРОДА

Предложена модель двухуровневой структурной организации ШУ [1]. Агрегаты размером десятки-сотни нм описаны с помощью АСМ и просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения в диапазоне размеров от единиц до десятков нм и состоят из фрагментов менее 1 нм. Эти структуры были выделены при обработке водяным паром поверхности шунгитов и в устойчивых водных дисперсиях ШУ.

Методы малоуглового рентгеновского (МУРР) и нейтронного рассеяния (МУНР) позволили охарактеризовать изменение структурных параметров ШУ при различных воздействиях на углерод (МУРР) и подтвердить двухуровневую структурную иерархию с минимальными (основными) структурообразующими фрагментами < 1 нм (МУНР) благодаря методу контрастирования [4].

Устойчивые водные дисперсии получали при обработке ультразвуком порошка < 40 мкм в воде с последующей фильтрацией и центрифугированием дисперсии. Средний радиус частиц в дисперсии, по данным динамического светорассеяния (ДСР), составляет ~50 нм.

Высушенные водные дисперсии наночастиц ШУ были исследованы с помощью ЯМР  $^{13}\text{C}$  и  $^1\text{H}$  высокого разрешения. Сравнение полученных раз-

личных углеродных структур с переходными  $\text{sp}^2$ - и  $\text{sp}^3$ -формами гибридизации позволяет сделать вывод относительно базовой структуры ШУ как изогнутой графеновой плоскости. Используя экранирующее влияние протона на углеродное ядро, метод кросс-поляризации, оценили расстояние между атомом углерода базового фрагмента и атомом водорода, которое составило ~0,8 нм [12].

Масс-спектр водной дисперсии ШУ имеет максимум интенсивности при ~284 m/z, что соответствует массе основного элемента в дисперсии и практически совпадает с данными, полученными при лазерной абляции исходного шунгита (~300 m/z).

Формирование сетки наноразмерных агрегатов при осаждении из водной дисперсии ШУ исследовали с помощью МУРР. В пленке, осажденной из водной дисперсии, выделяются кластеры двух размеров – 7,7 нм и > 30 нм. Эти размеры практически совпадают с размерами глобул и их агрегатов, ранее описанных в исходном шунгите.

При обработке паром определены рост интенсивности сигнала, соответствующего размерности рассеивателя ~0,5 нм (при  $2\theta_{\text{Br}} = 17^\circ$ ). При этом наблюдаемое уменьшение фрактальной размерности с 2,2 до 1,8 ПЭМ и электронная дифракция подтверждают размерность пор и толщину пленок, сформировавшихся после обработки паром в диапазоне 30–50 нм [2].

#### СТРУКТУРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ НАНОАЛМАЗА

Аналогичная двухуровневая организация была получена для ультрадисперсных алмазов (УДА) детонационного синтеза. Так, каждая частица УДА представлена монокристаллическим алмазным ядром, окруженным графеновой «шубой», которая определяет химическое состояние поверхности УДА. В исходном порошке наноалмазные частицы образуют прочные агломераты с размером частиц > 200 нм. Исходный УДА (производитель – Gansu Liru Lingyun NanoMaterial Co., Ltd., Lanjou, Китай) обрабатывали кислотой для удаления примесей и аморфного углерода, а затем измельчали в бисерной мельнице в воде. В качестве мелющих тел использованы циркониевые шарики (< 30 мкм) с последующим центрифугированием, что позволило получить дисперсию наноалмаза (НА) mdsn-D (NanoCarbon Research Institute Ltd., Япония) [6]. Порошок наноалмаза, полученный из mdsn-D дисперсии, был любезно предоставлен профессором Е. Осавой.

Использование ЯМР  $^{13}\text{C}$  и  $^1\text{H}$  высокого разрешения позволило установить наличие фазы  $\text{sp}^2$  (графеновых фрагментов), сохранившейся на поверхности НА [10].

По данным ДСР, дисперсия характеризуется узким распределением частиц по размерам, средний размер – 6 нм [9]. Эксперименты по МУНР с использованием вариации контраста на дисперсиях НА в воде и диметилсульфоксиде

(ДМСО) подтвердили, что первичные частицы НА имеют характерный размер ~6 нм и образуют фрактальные агрегаты с объемной фрактальной размерностью около 2,3 [3].

