

ISSN 1998-6629

ВЕСТНИК

САМАРСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА
имени академика С. П. КОРОЛЁВА
(национального исследовательского
университета)

№ 3 (45)

2014

УДК 05
ББК Я5

ВЕСТНИК
САМАРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АЭРОКОСМИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
имени академика С. П. КОРОЛЁВА (национального исследовательского университета)

VESTNIK
of the
SAMARA STATE AEROSPACE UNIVERSITY

№ 3 (45)
2014

Главный редактор

Шахматов Е. В., д.т.н., профессор, СГАУ

Editor in Chief

Shakhmatov Ye. V., Doctor of Sciences (Engineering), Professor, SSAU

Заместители главного редактора

Балакин В. Л., д.т.н., профессор, СГАУ

Прокофьев А. Б., д.т.н., профессор, СГАУ

Deputies Chief Editor

Balakin V. L., Doctor of Sciences (Engineering), Professor, SSAU

Prokofiev A. B., Doctor of Sciences (Engineering), Professor, SSAU

Ответственный секретарь

Прохоров А. Г., к.т.н., доцент, СГАУ

Executive Editor

Prokhorov A. G., Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, SSAU

Реакционная коллегия

Аншаков Г. П., член-корр. РАН

Астафьев В. И., д.ф.-м.н., профессор, СамГТУ

Барвинок В. А., член-корр. РАН

Богатырев В. Д., д.э.н., профессор, СГАУ

Гречников Ф. В., член-корр. РАН

Казанский Н. Л., д.т.н., профессор, СГАУ

Кирилин А. Н., д.т.н., профессор,

ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс»

Комаров В. А., д.т.н., профессор, СГАУ

Кузьмичёв В. С., д.т.н., профессор, СГАУ

Лукачёв С. В., д.т.н., профессор, СГАУ

Сойфер В. А., член-корр. РАН

Шорин В. П., академик РАН

Editorial Board

Anshakov G. P., Corresponding Member of the
Russian Academy of Sciences

Astafiev V. I., Doctor of Sciences (Physics and
Mathematics), Professor, SSTU

Barvinok V. A., Corresponding Member of the
Russian Academy of Sciences

Bogatyryov V. D., Doctor of Sciences (Economics),
Professor, SSAU

Grechnikov F. V., Corresponding Member of the
Russian Academy of Sciences

Kazansky N. L., Doctor of Sciences (Engineering),
Professor, SSAU

Kirilin A. N., Doctor of Sciences (Engineering),
Professor, CSDB

Komarov V. A., Doctor of Sciences (Engineering),
Professor, SSAU

Kuzmichyov V. S., Doctor of Sciences (Engineering),
Professor, SSAU

Lukachyov S. V., Doctor of Sciences (Engineering),
Professor, SSAU

Soifer V. A., Corresponding Member of the Russian
Academy of Sciences

Shorin V. P., Academician of the Russian Academy of
Sciences

Журнал входит в утвержденный ВАК при Минобрнауки России Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук. Журнал включен в общероссийский каталог ОАО «Роспечать». Подписной индекс – 18264

© Самарский государственный
аэрокосмический университет
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

© Samara State Aerospace University
34, Moskovskoye Shosse, Samara
443086, Russian Federation

☎ +7 (846) 267 48 41; e-mail: vest@ssau.ru

СОДЕРЖАНИЕ

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

МОДЕЛИ НАДЁЖНОСТИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИЕМЛЕМОЙ ПЕРИОДИЧНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СТАРЕЮЩЕГО ПАРКА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ <i>В. Н. Писаренко</i>	7
---	---

СТОХАСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМУЩЁННОГО ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В АТМОСФЕРЕ <i>Н. Л. Соколов</i>	16
--	----

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ЭНЕРГЕТИКА

РАЗРАБОТКА МАЛОЭМИССИОННОЙ ДВУХТОПЛИВНОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ <i>А. В. Бубенцов, Д. К. Василюк, П. А. Голубев, Р. Е. Кириченко, В. А. Ташкинов, Б. В. Шошин</i>	25
--	----

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДИСКОВ ГАЗОВЫХ ТУРБИН <i>М. А. Вишняков</i>	34
---	----

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ В СОСТАВНЫХ СТЕРЖНЯХ <i>Т. Д. Каримбаев, Ш. Мамаев</i>	42
--	----

РАСЧЁТ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ МНОГОСЛОЙНОЙ КОНСТРУКЦИИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА «ОБРАТНОЙ МАТРИЦЫ» <i>П. А. Попов, А. С. Осипов, А. А. Синдюков</i>	53
--	----

ОСАЖДЕНИЕ АЛЮМИНИЕВОГО ПОКРЫТИЯ НА ИЗДЕЛИЯ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛИ МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ИЗ ПАРОВОЙ ФАЗЫ АЛЮМООРГАНИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ ДОБАВКИ <i>А. В. Пугин, И. И. Гафуров</i>	61
--	----

ИССЛЕДОВАНИЕ УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ЭЛЕКТРОЛИТОВ ХРОМИРОВАНИЯ И НИКЕЛИРОВАНИЯ <i>Р. К. Салахова, В. В. Семенычев, А. Б. Тихообразов</i>	70
--	----

О ПРИРОДЕ ОБРАЗОВАНИЯ «ЧЁРНЫХ ТОЧЕК» НА ПОВЕРХНОСТИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В ПРОЦЕССЕ АНОДНОГО ОКСИДИРОВАНИЯ <i>В. В. Семенычев, Р. К. Салахова</i>	79
--	----

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЖАРОСТОЙКОГО ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО ПОДСЛОЯ
ДЛЯ ТЕПЛОЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК ГТД**
*Ю. П. Тарасенко, И. Н. Царёва, О. Б. Бердник,
Я. А. Фель, Л. А. Кривина* 85

**УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ОПИСАНИЮ ПОЛОСТЕЙ С РАБОЧЕЙ
СРЕДОЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРО- И ПНЕВМОСИСТЕМ**
Ю. М. Тимофеев, Е. М. Халатов 95

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОСАЖДЕНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ
ПРОДУКТОВ**
С. В. Цаплин, С. А. Большев 109

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

**НЕПАРАКСИАЛЬНЫЙ ИТЕРАЦИОННЫЙ РАСЧЁТ ДИФРАКЦИОННЫХ
ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ, ФОКУСИРУЮЩИХ В СУБВОЛНОВОЕ
СВЕТОВОЕ ПЯТНО**
Е. Ю. Богданова, С. Н. Хонина 122

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ РЕШЁТОК НА ОСНОВЕ
ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЯЧЕЕК**
Д. В. Кириш 130

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕДАЧИ УЛЬТРАКОРОТКОГО ИМПУЛЬСА
ПО ЦЕПОЧКЕ КВАРЦЕВЫХ МИКРОСФЕР**
Е. С. Козлова 138

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

**ЯЗЫКИ ОПИСАНИЯ ОНТОЛОГИЙ ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ
ПРЕДМЕТНЫХ ОБЛАСТЕЙ**
Е. Е. Буракова, Н. М. Боргест, М. Д. Коровин 144

**МЕТОД СЖАТИЯ ЦИФРОВЫХ ПОЛУТОНОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ
НА ОСНОВЕ ЦЕПЕЙ МАРКОВА С НЕСКОЛЬКИМИ СОСТОЯНИЯМИ**
Е. П. Петров, Н. Л. Харина, Е. Д. Ржаникова 159

ЭКОНОМИКА И ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ

**СЕМАНТИЧЕСКИЙ СТАТУС ПОНЯТИЙ «ИННОВАЦИЯ»,
«ИННОВАЦИОННЫЙ ПРОЦЕСС», «ИННОВАЦИОННЫЙ ПРОДУКТ»
(МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ АСПЕКТ)**
Т. Н. Соснина 168

CONTENTS

AVIATION AND ROCKET-SPACE ENGINEERING

- MODELS OF RELIABILITY AND DETERMINATION OF ACCEPTABLE PERIODICITY OF MAINTENANCE OF AGEING AIRCRAFT FLEET**
V. N. Pisarenko 7
- STOCHASTIC METHOD OF INVESTIGATING PERTURBED MOTION OF A SPACE VEHICLE IN THE ATMOSPHERE**
N. L. Sokolov 16

MECHANICAL AND POWER ENGINEERING SCIENCES

- DEVELOPMENT OF A LOW-EMISSION BIFUEL COMBUSTION CHAMBER**
*A. V. Bubentsov, D. K. Vasiluk, P. A. Golubev,
R. E. Kirichenko, V. A. Tashkinov, V. B. Shoshin* 25
- APPLICATION OF THERMOPLASTIC HARDENING FOR RESTORATION OF FATIGUE DURABILITY OF GAS TURBINE DISKS**
M. A. Vishnyakov 34
- PECULIARITIES OF DISTRIBUTION OF DYNAMIC DISTURBANCES IN COMPOSITE RODS**
T. D. Karimbayev, Sh. Mamayev 42
- CALCULATING SOUND INSULATION OF A SANDWICH STRUCTURE ON THE BASIS OF THE «INVERSE MATRIX» METHOD**
P. A. Popov, A. S. Osipov, A. A. Sindjukov 53
- DEPOSITION OF ALUMINUM COATING ON ITEMS MADE OF HIGH-STRENGTH STEEL BY CHEMICAL VAPOR DEPOSITION OF AN ORGANOMETALLIC COMPOUND WITH THE USE OF A CATALYTICAL ADDITIVE**
A. V. Pugin, I. I. Gafurov 61
- SPECIFIC ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF CHROMIUM PLATING AND NICKEL PLATING ELECTROLYTES**
R. K. Salakhova, V. V. Semenychev, A. B. Tihobrazov 70
- THE NATURE OF “BLACK SPOTS” FORMATION ON THE SURFACE OF LARGE PARTS MADE OF ALUMINUM ALLOYS IN THE PROCESS OF ANODIC OXIDISING**
V. V. Semenychev, R. K. Salakhova 79

RESEARCH OF A HEAT-RESISTANT INTERMETALLIC UNDERLAYER FOR THE HEAT-SHIELDING COATING OF GAS TURBINE ENGINE TURBINE BLADES	
<i>Yu. P. Tarasenko, I. N. Tsareva, O. B. Berdnik, Ya. A. Fel, L. A. Krivina</i>	85
UNIVERSAL APPROACH TO THE DESCRIPTION OF WORKING MEDIUM CHAMBERS FOR SIMULATING HYDRAULIC AND PNEUMATIC SYSTEMS	
<i>Yu. M. Timofeyev, E. M. Khalatov</i>	95
RESEARCH OF THE DYNAMICS OF CONDENSED PRODUCT DEPOSITION	
<i>S.V. Tsaplin, S. A. Bolychev</i>	109
ELECTRONICS, MEASURING DEVICES, RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATION	
<hr/>	
NONPARAXIAL ITERATIVE CALCULATION OF DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS FOCUSING IN A SUBWAVE LIGHT SPOT	
<i>E. Y. Bogdanova, S. N. Khonina</i>	122
CRYSTAL LATTICE IDENTIFICATION ON THE BASIS OF ASSESSING UNIT CELL PARAMETERS	
<i>D. V. Kirsh</i>	130
SIMULATION OF ULTRASHORT PULSE TRANSMISSION IN A CHAIN OF FUSED SILICA MICROSPHERES	
<i>E. S. Kozlova</i>	138
CONTROL, COMPUTATIONAL EQUIPMENT AND INFORMATION SCIENCE	
<hr/>	
ONTOLOGY DESCRIPTION LANGUAGES FOR HIGH-TECH FIELDS OF APPLIED ENGINEERING	
<i>E. E. Burakova, N. M. Borgest, M. D. Korovin</i>	144
METHOD OF COMPRESSION OF DIGITAL HALFTONE IMAGES ON THE BASIS OF MARKOV CHAINS WITH SEVERAL STATES	
<i>E. P. Petrov, N. L. Harina, E. D. Rzhanikova</i>	159
ECONOMICS AND HUMANITIES	
<hr/>	
SEMANTIC STATUS OF THE CONCEPTS «INNOVATION», «INNOVATION PROCESS», «INNOVATIVE PRODUCT» (methodological aspect)	
<i>T. N. Sosnina</i>	168

УДК 629.7+656.7

МОДЕЛИ НАДЁЖНОСТИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИЕМЛЕМОЙ ПЕРИОДИЧНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СТАРЕЮЩЕГО ПАРКА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

© 2014 В. Н. Писаренко

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Рассматриваются математические модели технического обслуживания (ТО) воздушных судов (ВС): первая модель простоя ВС на ТО, которая является функцией от количества выполненных периодических ТО, вторая – оптимальной периодичности ТО для поддержания лётной годности в условиях обеспечения заданного уровня надёжности ВС, третья – как оптимизационная модель затрат на ТО ВС и обеспечения максимальной прибыли в условиях рыночной экономики. С использованием теории дифференциальных уравнений, а также теории надёжности и теории восстановления найдены формулы расчёта оптимального планового времени простоя ВС на периодическом ТО для поддержания лётной годности ВС; оптимальной периодичности ТО, оптимального количества периодических обслуживаний ВС в целях обеспечения оптимальной производственной работы и получения максимальной прибыли от лётной эксплуатации. Предложенные модели технической эксплуатации исследованы на предмет определения приемлемой периодичности ТО с учётом рентабельности эксплуатации ВС и рассмотрены на возможность применения для оптимизации ТО стареющего парка ВС гражданской авиации. Произведённые расчёты доказывают необходимость уменьшения периодичности ТО для оптимизации обслуживания и эффективного использования стареющего парка ВС.

Воздушное судно, техническое обслуживание, неисправность, производственный налёт, простой самолёта, оптимизация, надёжность, прибыль.

При определённом налёте часов воздушных судов (ВС) в соответствии с регламентом поддержания лётной годности ВС требуется выполнение периодического технического обслуживания (ТО). Простой ВС на периодическом ТО, а также при устранении отказов и неисправностей систем снижают общий производственный налёт ВС. Внешне кажется, что увеличение периодичности между ТО позволит увеличить производственный налёт ВС и добиться повышения рентабельности эксплуатации. Но это далеко не так в условиях эксплуатации стареющего парка существующей отечественной авиационной техники (АТ), у которой при старении значительно увеличивается простой ВС, обусловленный устранением интенсивно возрастающих отказов и неисправностей, и в этом разберёмся в процессе дальнейшего анализа.

В вопросе назначения периодичности ТО ориентируются на новую зарубежную АТ, у которой по мере эксплуата-

ции постоянно увеличивается периодичность ТО. Но в России сейчас особенно остро стоит задача поддержания лётной годности стареющего парка ВС [1]. Вопрос назначения оптимальной периодичности ТО стареющего парка отечественной АТ в России в настоящее время является актуальным и недостаточно изученным.

Многие учёные в России и за рубежом в своё время пытались подойти к вопросу оптимизации ТО с различных позиций. Так, например, Н.Н. Смирнов, Н.И. Владимиров, Ж.С. Черненко [2], G. Collin [3], предложили решение оптимальной периодичности ТО производить путём определения перечня работ по ТО комплекующих изделий (КИ) АТ, группировки работ по ТО ВС в определённые формы регламента, использования оценки экономического последствия отказа, который может быть предотвращён более частым проведением обслуживания. Н.Н. Смирнов, А.А. Ицкович [4], Р.А. Marks [5]

предложили использование критериев оптимальности процесса технической эксплуатации (ТЭ) на основе полученных доходов от использования ВС в целевом состоянии. В.В. Денисов, В.В. Козарук, В.С. Новиков [6] и S. Jung [7] предложили оценку эффективности ТО производить с помощью коэффициента технического использования, заданной вероятности отказа и прогнозирования технического состояния АТ. В.Г. Воробьёв, В.Д. Константинов, В.Г. Денисов и др. [8], J.P. Fielding [9] предложили расчёт периодичности регламентных работ с использованием потока отказов. Все эти и ряд других учёных затрагивали эксплуатацию АТ в обычных условиях экспоненциального распределения потока отказов с постоянной величиной плотности потока отказов. Но никто не сосредотачивал особое внимание на периодичности ТО стареющего парка ВС исходя из поведения КИ АТ при старении.