Вклад неалмазного углерода ( $< 1$  нм) в формирование фрактальной структуры НА при концентрировании водной дисперсии показан с помощью МУНР с использованием метода контрастирования [3].

По-видимому, базовый структурный элемент  $< 1$  нм (графеновый фрагмент) и вода играют важную роль в формировании аналогичной структурной иерархии природного углерода шунгитов и синтетического наноалмаза.

Работа поддержана грантами ОНЗ РАН-5 и SI-Visby-00996/2008.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рожкова Н. Н., Голубев Е. А., Сиклицкий В. И., Байдакова М. В. Структурная организация шунгитового углерода // Фуллерены и фуллереноподобные структуры / Ред. П. А. Витязь и др. М.: ИТМО БАН, 2005. С. 100–107.
2. Рожкова Н. Н., Горленко Л. Е., Емельянова Г. И., Езерский В. А., Лунин В. В. Влияние озона на структуру и физико-химические свойства ультрадисперсных формирований алмаза и шунгитового углерода // Сборник материалов 29-го Всероссийского семинара «Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии». М.: МГУ, 2007. С. 16–32.
3. Avdeev M. V., Rozhkova N. N., Aksenov V. L., Garamus V. M., Willumeit R., Ōsawa E. Aggregate Structure in Concentrated Liquid Dispersions of Ultrananocrystalline Diamond by Small-Angle Neutron Scattering // J. Phys. Chem. C. 2009. Vol. 113. P. 9473–9479.
4. Avdeev M. V., Tropin T. V., Aksenov V. L., Rosta L., Garamus V., Rozhkova N. N. Pore structures in shungites as revealed by small-angle neutron scattering // Carbon. 2006. Vol. 44. № 9. P. 54–61.
5. Kroto H. W., Walton D. R. M. The fullerenes: new horizons for the chemistry, Physics and astrophysics of carbon / Cambridge Univ. Press., 1993. 154 p.
6. Krüger A., Kataoka F., Ōsawa M., Fujino T., Suzuki Y., Aleksenskii A. E., Vul' A. Ya., Ōsawa E. Unusually tight aggregation in detonation nanodiamond: Identification and disintegration // Carbon. 2005. Vol. 43. P. 1722.
7. Lee S., Rossky P. A comparison of the structure and dynamics of liquid water at hydrophobic and hydrophilic surfaces // J. Chem. Phys. 1994. Vol. 100. P. 3334.
8. O'Connell M. J., Bachilo S. M., Huffman C. B. et. al. Band gap fluorescence from individual Single-walled carbon Nanotubes // Science. 2002. Vol. 297. P. 593–596.
9. Ōsawa E. Monodisperse single nanodiamond Particulates // Pure & Appl. Chem. 2008. Vol. 80. P. 1365–1379.
10. Panich A. M., Shames A. I., Vieth H.-M., Takahashi M., Ōsawa E., Vul' A. Ya. Nuclear Magnetic Resonance Study of Ultrananocrystalline Diamonds // Eur. Phys. J. B. 2006. Vol. 52. P. 397.
11. Rozhkova N. N. Role of Fullerene-like Structures in the Reactivity of Shungite Carbon as Used in New Materials with Advanced // Perspectives of Fullerene Nanotechnology, Dordrecht: Kluwer Academic Pub. Properties / E. Ōsawa (ed.). 2002. P. 237–251.
12. Rozhkova N. N., Gribanov A. V., Khodorkovskii M. A. Water mediated modification of structure and physical chemical properties of nanocarbons // Diamond Relat. Mater. 2007. Vol. 16. P. 2104–2108.

## 62-я НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

**19–23 апреля 2010 года**  
**Петрозаводский государственный университет**

Ректорат, Совет по НИРС, общественные организации Петрозаводского государственного университета приглашают принять участие в работе научной конференции, которая аккредитована как мероприятие для проведения II этапа Программы «УМНИК». Подробное описание программы конференции можно найти по адресу: [http://fasie.ru/fund\\_programms/umnik/umnik-index.aspx](http://fasie.ru/fund_programms/umnik/umnik-index.aspx).

Работа конференции пройдет по 89 секциям на 14 факультетах университета.

### СЕКЦИИ КОНФЕРЕНЦИИ:

#### Агротехнический факультет:

1. Агрономия
2. Зоотехния
3. Механизация сельскохозяйственного производства

#### Горно-геологический факультет:

4. Геология и геофизика
5. Горное дело

#### Исторический факультет:

6. Всеобщая история
7. История и культура стран Северной Европы
8. Историко-архивоведения
9. Локальные и микроисторические исследования
10. Отечественная история
11. Карелия в годы Второй мировой войны
12. Музееведение и историко-культурный туризм
13. Историко-культурное наследие Карелии
14. История и иностранные языки

#### Лесинженерный факультет:

15. Технологии и оборудование лесного комплекса
16. Промышленный транспорт и геодезия
17. Технология металлов и ремонт тяговых машин

#### Математический факультет:

18. Алгебра и теория вероятностей
19. Геометрия и топология
20. Математический анализ
21. Прикладная математика
22. Информатика
23. Математическое моделирование систем управления
24. Прикладная математика

#### Медицинский факультет:

25. Акушерство и гинекология
26. Гигиена, экология и санитарная микробиология
27. Теоретическая медицина
28. Невропатология и психиатрия
29. Педиатрия
30. Современные проблемы медицины (на иностранных языках)
31. Терапия № 1

32. Терапия № 2

33. Хирургия № 1

34. Хирургия № 2

35. Общественное здоровье и здравоохранение

36. Медицина в истории

#### Факультет политических и социальных наук:

37. Международные отношения в Европе (региональный аспект)
38. Французский язык («Франция, которая нас объединяет»)
39. Европейские исследования (на английском языке)
40. Отраслевые социальные дисциплины
41. Прикладная политология
42. История и теория политической науки
43. Современные проблемы международных отношений
44. Политические науки
45. Социология культуры
46. Теория и практика социальной работы
47. Технология социальной работы

#### Факультет прибалтийско-финской филологии и культуры:

48. Прибалто-финская филология и культура

#### Строительный факультет:

49. Система автоматизированного проектирования
50. Водоснабжение, водоотведение и гидравлика
51. Реконструкция и реставрация зданий и сооружений
52. Начертательная геометрия и инженерная графика
53. Строительные конструкции

#### Физико-технический факультет:

54. Информационно-измерительные системы и физическая электроника
55. Физика твердого тела
56. Энергетика и электроника

#### Филологический факультет:

57. Германская филология
58. Классическая филология
59. Русский язык

60. История русской литературы XI–XIX веков

61. История русской литературы XX – начала XXI века и журналистика
62. Скандинавская филология и культура

#### Эколого-биологический факультет:

63. Ботаника
64. Экология растений
65. Физиология растений
66. Гидробиология и ихтиология
67. Зоология
68. Молекулярная биология, биологическая и органическая химия
69. Экология
70. Общая химия

#### Экономический факультет:

71. Бухгалтерский учет и аудит
72. Теория и социально-экономическая статистика
73. Деньги, кредит, банки
74. Экономическая теория
75. Экономический анализ
76. Проблемы теории и практики современного менеджмента

#### Юридический факультет:

77. Теория, история государства и права
78. Международное и конституционное право
79. Гражданско-правовые дисциплины
80. Уголовно-правовые дисциплины
81. Право на английском языке

#### Кафедра культурологии

82. История культуры
83. Философия культуры

#### Кафедра педагогики и психологии

84. Педагогика и психология

#### Кафедра философии

85. Философия

#### Кафедра туризма

86. Туризм
87. Гостиничный сервис
88. Ресторанный сервис
89. Проблемы и перспективы развития туризма (на иностранных языках)

### Куратор НИРС:

Варламова Татьяна Валентиновна, доцент кафедры педиатрии

Тел.: 8 (8142) 75-05-90, E-mail: [varlamova@sampo.ru](mailto:varlamova@sampo.ru)



22 декабря 2009 года исполнилось 60 лет со дня рождения доктора биологических наук, профессора, члена-корреспондента РАН, председателя Карельского научного центра РАН, члена редакционного совета нашего журнала *Александра Федоровича Титова*.

### **АЛЕКСАНДР ФЕДОРОВИЧ ТИТОВ К 60-летию со дня рождения**

Александр Федорович Титов родился в г. Петрозаводске. Окончил с отличием биологический факультет ПетрГУ. С 1972 года работает в КарНЦ РАН. В 1976 году успешно защитил кандидатскую диссертацию, а в 1989 году – докторскую. С 1986 года руководит лабораторией экологической физиологии растений Института биологии КарНЦ РАН. С 1991 года является председателем КарНЦ РАН. В 2003 году А. Ф. Титов избран членом-корреспондентом РАН.