Задача данной статьи состоит в том, чтобы определить такую систему технического обслуживания ВС, которая бы упреждала возникающие отказы и неисправности, произвести разработку формул вычисления оптимальной периодичности ТО при старении ВС, используя классическую математическую теорию вероятностей и дифференциальных уравнений, а также теорию восстановления [10].

Старение ВС сопровождается ростом интенсивности отказов [5, 10] и необходимыми профилактическими мероприятиями, компенсирующими деградацию состояния КИ, увеличением простоя ВС на устранение отказов и неисправностей. Для решения поставленной задачи составим математическую модель простоя АТ, произведём моделирование процесса ТЭ ВС разными подходами.

Первая модель ТЭ. Полное время простоя ВС можно определить как функцию от числа выполненных периодических ТО ВС

$$T_{\Pi} = nT_{\text{ТОср}} + \frac{cT_{\text{В}}}{n}, \quad (1)$$

где T_{Π} – полное время простоя ВС за определённый период времени; n – число

выполненных периодических ТО ВС за определённый период времени; $T_{\text{ТОср}}$ – среднее или плановое время простоя ВС на выполнение периодического ТО за определённый период времени; c – постоянный коэффициент, связанный со спецификой обслуживания ВС, учитывающий простои ВС на устранение неисправностей при оперативном ТО; $T_{\text{В}}$ – время простоя ВС на устранение неисправностей при отказах КИ за определённый период времени.

Введём следующие ограничения: функция $T_{\Pi} = f(n)$ непрерывна и ограничена областью $t_{\text{ст}} < t < t_{\text{жц}}$, где t – наработка ВС в процессе эксплуатации, $t_{\text{ст}}$ – начало старения, $t_{\text{жц}}$ – продолжительность жизненного цикла ВС. Для достижения оптимальности функции найдем её экстремум. Для этого дифференцируем функцию (1) относительно n , получаем

$$\frac{dT_{\Pi}}{dn} = T_{\text{ТОср}} - \frac{cT_{\text{В}}}{n^2}. \quad (2)$$

В соответствии с теоремой существования и единственности задачи Коши дифференциальное уравнение (2) имеет единственное решение оптимального числа периодических ТО стареющего парка ВС

$$T_{\text{ТОср}} - \frac{cT_{\text{В}}}{n^2} = 0. \quad (3)$$

Решая уравнение (3), получаем

$$n^2 = \frac{cT_{\text{В}}}{T_{\text{ТОср}}}.$$

Отсюда оптимальное число периодических обслуживаний ВС

$$n^* = \left(\frac{cT_{\text{В}}}{T_{\text{ТОср}}} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

где n^* – оптимальное число периодических ТО ВС для поддержания лётной годности за определённый период времени.

Подставляя (4) в (1), получаем

$$T_{\Pi}^* = \left(\frac{cT_{\text{В}}}{T_{\text{ТОср}}} \right)^{1/2} T_{\text{ТОср}} + \frac{cT_{\text{В}}}{\left(\frac{cT_{\text{В}}}{T_{\text{ТОср}}} \right)^{1/2}}.$$

После преобразования получаем формулу для расчёта полного оптимального времени простоя ВС для поддержания лётной годности

$$T_{\Pi}^* = 2(cT_{\text{ТОср}}T_{\text{В}})^{1/2}, \quad (5)$$

где T_{Π}^* – полное оптимальное время простоя ВС для поддержания лётной годности за определённый период времени.

Рассмотрим влияние надёжности воздушного судна на общее время простоя ВС и оптимизацию периодичности ТО. Для этого составим оптимизационную математическую модель надёжности и среднего времени простоя ВС для поддержания лётной годности.

Оптимизационная модель подчинена следующим правилам и ограничениям:

- отказавшее оборудование заменяется на исправное;
- периодическое обслуживание ВС выполняется через каждые Δt часов, отсчитанных от начального времени после последнего ремонта ВС на авиационном ремонтном заводе.

Для периодического обслуживания интервалы времени ТО запишем как

$$t = t_i + \Delta t, \text{ при } i = 0, 1, 2, \dots; 0 \leq \Delta t < t_i, \quad (6)$$

где t – текущая наработка ВС (в летных часах); t_i – время наступления i -й формы периодического обслуживания; i – номер формы периодического ТО, 0 – нулевое обслуживание после определения эффекта старения; Δt – период времени между обслуживаниями ВС, выраженный в налёте ВС в часах.

Так, например: форма 1 по регламенту РО-90 выполняется при налёте Ту-154М 500 часов, форма 2 выполняется при налёте 1000 часов, затем при налёте 1500 часов вновь выполняется форма 1, при налёте 2000 часов выполняется форма 2, при налёте 2500 часов вновь выполняется форма 1, а при налёте 3000 часов выполняется форма 3 и т.д. Т.е. период времени

между выполнением периодического ТО составляет 500 лётных часов.

Для $i = 1$ и $\Delta t = 0$ поддержание лётной годности обеспечивается периодическим ТО с оптимальной периодичностью через $\Delta t_{\text{опт}}$; надёжность ВС запишем в виде следующего равенства

$$R_t(t = \Delta t_{\text{опт}}) = R(T^{\text{опт}}), \quad (7)$$

где $\Delta t_{\text{опт}}$ – оптимальный промежуток времени между обслуживаниями ВС; $T^{\text{опт}}$ – оптимальная периодичность ТО ВС, $R(T^{\text{опт}})$ – надёжность ВС при оптимальной периодичности ТО.

При увеличении периодичности обслуживания уменьшается надёжность ВС и для $t = 2\Delta t_{\text{опт}}$ и $\Delta t = 0$ имеем

$$R_t(t = 2\Delta t_{\text{опт}}) = [R(T^{\text{опт}})]^2. \quad (8)$$

В этом случае воздушное судно используется в первые часы $\Delta t_{\text{опт}}$ без отказов и неисправностей. Далее в течение других часов $\Delta t_{\text{опт}}$ ВС используется по назначению после того, как будут устранены возникшие отказы и неисправности во время t_i .

При наработке ВС $0 < t_i < \Delta t_{\text{опт}}$ воздушное судно безотказно выполняет авиационные перевозки по расписанию. Таким образом, надёжность ВС обеспечивается его обслуживанием через оптимальный промежуток времени $\Delta t_{\text{опт}}$

$$R_t(t = 2\Delta t_{\text{опт}} + t_i) = [R(T^{\text{опт}})]^2 R(t_i). \quad (9)$$

В общем виде уравнение (9) примет вид

$$R_t(t = t_i + \Delta t_{\text{опт}}) = [R(T^{\text{опт}})]^i R(T^{\text{опт}}),$$

для $i = 0, 1, 2, 3, \dots;$

$$0 \leq t_i < \Delta t_{\text{опт}}. \quad (10)$$

Средняя периодичность ТО означает периодичность времени устранения неисправностей и выполнения периодического ТО для поддержания лётной годности

$$T_{\text{ТО ср}} = \int_0^{\infty} R_t(\Delta t_{\text{ОПТ}}) dt . \quad (11)$$

Оценивая уравнение (11), запишем составной период по диапазону $t_{\text{ст}} < t < t_{\text{жц}}$ следующим образом:

$$T_{\text{ТО ср}} = \sum_{t=0}^{\infty} \int_{t_i}^{t_{(i+1)}} R_t(t) dt . \quad (12)$$

В уравнении (12), составленном из уравнения (11), интервалы времени разделены на длины Δt .