Основное направление исследований Александра Федоровича связано с изучением феноменологии и механизмов реакции растений на действие неблагоприятных факторов внешней среды, результаты которых явились значительным вкладом в разработку современных представлений о физиологических основах устойчивости растений. В частности, им (совместно с д. б. н. С. Н. Дроздовым и д. б. н. В. К. Курцом) была выдвинута и экспериментально подтверждена гипотеза «зонального» влияния температуры на устойчивость активно вегетирующих растений. Им же предложена и экспериментально обоснована молекулярно-генетическая гипотеза, объясняющая главные принципы адаптивного ответа растений на действие неблагоприятных температур. Многие годы он возглавляет научную школу «Изучение закономерностей и механизмов влияния условий внешней среды на терморезистентность растений», включенную в список ведущих научных школ России.

А. Ф. Титов – автор более 500 научных работ (в том числе 6 монографий), главный редактор энциклопедии «Карелия» и «Трудов КарНЦ РАН». Он входит в состав Центрального совета Общества физиологов растений России и является сопредседателем Карельского отделения этого общества, членом ряда научных и научно-экспертных советов, научных обществ.

С 1992 года А. Ф. Титов возглавляет кафедру ботаники и методики преподавания биологии ЕГФ КГПА. Под его руководством выполнены и успешно защищены 11 кандидатских и 2 докторские диссертации.

В 2006–2007 годах А. Ф. Титов был членом Общественной палаты РФ. С 1998 года является внештатным советником главы Республики Карелия по науке и вопросам стратегического развития.

А. Ф. Титов награжден орденами Почета и Дружбы, нагрудным знаком «Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации», является заслуженным деятелем науки Республики Карелия и Российской Федерации.

**Поздравляем Александра Федоровича с юбилеем и от всей души желаем ему и всему коллективу Карельского научного центра РАН дальнейших научных свершений!**

*Редакция журнала «Ученые записки Петрозаводского государственного университета»*



15 апреля 2010 года исполняется 60 лет доктору биологических наук, профессору, члену-корреспонденту РАН, директору Института биологии КарНЦ РАН, заведующему кафедрой молекулярной биологии, биологической и органической химии эколого-биологического факультета ПетрГУ, члену редакционной коллегии нашего журнала *Нине Николаевне Немовой*.

### **НИНА НИКОЛАЕВНА НЕМОВА К 60-летию со дня рождения**

Нина Николаевна Немова родилась в 1950 году в г. Беломорске. В 1972 году окончила биологический факультет ПетрГУ. С этого же года работает в лаборатории экологической биохимии Института биологии КарНЦ РАН. В 1982 году защитила кандидатскую диссертацию. С 1989 по 1992 год обучалась в очной докторантуре при Институте биохимии им. А. Н. Баха РАН (Москва). В 1992 году защитила докторскую диссертацию. С 1995 года Нина Николаевна – директор Института биологии КарНЦ РАН. С 1999 года – заведующий кафедрой молекулярной биологии, биологической и органической химии эколого-биологического факультета ПетрГУ. Н. Н. Немова – специалист в области экологической биохимии и энзимологии, читает лекции по общей и частной энзимологии, экологической биохимии и биохимии на эколого-биологическом и медицинском факультетах ПетрГУ. С 2003 года – заведующий лабораторией экологической биохимии Института биологии КарНЦ РАН.

Под руководством Н. Н. Немовой защищено 12 кандидатских и 4 докторские диссертации. В настоящее время она является научным руководителем б аспирантов, руководителем нескольких российских и международных научных проектов, в том числе грантов Президента РФ «Ведущие научные школы РФ», РФФИ, программ ОБН РАН и Президиума РАН, ФЦП и ФЦНТП, Минобрнауки.

Н. Н. Немовой лично и в соавторстве опубликовано более 380 научных и научно-методических работ, из них 10 тематических монографий. Значительная часть научных работ опубликована в ведущих журналах биологического профиля. Она является соавтором патента «Штамм бактерии *Aeromonas sobria* продуцент протективного антигена» (SU183948A1 23.01.1995). Эта разработка имеет важное практическое значение в борьбе с аэромонозом – опасным заболеванием рыб при их разведении.

Н. Н. Немова – член специализированных советов по защите кандидатских и докторских диссертаций. Она входит в состав Бюро Отделения общей биологии РАН, научного совета по ихтиологии и гидробиологии РАН, Президиума центрального совета российского биохимического общества, научных советов по проблемам биохимии, эволюционной физиологии, является членом редколлегий журналов «Биология внутренних вод», «Прикладная биохимия и микробиология». Является заслуженным деятелем науки РК и РФ.

**Поздравляем Нину Николаевну с юбилеем и от всей души желаем крепкого здоровья, счастья, плодотворной научной работы и продолжения сотрудничества с нашим журналом!**



## ЕДИНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К РУКОПИСЯМ, ПРЕДСТАВЛЯЕМЫМ В ЖУРНАЛ

Публикации в журнале подлежат статьи, ранее не печатавшиеся в других изданиях.

Статья предоставляется в распечатанном виде на бумаге формата А4 (в двух экземплярах) и в электронном виде, на носителе или вложении в электронное письмо на адрес редакции журнала. Печатная версия статьи подписывается всеми авторами.

Статья набирается в текстовом редакторе Microsoft Word и сохраняется с расширением .doc. Объем оригинальной и обзорной статьи не должен превышать 1 печатный лист, кратких сообщений – 5–6 страниц, отчетов о конференциях и рецензий на книги – 3 страницы. Поля: верхнее и нижнее – 2 см, правое и левое – 3 см. Абзацный отступ – 0,5 см. Шрифт: Times New Roman, размер – 14 пунктов, аннотация, список литературы – 12 пт, межстрочный интервал – полуторный. Нумерация страниц – справа внизу страницы.

Статья должна состоять из следующих элементов: названию статьи должен предшествовать индекс универсальной десятичной классификации (УДК) в левом верхнем углу. Далее через 1 интервал – название статьи жирным шрифтом заглавными буквами, название должно быть по возможности кратким, точно отражающим содержание статьи. Точка в конце названия статьи не ставится. Сведения об авторе (имя, отчество, фамилия автора (-ов) полностью; ученая степень и звание; место работы: вуз, факультет, кафедра; должность; электронный адрес и контактные телефоны). Аннотация (объемом не более 6 строк) на русском и английском языках, перед ней – название статьи и фамилия (-ии) автора (-ов) также на 2 языках; ключевые слова от 3 до 8 слов (или словосочетаний, несущих в тексте основную смысловую нагрузку) также на двух языках. Все перечисленные элементы статьи отделяются друг от друга пустой строкой и печатаются без абзацного отступа через 1 интервал.

Основной материал статьи и цитат, приводимых в статье, должен быть тщательно выверен автором. Сокращения слов не допускается, кроме общепринятых сокращений химических и математических величин и терминов. Размерность всех физических величин следует указывать в системе единиц СИ.

Список литературы, примечания, комментарии и пояснения по тексту статьи даются в виде концевых сносок. Список литературы должен быть напечатан через одинарный интервал, на отдельном листе. Цитируемая в статье литература (автор, название, место, издательство, год издания и страницы (от и до или количество)) приводится

в алфавитном порядке в виде списка в конце статьи (сначала отечественные, затем зарубежные. Фамилии иностранных авторов приводятся в оригинальной транскрипции). В тексте статьи ссылка на источник делается путем указания в квадратных скобках порядкового номера цитируемой книги или статьи, через точку с запятой – цитируемых страниц, если это необходимо. В книгах иностранных авторов, изданных на русском языке, после заглавия книги через двоеточие указывают, с какого языка сделан перевод. Выходные данные по статьям из журналов и сборников указывают в следующем порядке: фамилия (-ии) автора (-ов) с инициалами, название статьи, через две косые черты – название журнала (год, том, номер, страницы (от и до) или сборника (место издания, год, страницы (от и до))). По авторефератам – фамилия, инициалы, полное название автореферата, после которого ставят двоеточие и указывают, на соискание какой степени и в какой области науки защищена диссертация, место издания, год, страницы.

Таблицы – каждая печатается на отдельной странице, нумеруется соответственно первому упоминанию ее в тексте и снабжается заголовком. Таблицы должны быть предоставлены в текстовом редакторе Microsoft Word (формат .doc). В тексте следует указать место таблицы и ее порядковый номер.