Для $t = t_i + \Delta t$, заменяя в уравнении (12) надёжность выражением (10), получаем

$$T_{\text{ТО ср}} = \sum_{i=0}^{\infty} \int_{t_i}^{\Delta t_{\text{ОПТ}}} [R(T^{\text{ОПТ}})]^i R(T^{\text{ОПТ}}) dt . \quad (13)$$

В уравнении (13) для $t = t_i + \Delta t_{\text{ОПТ}}$, $dt = dt_i$ пределы станут 0 и $\Delta t_{\text{ОПТ}}$.

Таким образом, перестраивая уравнение (13), получаем

$$T_{\text{ТО ср}} = \sum_{i=0}^{\infty} [R(T^{\text{ОПТ}})]^i R(T^{\text{ОПТ}}) dt . \quad (14)$$

С тех пор как

$$\sum_{i=0}^{\infty} [R(T^{\text{ОПТ}})]^i = \frac{1}{1 - R(T^{\text{ОПТ}})} \quad (15)$$

уравнение (13) становится следующим

$$T_{\text{ТО ср}}^* = \frac{\int_0^{\Delta t_{\text{ОПТ}}} R(T^{\text{ОПТ}}) d\Delta t_{\text{ОПТ}}}{1 - R(T^{\text{ОПТ}})} , \quad (16)$$

где $T_{\text{ТО ср}}^*$ – оптимальное плановое время простоя для поддержания лётной годности ВС при оптимальной периодичности ТО за определённый период времени, час; $\Delta t_{\text{ОПТ}}$ – оптимальный период времени между периодическим ТО ВС; $R(T^{\text{ОПТ}})$ –

надёжность ВС при оптимальной периодичности ТО.

Таким образом, потребность в повышении надёжности ВС задаёт время простоя самолета на поддержание лётной годности. Используя данные по надёжности ВС и зная распределение среднего времени наработки на отказ, можно определить среднюю периодичность ТО стареющего парка для поддержания лётной годности ВС.

Вторая модель ТЭ. Эта модель подобна первой модели ТЭ. Модель можно использовать, чтобы определить оптимальную периодичность ТО ВС и минимизировать время простоя ВС. В этой оптимизационной системе полное время простоя является функцией времени наработки ВС или частоты периодического ТО. Математически вторая оптимизационная модель определяется следующей функцией:

$$T_{\Pi}(t) = T_{\text{ТО ср}}(t) + T_B(t) = \frac{t}{\theta} + \frac{\lambda(t)}{\mu} , \quad (17)$$

где $T_{\Pi}(t)$ – общее время простоя ВС в единицу времени; $T_{\text{ТО ср}}(t)$ – время простоя ВС на выполнение ТО в единицу времени; $T_B(t)$ – время простоя ВС на устранение отказов и неисправностей в единицу времени; t – наработка ВС; $\lambda(t)$ – интенсивность отказов на воздушном судне; μ – скорость устранения неисправностей; $1/\theta$ – коэффициент средней продолжительности технического обслуживания – отношение средней продолжительности периодического ТО к периодичности ТО, т.е. $1/\theta = T_{\text{ТО ср}} / \Delta t$, где Δt – период времени между ТО ВС.

Дифференцируя функцию (17) относительно t , получаем

$$\frac{dT_{\Pi}(t)}{dt} = \frac{1}{\theta} + \frac{d\lambda(t)}{d(t_i)} \cdot \frac{1}{\mu} . \quad (18)$$

Необходимое условие экстремума функции (18) даёт следующий результат

$$\frac{d\lambda(t)}{dt} = -\frac{\mu}{\theta} \quad (19)$$

Периодичность технического обслуживания будет оптимальная, когда левые и правые стороны формулы (19) будут равны. При этом время простоя ВС будет минимальное.

Примем, что интенсивность отказов систем ВС определяется формулой

$$\lambda(t) = fe^{-t}, \quad (20)$$

где f – функция интенсивности отказов систем ВС при $t = 0$.

Заменяя в формуле (19) интенсивность отказов из формулы (20), получаем

$$fe^{-t} = -\frac{\mu}{\theta} \quad (21)$$

Таким образом, равенство (21) даёт формулу для вычисления оптимальной периодичности ТО ВС

$$\Delta t^{\text{ОПТ}} = \ln \left[\frac{f\theta}{\mu} \right] \quad (22)$$

Подставляя в формулу (22) вместо функции интенсивности отказов (f) выражение $\frac{\lambda(t)}{e^{-t}}$, получаем

$$\Delta t^{\text{ОПТ}} = \ln \left[\frac{\lambda(t) \cdot \theta}{\mu \cdot e^{-t}} \right], \quad (23)$$

где $\Delta t^{\text{ОПТ}}$ – оптимальная периодичность выполнения ТО; $\lambda(t)$ – интенсивность отказов и неисправностей на ВС; μ – скорость восстановления отказов и неисправностей, $1/\theta$ – коэффициент средней продолжительности ТО.

Рассмотрим *третью оптимизационную модель ТЭ*. Если ВС обслуживается слишком часто, имеется опасность, что ТО может быть более дорогостоящим из-за таких факторов, как потеря производ-

ственного налёта, увеличение затрат на эксплуатационные материалы и заработную плату, чем потери из-за простоя ВС на устранение неисправностей при редком обслуживании. Эта модель ТЭ развита из условий современных рыночных отношений обеспечения максимальной прибыли при эксплуатации ВС. В модели использованы следующие правила и ограничения: работоспособность ВС восстанавливается при каждом периодическом ТО, интенсивность отказов КИ ВС и функция периодического ТО – величины постоянные; время периодического ТО и устранения неисправностей распределено по экспоненте; распределение неисправностей и скорости восстановления неисправностей ВС – постоянные величины.

Для развития уравнений модели использованы следующие символы: n – количество ТО, выполненных в единицу времени; $1/\theta$ – средняя продолжительность ТО; Π – прибыль от лётной эксплуатации ВС без учёта времени простоя ВС в единицу времени; $C_{\text{срТО}}$ – средняя стоимость ТО ВС в единицу времени; $C_{\text{В}}$ – средняя стоимость устранения неисправностей на ВС в единицу времени; $\lambda(t)$ – интенсивность возникновения отказов и неисправностей на ВС; μ – скорость устранения отказов и неисправностей.

Прибыль от эксплуатации ВС определяется следующей формулой

$$\begin{aligned} \Pi &= D - \zeta \cdot T_{\text{срТО}} - \zeta \cdot T_{\text{В}} - C_{\text{срТО}} - C_{\text{В}} = \\ &= D - \frac{B \cdot n}{\theta} - \frac{B\lambda(t)}{\mu} - \frac{n \cdot S_{\text{ТО}}}{\theta} - \frac{S_{\text{В}} \cdot \lambda(t)}{\mu}, \end{aligned} \quad (24)$$

где D – доходы от лётной эксплуатации ВС; ζ – стоимость одного часа простоя воздушного судна; $T_{\text{срТО}}$ – простой ВС на ТО; $T_{\text{В}}$ – простой ВС на устранении отказов и неисправностей; $C_{\text{срТО}}$ – средняя стоимость технического обслуживания; $C_{\text{В}}$ – средняя стоимость устранения отказов и неисправностей; $S_{\text{ТО}}$ – затраты на каждое ТО ВС; $S_{\text{В}}$ – затраты на каждое устранение отказа и неисправности ВС;

B – плановая выручка от использования ВС по назначению, руб./час налёта ВС.

Дифференцируя (24) относительно n , получаем

$$\frac{d\Pi}{dn} = -\frac{B}{\theta} - \frac{Bd\lambda(t)}{\mu dn} - \frac{S_{TO}}{\theta} - \frac{S_B d\lambda(t)}{\mu dn}. \quad (25)$$

Обнуление (25) и последующие преобразования дают следующее равенство

$$\frac{d\lambda(t)}{dn} = -\left[\frac{1}{\theta}(B + S_{TO})\right] / \left(\frac{B}{\mu} + \frac{S_B}{\mu}\right). \quad (26)$$

Периодичность n будет оптимальная, когда обе стороны формулы (26) равны, в этом случае прибыль будет максимальной.