Иллюстрации (рисунки, фотографии, схемы, диаграммы) нумеруются, снабжаются подписями и представляются в виде отдельных растровых файлов (в формате .tif, .jpeg), а в тексте рукописи указывается место, где они должны быть размещены. Для оригиналов (бумажная версия) на обороте каждой иллюстрации ставится номер рисунка, фамилия автора и пометка «верх», «низ». Каждый рисунок (их не должно быть более 5–6) должен иметь название и объяснение всех кривых, цифр, букв и прочих условных обозначений, размещенных под ним. В тексте статьи должна быть ссылка на конкретный рисунок, например (рис. 1).

Статьи, поступившие в редакцию, обязательно рецензируются. Если у рецензентов возникают вопросы, статья возвращается на доработку. Редакция оставляет за собой право внесения редакторских изменений в текст, не искажающих смысла статьи.

Материалы, не соответствующие предъявленным требованиям, к рассмотрению не принимаются.

Решение о публикации принимается редакционной коллегией журнала.

## CONTENTS

### ARCHITECTURE AND CONSTRUCTIONS

*Krilova O. I.*

#### TOWN PLANNING DESIGN OF PETROZAVODSK AT ITS EARLY STAGES

*Summary:* The article analyses the first town planning designs of Petrozavodsk. Consistent characteristics of the town planning design in harmony with Russian town planning traditions and Alexandrovsky plant's effect on the city development are revealed. Present-day lay out of the city represents an integral environment of historical heritage.

*Key words:* Beamlike system, scale, blocks, development, ensemble, historical heritage .....8

*Kosenkov A. Yu.*

#### CLASSIFICATION OF WALLS IN TRADITIONAL KARELIAN WOOD ARCHITECTURE AND NEIGHBORING TERRITORIES OF RUSSIAN NORTH. PART I

*Summary:* Classification of wall structures in traditional wood architecture of the Russian North and a detailed engineering design of one of its "typological trees" employed to build timbered walls are published for the first time. Parameters of used timber, framework development stages, techniques providing buckling resistance of the logs within a wall are reviewed.

*Key words:* Russian North, wood architecture, classification of wall structures, log walls, evolution of effective techniques .....13

*Rochev A. A.*

#### NONLINEAR CALCULATION ALGORITHM FOR CIRCULAR COMPOSITE ARCH

*Summary:* The article reviews the calculation algorithm for the arches with variable cross section. The calculation is carried out with the use of the caution key provisions of the general theory for composite rods offered by A. R. Rzhantsina. In the deformation calculation, expressions obtained by the author are used to determine the equivalent moduli of deformations. The obtained expressions take into account the compressibility of the arch's axis, the shear strain in the bars of the arch, the development of inelastic deformation of the linear and the strain associated with the shape distortion of the arch bar's cross-section. To investigate the stability of the frame, a system of equations for a component arch equilibrium was designed.

*Key words:* Composite arch, equivalent modules' strain, distorted shape of the rods' cross-section, deformation calculations, functional loss of stability .....25

### BIOLOGY

*Shklyarevich G. A., Nemova N. N.*

#### BIOTECHNOLOGY OF PHAEOPHYTA ALGAE-MACROPHYTA REPRODUCTION AND UTILIZATION

*Summary:* The article reviews a set of publications devoted to the problems and perspectives of phaeophyta algae-macrophyta reproduction and utilization.

*Key words:* White Sea, algae, marine macrophytes, marine aquaculture, mariculture, biotechnology of reproduction and utilization .....30

*Gorbach V. V.*

#### TROPHIC CONNECTIONS IN IMAGO OF CLOUDED APOLLO BUTTERFLY PARNASSIUS MNEMOSYNE (LEPIDOPTERA, PAPILIONIDAE) IN ONEGO LAKE BASIN

*Summary:* A spectrum of food connections and nectar sources preferences of the adult (imago) clouded Apollo butterflies were studied in the article. Trophic connections of butterflies with 12 cultures of flower plants were established. Three types of cultures constitute the three main food sources for nearly 90 % of the observed nourishment cases. In early June, emerged adult butterflies feed mainly on dandelions (*Taraxacum officinale*). As soon as the plants cease blossoming, they change over to geranium (*Geranium silvaticum*), and at end of the month they proceed to hawkweed (*Hieracium* spp.), which starts blooming at that time.

*Key words:* Clouded Apollo butterfly, *Parnassius mnemosyne*, adult host-plants, spectrum of food connections, trophic specialization .....38

*Medvedev N. V., Morozov A. K., Sipilä T.*

#### LADOGA RINGED SEAL AS INDICATION OF LADOGA LAKE TECHNOGENIC POLLUTION

*Summary:* The paper presents research results of heavy metal concentration in hair samples of the adult seals *Phoca hispida ladogensis* Nordq and their cubs that perished in 2000–2002. The obtained data are compared with the ones accu-

mulated 10 years earlier (at the beginning of the 1990s). Dynamics of pollutant concentration in pinnipeds are analyzed. A conclusion is drawn that the stress of the environmental pollution on ringed seal population and Ladoga Lake ecosystem during that period decreased.

*Key words:* Ladoga ringed seal, concentration, heavy metals, environmental pollution, dynamics, ecosystem .....43

## FORESTRY

*Raevsky B. V., Tarasenko V. V., Ananyev V. A.*

### QUANTITATIVE ASSESSMENT OF DISTURBANCE RATE IN THE FORESTS OF VODLOZERO NATIONAL PARK

*Summary:* Losses of wood stock in the old-growth spruce forests along the western shoreline of Lake Vodlozero have been assessed with the help of high definition space imagery and GIS digital map database of NP «Vodlozersky». These heavy losses were caused by a large-scale windfall followed by the bark beetle *Ips typographus* outbreak which occurred in 2000–2006.

*Key words:* Multispectral space imagery, GIS, large-scale disturbances, old-growth spruce forests .....47

## MEDICINE

*Belousova G. P., Dorshakova O. V., Lupandin Y. V., Meigal A. Y., Subbotina N. S.*

### CARDIAC RHYTHM REGULATION IN RESIDENTS WITH VERTEBRA-BASILAR INSUFFICIENCY

*Summary:* The study is focused on the elaboration of evaluation criteria for autonomic nervous system status in patients, residing in Karelia, and suffering from chronic vertebra-basilar insufficiency of cerebral circulation. The study is based on the method of cardio-rhythmographic investigation of orthostatic test.

*Key words:* Various heart rhythms, cardio rhythmographic investigation, autonomic nervous system, active orthostatic test .....52

*Novitzkaya A. S., Marusenko I. M.*

### NERVOUS SYSTEM IMPAIRMENT IN PATIENTS WITH SYSTEMIC AND LUPUS ERYTHEMATOSUS

*Summary:* The article reviews features of the central nervous system impairment in systemic lupus erythematosus. The research shows that the most frequent neurological displays of the central nervous system impairment were cephalgic, vestibular and convulsion syndromes. Complex usage of acoustic caused potentials, electroencephalography and magnetic-resonant tomography proved to be of great value in early stages of diagnosis.

*Key words:* Systemic lupus erythematosus, central nervous system, cephalgia, polyneuropathy, meningocephalitis, convulsion syndrome, electroencephalography, magnetic-resonant tomography of the brain .....58

## APPLIED MATHEMATICS

*Shchepalov S. V., Kuznetsov V. A.*

### APPROXIMATE SOLUTION METHOD OF STOCHASTIC PROGRAMMING PROBLEM WITH INCOMPATIBLE RESTRICTIONS

*Summary:* The article deals with the linear stochastic optimization problem of the round wood cutting and planning scheme. The objective is to minimize raw materials consumption. Restrictions are given as probabilities of the linear inequalities fulfillment. Restrictions can be inconsistent. The algorithm of the linear stochastic optimization problem with an inconsistent restriction solution is described in the article.

*Key words:* Stochastic programming, approximate solution, stochastic model, linear optimization, inconsistent restrictions .....62

## ENGINEERING SCIENCE

*Borisov G. A., Kukin V. D.*

### SIMULATION AND OPTIMIZATION METHODS FOR COMMUNICATION NETWORKS

*Summary:* The paper considers the development history of optimization models and methods for communication network on the example of forest road networks. The main attention is focused on the weighed Steiner tree problem. A composite evolutionary algorithm for PC-based solution is emphasized. The paper demonstrates the algorithm application for both forest roads and uniform electricity networks.