Предположим, что интенсивность появления неисправностей воздушного судна определяется формулой (20). Использование (20) в (26) даёт следующее равенство

$$-fe^{-t} = \left[\frac{1}{\theta}(B + S_{TO})\right] / \left(\frac{B}{\mu} + \frac{S_B}{\mu}\right). \quad (27)$$

Преобразовав (26), получаем

$$n^{OPT} = \ln \left[\frac{\lambda(t) \cdot \theta \cdot (B + S_{TO})}{\mu \cdot e^{-t} \cdot (B + S_B)} \right], \quad (28)$$

где n^{OPT} – оптимальное количество периодических ТО ВС за определённый период времени; $\lambda(t)$ – интенсивность отказов на ВС; S_{TO} – затраты на каждое ТО ВС; S_B – затраты на каждое устранение отказа и неисправности ВС; B – плановая выручка от использования ВС по назначению, руб./час налёта ВС.

Эта модель может использоваться для вычисления оптимальной периодичности технического обслуживания ВС в условиях рыночной экономики для обеспечения максимальной прибыли от лётной эксплуатации.

Произведём проверку достоверности результатов работы путем выполнения

нижеследующих вычислений примера 1 и анализа результатов произведённых вычислений.

Пример 1. Исходные данные [1, 11]. Стандартное ТО ВС типа Ту-154М производится через 500 часов при выполнении регламента обслуживания РО-90. Средняя наработка на отказ КИ по статистическим данным авиакомпании «Самара» за 2008 г. составила 25000 ч. Плотность потока отказов КИ $\lambda(t) = 4 \cdot 10^{-5}$ час⁻¹, $\mu = 0,125$. Срок эксплуатации ВС – 25 лет, стоимость ТО $S_i = 5 \cdot 10^5$ руб., стоимость устранения отказа и неисправности $S_r = 5 \cdot 10^4$ руб. Среднее время простоя ВС на каждом ТО – 54 часа. Среднее время устранения одной неисправности – 8 часов в каждые 5 дней. Средний налёт одного ВС в год – 1800 ч. $c=2,5$; $n = 3,6$ обл./год; $R(t) = 0,00027$; $B = 3 \cdot 10^6$ руб./ч.

По формуле (4) вычисляем оптимальное число обслуживаний в год:

$$n^* = \left(\frac{cT_B}{T_{ТО\text{ср}}} \right)^{1/2} = \left(\frac{2,5 \cdot 8 \cdot 360 / 5}{54} \right)^{1/2} = 5,164.$$

Оптимальная периодичность ТО, исходя из оптимального числа обслуживаний в год и планового налёта ВС,

$$\Delta t_I^{OPT} = 1800 / 5,164 = 348,6 \text{ лётных часов.}$$

Полное оптимальное плановое время простоя ВС на периодическом ТО для поддержания лётной годности определяем по формуле (5)

$$T_{II}^* = 2(cT_{ТО\text{ср}}T_B)^{1/2} = 2(2,5 \cdot 54 \cdot 8)^{1/2} = 65,73 \text{ ч.}$$

Оптимальную периодичность ТО в месяц, исходя из плотности потока отказов и скорости восстановления отказов и неисправностей, определяем по формуле (23)

$$\Delta t^{OPT} = \ln \left[\frac{\lambda(t) \cdot \theta}{\mu \cdot e^{-t}} \right] = \ln \left[\frac{4 \cdot 10^{-5} \cdot 1}{0,125 e^{-150}} \right] = 141,96 \text{ ч.}$$

Оптимальное количество периодических ТО в год, исходя из требований

получения максимальной прибыли, определяем по формуле (28)

$$n^{OPT} = \ln \left[\frac{\lambda(t) \cdot \theta \cdot (B + S_i)}{\mu \cdot e^{-t} \cdot (B + S_r)} \right] =$$

$$= \ln \left[\frac{4 \cdot 10^{-5} \cdot 1 \cdot (3 \cdot 10^6 + 5 \cdot 10^5)}{0,125 \cdot (3 \cdot 10^6 + 5 \cdot 10^4) e^{-1800}} \right] = 1792,1ч,$$

или 4,9 обсл./год.

Оптимальный налёт ВС для выполнения периодического ТО, исходя из требований получения максимальной прибыли

$$\Delta t_2^{OPT} = 1800/4,9 = 367,3 \text{ лётных час.}$$

При обслуживании стареющего парка ВС типа Ту-154М целесообразно вернуться от обслуживания по регламенту РО-90 через 500 часов к обслуживанию по регламенту РО-86 через 300 часов налёта ВС.

Таким образом, поставленные задачи решены, выполнено моделирование ТЭ стареющего парка ВС. Полученные в данной работе формулы позволяют определить оптимальную периодичность ТО, продолжительность ТО и подтверждают необходимость уменьшения налёта часов при обслуживании стареющих ВС и увеличения количества обслуживаний на планируемый период с целью оптимального поддержания лётной годности и эффективного использования стареющего парка АТ.

Библиографический список

1. Шапкин В.С. Состояние и перспективы развития гражданской авиации России // Доклад Генерального директора ГосНИИ ГА на коллегии гражданской авиации Минтранса России 28.02.2011 г.
2. Смирнов Н.Н., Владимиров Н.И. и др. Техническая эксплуатация летательных аппаратов. М.: Транспорт, 1990. 423 с.
3. Collin G. La maintenance des moteurs: des budgets tress lourds // Air et Cosmos. 1981. V.18, no 846. P. 195-219.
4. Смирнов Н.Н., Ицкович А.А. Обслуживание и ремонт авиационной техники по состоянию. М.: Транспорт, 1987. 272 с.
5. Marks P.A. Design for Economy // Aircraft Engineering. 1981. V.53, no 3. P. 11-15.
6. Денисов В.Г., Козарук В.В. и др. Техническая эксплуатация пилотажно-навигационных комплексов. М.: Транспорт, 1992. 296 с.
7. Jung S. Houe Verfahren und Methoden der technischen Diagnostic und prognostic beim Tribwerk NK -8-4 // Techn. – okon. inf. Ziv. Luftfahit. 1981. V.17, no. 4. P. 193-195.
8. Воробьев В.Г., Константинов В.Д. и др. Техническая эксплуатация авиационного оборудования. М.: Транспорт, 1990. 296 с.
9. Fielding J.P. How Do Aircraft Break Down? Some Studies of Reliability Data Feedback // Aircraft Engineering. 1980. V.52, no. 11. P. 15-19.
10. Кокс Д., Смит В. Теория восстановления. М.: Советское Радио, 1967. 299 с.
11. Далецкий С.В. Формирование эксплуатационно-технических характеристик воздушных судов гражданской авиации. М.: Воздушный транспорт, 2005. 416 с.

Информация об авторе

Писаренко Виктор Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации авиационной техники, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика

С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: eat@ssau.ru. Область научных интересов: управление производственными процессами эксплуатации авиационной техники.

MODELS OF RELIABILITY AND DETERMINATION OF ACCEPTABLE PERIODICITY OF MAINTENANCE OF AGEING AIRCRAFT FLEET

© 2014 V. N. Pisarenko

Samara State Aerospace University, Russian Federation

Mathematical models of aircraft maintenance are discussed in the paper. The first model is that of aircraft downtime, which is a function of the number of periodically performed technical operations. The second model is that of optimal maintenance periodicity to support airworthiness in conditions of providing a given level of aircraft reliability. The third model is an optimization model of aircraft maintenance costs and providing maximum profit in market economy conditions. Using the theory of differential equations as well as the theories of reliability and renewal formulae of calculating optimal allotted aircraft downtime during periodic technical operations aimed at supporting the airworthiness as well as the formulae of optimal maintenance periodicity, optimal number of maintenance operations and getting maximum profits from flight operations have been found. The proposed models are investigated with a view to specifying acceptable maintenance periodicity with regard for the cost-benefit ratio of aircraft maintenance and the possibility of using them to optimize the maintenance of the ageing fleet of civil aviation. The calculations made show the necessity of decreasing maintenance periodicity in order to optimize the servicing and efficient use of the aircraft ageing fleet.