*Key words:* Optimization methods, simulation methods, forest road networks, electricity networks .....66

*Pitukhin A. V., Petrov A. N.*

### APPLICATION OF REDUCED EXPONENTIAL-TYPE DISTRIBUTION FOR PROBABILITY AVALUATION OF MOTOR ROADS FAILURE

*Summary:* A problem of low quality, designed, built and in operation highways, including forest roads is discussed. A calculation method of highway reliability is offered. The method is based on the law of exponential-type distribution.

*Key words:* Truncated exponential distribution, defect, road surface, failure .....70

*Shilovsky V. N., Golshtein G. Yu.*

## JUSTIFICATION OF REPLACEMENT CALCULATION METHOD FOR HYDRAULIC GEAR PARAMETRIC FAILURE REMOVAL IN FORESTRY MACHINERY

*Summary:* The article offers methodological approaches and mathematical models of replacement calculations necessary for the parametrical failure removal in details, junctions and aggregates of daily used forest machines.

*Key words:* Recourse allocation, density of recourse allocation, details operation, middle recourse, intensity of deterioration, capacity of technical influence .....73

## PHYSICS

### All Russian seminar for young scientists “Problems and applications of the electrocharged processing in the industry of nanomaterials and nanosystems”

*Bretskikh A. F., Sysun V. I.*

#### ELECTROEROSIVE PROCESSING

*Summary:* The article reviews the physics of electrical erosion and describes the equipment used for cutting, punching, marking, polishing and hardening surfaces of materials.

*Key words:* Electroerosive processing, electrical discharge, erosion, surface .....78

*Golubev M. S., Dzlueva E. S., Ermolenko M. A., Ivanov A. Y., Karasev V. Y.*

#### RESEARCH TECHNIQUES OF PARTICLES ARRANGEMENT IN DUSTY STRUCTURES

*Summary:* The authors applied 3D scanning for the analysis of dusty plasma structures. A method of packing definition for dusty plasma structures is proposed. A pair correlation function of the structures is compared to the ideal  $g(r)$ , built for a model lattice. Positions of the nodes in the model lattice are shifted by random value. The method provides adequate detection of the structure's packing type.

*Key words:* Self-organizing systems, dusty plasma, phase states and transitions in dusty plasma .....83

*Grigor'ev S. V., Devatkov V. N., Denisov V. V., Koval' N. N., Lopatin I. V., Shugurov V. V., Yakovlev V. V.*

#### ELECTRO-DISCHARGE EQUIPMENT AND TECHNOLOGIES FOR NANOSTRUCTURE LAYERS AND COATINGS

*Summary:* Vacuum ion-plasma and electron beam setups for surface modification of materials developed in the Institute of High Current Electronics SB RAS are presented. They are used to conduct ion-plasma cleaning and activation of the detail's surface, its nitriding with the following deposition of heavy duty nanostructured coatings or electron beam surface treatment followed by melting. That changes its phase composition to roughness and hardness (nano patterning).

*Key words:* Plasma, electro-discharge equipment, ion-plasma technologies, nitriding, coating deposition, electron beam, surface modification .....86

*Derbenev I. N., Philippov A. V.*

#### MICROPARTICLE SCREENING IN NON-EQUILIBRIUM PLASMA AND ION CONVERSION

*Summary:* The influence of the ion conversion on the dust particle discharge screening character or sensing electrode with the external source of gas ionization was studied. Volume processes of charged argon plasma particle formation and losses were performed. It was established, that positive ion conversion leads to two-ion plasma content and hence to three-exponential charge screening constants. A comparison of the analytic results with numerical calculation data was performed.

*Key words:* Plasma, nonequilibrium, dusty, screening, conversion .....96

*Rozhkova N. N.*

#### AGGREGATION OF SHUNGITE CARBON AND ULTRADISPERSE DIAMOND NANOPARTICLES

*Summary:* Aggregated structures, formed in stable water dispersions of shungite carbon and ultra dispersed diamond nanoparticles (NP) produced by detonation synthesis, were studied. The stability of water dispersions, the kinetics of aggregation processes and the morphology of resulting structures depend on the structural-dynamic properties of a hydration shell that forms owing to the distinctive surface properties of NPs.

*Key words:* Nanoparticles, shungite carbon, nanodiamond, aggregation .....107

## SCIENTIFIC INFORMATION .....110

## JUBILATION

To the 60<sup>th</sup> Birthday Anniversary of A. F. Titov .....111

To the 60<sup>th</sup> Birthday Anniversary of N. N. Nemova .....112

INFO FOR THE AUTHORS .....113