Aircraft, maintenance, fault, industrial use, fleet age, airplane downtime, optimization, reliability, profit.

References

1. Shapkin V.S. Condition and prospects of development of civil aviation of Russia // Report of the General Director of the State research institute of civil aviation at the meeting of the board of civil aviation of the ministry of transport of Russia 28.02.2011.
2. Smirnov N.N., Vladimirov N.I. et al. Tekhnicheskaya ekspluatatsiya letatel'nykh apparatov [Aircraft maintenance]. Moscow: Transport Publ., 1990. 423 p.
3. Collin G. La maintenance des moteurs: des budgets tres lourds // Air et Cosmos. 1981. V. 18, no. 846. P. 195-219.
4. Smirnov N.N., Itskovich A.A. Ob-sluzhivanie i remont aviatsionnoy tekhniki po sostoyaniyu [Maintenance and repair of aeronautical equipment on condition]. Moscow: Transport Publ., 1987. 272 p.
5. Marks P.A. Design for Economy // Aircraft Engineering. 1981. V. 53, No. 3. P. 11-15.
6. Denisov V.G., Kozaruk V.V. et al. Tekhnicheskaya ekspluatatsiya pilotazhno-navigatsionnykh kompleksov [Maintenance of navigation instrumentation]. Moscow: Transport Publ., 1992. 296 p.
7. Jung S. Houe Verfahren und Methoden der technischen Diagnostic und prognostic beim Tribwerk // Techn. –okon. inf. Ziv. Luftfahrt. 1981. V. 17, No. 4. P. 193-195.
8. Vorobiev V.G., Konstantinov V.D. et al. Tekhnicheskaya ekspluatatsiya aviatsionnogo oborudovaniya [Maintenance of aeronautical equipment]. Moscow: Transport Publ., 1990. 296 p.
9. Fielding J.P. How Do Aircraft Break Down Some Studies of Reliability Data

Feedback // Aircraft Engineering. 1980. V. 52, no. 11. P. 15-19.

10. Cox D., Smit V. Teoriya vostanovleniya [Renewal Theory]. Moscow: Sovetskoe radio Publ., 1967. 229 p.

11. Daleckii S.V. Formirovanie ekspluatatsionno-tekhnicheskikh kharakteristik vozdushnykh sudov grazhdanskoy aviatsii [Formation of physical and operational characteristics of civil aircraft]. Moscow: Vozdushnyy transport Publ., 2005. 416 p.

About the author

Pisarenko Viktor Nikolaevitch, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Aircraft Maintenance, Samara State Aerospace University,

Russian Federation. E-mail: eat@ssau.ru.
Area of Research: control of industrial processes of aeronautical equipment maintenance.

УДК 629.782

СТОХАСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМУЩЁННОГО ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В АТМОСФЕРЕ

© 2014 Н. Л. Соколов

Федеральное государственное унитарное предприятие
«Центральный научно-исследовательский институт машиностроения», г. Королёв

При движении космических аппаратов (КА) в атмосфере точный учёт влияния внешних возмущающих факторов затруднителен: они либо неизвестны, либо имеют сложный характер. Это вызывает необходимость в разработке методов решения задач управления КА в условиях неопределённости.

Разработан стохастический метод исследования возмущённых траекторий движения космического аппарата в атмосфере. Метод основан на использовании математической теории непрерывных марковских процессов. Применён принцип редукции от детерминированного описания движения КА к стохастическому. Предполагалось, что КА может находиться в ограниченном числе состояний, которые определяются заранее выбранным алгоритмом дискретизации фазового пространства. Составлены дифференциальные уравнения Колмогорова для определения вероятностей нахождения космического аппарата в каждом из состояний и зависимости для расчёта математических ожиданий фазовых координат КА. Разработаны и обоснованы соотношения для расчёта интенсивностей переходов КА из одного состояния в другое. Предложены пути сокращения продолжительности вычислительного процесса расчёта траекторий полёта КА, сформулированы аналитические зависимости для определения значений фазовых координат.

Приведены численные результаты расчёта траекторий движения в широком диапазоне краевых условий проектных характеристик КА. Показана принципиальная возможность использования разработанного метода для анализа движения КА в атмосфере в условиях неопределённости полётных ситуаций.

Стохастический метод, космический аппарат, полёт в атмосфере, возмущённое движение, марковские процессы, уравнения Колмогорова, дискретизация фазового пространства, интенсивности переходов, вероятность нахождения КА в заданных состояниях.

Введение

При полёте КА в атмосфере точный учёт внешних возмущающих сил затруднителен, так как они либо неизвестны, либо имеют сложный характер. К таким внешним воздействиям можно отнести вариации плотности атмосферы, ветер, турбулентное движение воздуха, погрешности отработки управляющих воздействий и измерений и т. д. Указанные обстоятельства приводят к необходимости разработки новых методов исследования задач движения КА в условиях неопределённости.

В настоящей работе предлагается стохастический метод исследования возмущённого движения КА в атмосфере, базирующийся на использовании математического аппарата теории марковских

процессов [1, 2]. Разработаны алгоритмы вычисления статистических характеристик терминальных параметров движения спускаемого аппарата без проведения массовых расчетов возмущённых траекторий, что позволит существенно сократить время определения количественных оценок точности посадки КА. В основу разработки алгоритмов положена редукция от детерминированного описания движения фазовой точки к стохастическому [3].

Стохастическое представление движения КА

Детерминированное представление движения КА в атмосфере описывается системой дифференциальных уравнений [4]:

$$\begin{aligned}
 f_1 &= \frac{dx_1}{dt} = \frac{dV}{dt} = -\frac{C_x S \rho V}{2m} - g \sin \theta, \\
 f_2 &= \frac{dx_2}{dt} = \frac{d\theta}{dt} = \frac{C_y S \rho V}{2m} \cos \gamma - \\
 &\quad - \frac{g}{V} \cos \theta + \frac{V}{r} \cos \theta, \\
 f_3 &= \frac{dx_3}{dt} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{C_y S \rho V \sin \gamma}{2m \cos \theta} - \\
 &\quad - \frac{V}{r} \cos \theta \cos \varepsilon \operatorname{tg} \varphi, \\
 f_4 &= \frac{dx_4}{dt} = \frac{dh}{dt} = V \sin \theta, \\
 f_5 &= \frac{dx_5}{dt} = \frac{dL}{dt} = \frac{VR \cos \theta \cos \varepsilon}{r \cos \varphi}, \\
 f_6 &= \frac{dx_6}{dt} = \frac{dL_\delta}{dt} = \frac{VR}{r} \cos \theta \sin \varepsilon,
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\varphi = L_\delta / R, \quad g = \mu / r^2,$$

$$\rho = \rho_0 \exp(-\beta h), \quad r = R + h.$$

Здесь V – скорость движения КА; θ – угол наклона вектора скорости к местному горизонту; ε – угол между проекцией вектора скорости на местный горизонт и местной параллелью; h – высота полёта КА; r – радиус-вектор, соединяющий центр Земли и центр масс КА; L – продольная дальность полёта; L_δ – боковая дальность полёта; t – время; ρ – плотность атмосферы; ρ_0 – плотность атмосферы на поверхности Земли; β – логарифмический коэффициент изменения плотности атмосферы от высоты; S – площадь миделева сечения; C_x, C_y – аэродинамические коэффициенты лобового сопротивления и подъёмной силы соответственно; m – масса КА; γ – угол крена; φ – геодезическая широта подспутниковой точки полёта КА; R – средний ра-

диус Земли; μ – произведение гравитационной постоянной на массу Земли; g – ускорение свободного падения.

Будем считать, что движение КА представлено в виде нестационарных пуассоновских потоков событий, состоящих в последовательных переходах аппарата из одного состояния в другое [3]. Это позволяет использовать математический формализм теории марковских процессов.

Предполагается, что КА может находиться в конечном числе состояний, которые определяются заранее выбранным алгоритмом дискретизации фазового пространства. Каждое состояние характеризуется шестимерным вектором i_k ($k = 1, 2, \dots, 6$) фазовых координат. Нахождение КА в каждом состоянии определяется вероятностью $P(i_k)$. Причём $\sum_{i_1}^{J_1} \dots \sum_{i_6}^{J_6} P(i_k) = 1$.

При известных значениях $P(i_k)$ математическое ожидание фазовых координат КА может быть рассчитано по формуле:

$$M[x_k] = \sum_{i_1=1}^{J_1} x_k(i_1) \sum_{i_2=i_3=i_4=i_5=i_6=1}^{J_2} \sum_{i_3}^{J_3} \sum_{i_4}^{J_4} \sum_{i_5}^{J_5} \sum_{i_6}^{J_6} P(i_k), \tag{2}$$

где J_k – количество уровней дискретизации на k -й оси шестимерного фазового пространства.

При изменении вероятностей $P(i_k)$, очевидно, изменяется и вектор математических ожиданий $M[x_k]$; тем самым моделируется движение КА.

Согласно закону распределения Пуассона вероятность одного случайного события (в рассматриваемом случае вероятность одного перехода в заданное состояние в единицу времени) определяется формулой

$$P(t) = \lambda(t) e^{-\lambda(t)}.$$

Интенсивности пуассоновских потоков будем принимать равными нормированным значениям правых частей диффе-

ренциальных уравнений (1) в фиксированных фазовых состояниях:

$$\lambda(t) = \sum_{k=1}^6 \frac{|f_k|}{\Delta x_k},$$

где Δx_k – интервал разбиения по k -й оси.

$$\lambda_3(2,1,2,1,2,2) = \frac{1}{\Delta \varepsilon} \left| \frac{C_y S \rho_0 \exp(-\beta h(1)) V(2) \sin \gamma}{2m \cos \theta(1)} - \frac{V(2) \cos \theta(1) \cos \varepsilon(2) \operatorname{tg} \phi(2)}{r(1)} \right|.$$

Для определения вероятности нахождения КА в каждом из заданных состояний составим систему дифференциальных уравнений Колмогорова. Общее

$$\frac{dP(i_k)}{dt} = -P(i_k) \sum_{k=1}^6 \lambda_k(i_k) + \sum_{i=1}^6 P(i_{k,k \neq j}, i_j - 1) \lambda_j(i_{k,k \neq j}, i_j - 1) \quad (3)$$

Причём если $i_j = 1$ (состояние является начальным по j -й координате), то $\lambda_j(i_{k,k \neq j}, i_j - 1)$ будет равно нулю. В результате получим систему обыкновенных линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами размерности

$$N = \prod_{k=1}^6 J_k.$$

Таким образом, пространственное движение КА в атмосфере, описываемое дифференциальными уравнениями (1), может быть также представлено в стохастическом варианте, т.е. в виде системы из N линейных дифференциальных уравнений для вероятностей переходов (3) и аналитических зависимостей (2) для вычисления вектора математических ожиданий фазовых координат.

Методика учёта возмущающих факторов

Рассмотрим представление движения КА, подвергающегося влиянию случайных возмущающих факторов. При этом в качестве базового будем использовать стохастический вариант, основное преимущество которого перед детерминированным состоит в принципиальной воз-

можности учёта в правых частях дифференциальных уравнений слагаемых, характеризующих случайные воздействия. Общий вид исходной системы дифференциальных уравнений КА следующей:

уравнение для произвольного состояния с координатами i_k имеет вид

можности учёта в правых частях дифференциальных уравнений слагаемых, характеризующих случайные воздействия.

Общий вид исходной системы дифференциальных уравнений КА следующей:

$$\dot{x} = f(x, u, t) + G(x, t) \xi(t), \quad (4)$$

где x, u – векторы фазовых переменных и управления, $G(x, t)$ – матрица размером $k \times k$ (в рассматриваемом случае $k = 6$).

Для представления процессов, описываемых системой (4), с помощью марковской цепи воспользуемся уравнением Фоккера–Планка–Колмогорова (ФПК-уравнение) [3]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} (a_j \rho) + \frac{1}{2} \sum_{j,k} \frac{\partial^2}{\partial x_j \partial x_k} (b_{jk} \rho).$$

Здесь ρ – плотность вероятности. Коэффициенты $a(x, u, t)$ и $b(x, t)$ являются числовыми (не случайными) функциями. Физически $a(x, u, t)$, $b(x, t)$ характеризуют скорость изменения функции $x(t)$ и условной дисперсии случайной функции $f(t)$ соответственно. Коэффициенты

$a_j(x, u, t)$ и $b_{jk}(x, t)$ определяются из уравнений

$$a_j(x, u, t) = f_j(x, u, t),$$

$$b_{jk}(x, t) = \sum_{i=1}^6 g_{ji}(x, t) g_{ik}(x, t).$$

$$\frac{dP(i_k)}{dt} = -P(i_k) \sum_{k=1}^6 [\lambda_k(i_k) + \mu_k(i_k)] + \sum_{j=1}^6 P(i_{k,k \neq j}, i_j - 1) [\lambda_j(i_{k,k \neq j}, i_j - 1) + \mu_j(i_{k,k \neq j}, i_j - 1)], \quad (5)$$

при $i_j = 1$ $\lambda_j(i_{k,k \neq j}, i_j - 1) = 0$.

Величины μ_j можно интерпретировать как мгновенные значения интенсивностей потоков, переводящих КА в соседние состояния в результате воздействия случайных функций. В общем случае величина μ_j вычисляется по формуле

$$\mu_j = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^6 \frac{b_{jk}}{\Delta x_j \Delta x_k}.$$

В частности, если исходная матрица $G(x, t)$ диагональна, то значения μ_j определяются зависимостью

$$\mu_j = \frac{1}{2} \frac{g_{jj}^2}{\Delta x_j^2}.$$

Нетрудно видеть, что при $\mu_j = 0$ (отсутствие возмущений) общее уравнение (5) совпадает с уравнением (3).

Итак, интегрируя систему N дифференциальных уравнений типа (5) и используя полученные значения вероятностей $P(i_k)$ для вычисления математических ожиданий (2), можно определить траекторию движения КА в атмосфере с учётом влияния случайных возмущающих

Проведём дискретизацию фазового пространства подобно тому, как это делалось для варианта без возмущений. Общее уравнение Колмогорова для произвольного состояния с координатами i_k ($k = 1, 2, \dots, 6$) запишется следующим образом:

воздействий с известными статистическими характеристиками.

Пути сокращения продолжительности вычислительного процесса

При использовании предложенного метода расчёта возникают трудности, связанные с большой размерностью полученной системы дифференциальных уравнений. Так, даже при достаточно крупной дискретизации – при разбиении каждой из координатных осей на пять интервалов – получим 15625 уравнений, численное решение которых сопровождается исключительно большой продолжительностью вычислительного процесса. Рассмотрим некоторые пути его сокращения.

Преобразуем к стохастическому виду только первые три дифференциальных уравнения системы (1) – уравнения динамики движения КА, а переменные, изменение которых описывается кинематическими соотношениями (h, L, L_{σ}) , будем определять по приближённым аналитическим формулам в зависимости от параметров V, θ, ε [5]:

$$h = -\beta \ln \frac{\theta^2 + A_2}{A_1 \rho_0},$$

$$L = L_0 + \frac{1}{\beta} \sum_{n=1}^i (-1)^{n+1} \left[\sum_{i=1}^n C_{in} (\theta_0^i - \theta^i) + C_n' A_3 + C_n'' A_4 \right], \quad (6)$$

$$L_{\sigma} = L_{\sigma 0} + \frac{1}{\beta} \sum_{n=1}^{i+1} (-1)^{n+1} \left[\sum_{i=1}^n D_{in} (\theta_0^i - \theta^i) + D_n' A_3 + D_n'' A_4 \right],$$

$$\text{где } A_1 = \frac{2}{\beta} \left(M - \frac{C_y S}{2m} \cos \gamma \right), \quad A_2 = \frac{2 \rho_0}{\beta} \left(M - \frac{C_y S}{2m} \cos \gamma \right) - \theta_0^2, \quad M = \frac{1}{\rho r} \left(\frac{g^2}{V^2} - 1 \right),$$

$$A_3 = \ln \frac{\theta_0^2 + A_2}{\theta^2 + A_2}, \quad A_4 = \arctg \frac{\theta_0}{\sqrt{A_2}} - \arctg \frac{\theta}{\sqrt{A_2}},$$

$C_{in}, C_n', C_n'', D_{in}, D_n', D_n''$ – кусочно-постоянные коэффициенты, алгоритм вычисления которых приведён в работе [5]; l – число оставленных членов в разложении тригонометрических зависимостей $\sin \varepsilon$ и $\cos \varepsilon$ в ряды Маклорена.

Проведённые вычисления показали, что данные, рассчитанные по соотношениям (6) для $\Delta t \leq 15c$, имеют погрешности, по сравнению с результатами численного интегрирования системы уравнений (1), не превышающие $\approx 3\%$ [5].

Кроме того, при достаточно малом шаге интегрирования уравнений Колмогорова для расчёта параметров h, L, L_{σ} эффективным может быть применение простых рекуррентных соотношений

$$\begin{aligned} h_{i+1} &= h_i + V_i \sin \theta_i \Delta t, \\ L_{\sigma i+1} &= L_{\sigma i} + \frac{V_i R}{r} \cos \theta_i \sin \varepsilon_i \Delta t, \\ L_{i+1} &= L_i + \frac{VR_i}{r_i} \frac{\cos \theta_i \cos \varepsilon_i}{\cos(L_{\sigma i} / R)} \Delta t. \end{aligned}$$

Другой путь уменьшения затрат расчётного времени состоит в том, что рассматриваются не все состояния фазового пространства, полученные в результате его дискретизации, а лишь те, вероятность нахождения аппарата в которых превышает заданную величину P^* , а также соседние с ними состояния. Так, в начальный момент можно ограничиться тремя состояниями по координатам скорости (V_1, V_2, V_3) , траекторного $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ и курсового $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)$ углов. Причём $V_1 = V_0 + \Delta V$, $V_2 = V_0$, $V_3 = V_0 - \Delta V$. Аналогично $\theta_1 = \theta_0 + \Delta \theta$, $\theta_2 = \theta_0$, $\theta_3 = \theta_0 - \Delta \theta$ и $\varepsilon_1 = \varepsilon_0 + \Delta \varepsilon$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_0$, $\varepsilon_3 = \varepsilon_0 - \Delta \varepsilon$, т.е. в начальный момент интегрируется система из 27 уравнений Колмогорова с начальными условиями $P_{222} = 1$ и $P_{ijk} = 0$ (для

всех случаев, кроме $i = j = k = 2$). Когда для какого-либо крайнего состояния S_{ijk} вероятность $P(i, j, k)$ достигает величины P^* , прибавляются ещё три состояния, в которые КА может непосредственно перейти из S_{ijk} , а вероятности нахождения аппарата в новых состояниях в этот момент принимаются равными нулю. И наоборот, те состояния, для которых вероятность становится меньше P^* , перестают рассматриваться (уравнения Колмогорова для этих вероятностей при дальнейшем интегрировании выводят из системы).

Суть третьего пути сокращения продолжительности вычислительного процесса заключается в периодическом обновлении начальных условий и используемых для составления уравнений Колмогорова состояний фазового пространства. Во избежание чрезмерного увеличения размерности интегрируемой системы уравнений в определённый момент времени t^* за новые начальные значения фазовых координат $V_0, \theta_0, \varepsilon_0$ принимаются значения математических ожиданий скорости $M[V(t^*)]$ и углов $M[\theta(t^*)]$ и $M[\varepsilon(t^*)]$, рассчитанные по формуле (2). Причём моменты обновления t^* могут либо быть жёстко заданными, либо определяться достижением заданного числа уравнений Колмогорова.

После введения описанных преобразований затраты расчётного времени хотя и значительно уменьшаются, тем не менее остаются достаточно большими. Поэтому используется ещё один эффективный путь сокращения продолжительности вычислений – аналитическое решение системы дифференциальных уравнений Колмогорова.

Определим общую формулу, позволяющую вычислить вероятность наход-

дения КА в состоянии S_{ijk} . Очевидно, что в это состояние аппарат может попасть, двигаясь по различным маршрутам, общее число которых рассчитывается в соответствии с соотношением $n = f(i, j, k)$. Согласно теореме сложения вероятностей

$$P(i, j, k) = \sum_{r=1}^n P^r(i, j, k),$$

где $P^r(i, j, k)$ – вероятность нахождения КА в состоянии S_{ijk} при реализации r -го маршрута ($r = \overline{1, \dots, n}$).

Докажем, что при заданном маршруте вероятность $P^r(i, j, k)$ определяется по формуле

$$P^r(i, j, k) = B \sum_{n=1}^m e^{-k_n t} / \prod_{\alpha \neq n} (k_\alpha - k_n), \quad (7)$$

где B – произведение интенсивностей последовательных переходов КА из начального состояния в состояние S_{ijk} ; m – число состояний, которые КА проходит, двигаясь по заданному маршруту; k_s – сумма интенсивностей переходов КА из s -состояния ($s = \overline{1, \dots, m}$).

Приведём доказательство справедливости формулы (7) методом математической индукции. Прежде всего, рассмотрим случай, где $j = k = 1$. Вводимая конкретизация, с одной стороны, приводит к удобству математического изложения, так как при этом нет необходимости оговаривать маршрут КА (он определяется одно-

значно), а с другой – не нарушает общности доказательства, ибо приводимые ниже математические выкладки можно использовать для любого заданного маршрута движения аппарата. Сначала докажем равенство (7) для $i=1$ и $i=2$. Уравнения Колмогорова для состояний S_{111} и S_{211} имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{dP(1, 1, 1)}{dt} &= -P(1, 1, 1)k_1, \\ \frac{dP(2, 1, 1)}{dt} &= \tilde{\lambda}_1(1, 1, 1)P(1, 1, 1) - k_2 P(2, 1, 1), \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \tilde{\lambda}_1(1, 1, 1) &= \lambda_1(1, 1, 1) + \mu_1(1, 1, 1), \\ k_1 &= \sum_{j=1}^3 \tilde{\lambda}_j(1, 1, 1), \quad k_2 = \sum_{j=1}^3 \tilde{\lambda}_j(2, 1, 1). \end{aligned}$$

С помощью операторного метода Лапласа получим решения этих уравнений:

$$\begin{aligned} P(1, 1, 1) &= e^{-k_1 t}, \\ P(2, 1, 1) &= \tilde{\lambda}_1(1, 1, 1) \left(\frac{e^{-k_1 t}}{k_2 - k_1} + \frac{e^{-k_2 t}}{k_1 - k_2} \right). \end{aligned}$$

Нетрудно видеть, что оба этих решения являются частными случаями общего решения (7). Далее при условии справедливости равенства (7) для некоторого значения i докажем его справедливость при $i+1$.

Пусть

$$P(i, 1, 1) = \prod_{n=1}^{i-1} \tilde{\lambda}_1(n, 1, 1) \sum_{n=1}^i e^{-k_n t} / \prod_{\alpha \neq n} (k_\alpha - k_n). \quad (8)$$

Запишем дифференциальное уравнение Колмогорова для вероятности $P(i+1, 1, 1)$:

$$\frac{dP(i+1, 1, 1)}{dt} = \tilde{\lambda}_1(i, 1, 1)P(i, 1, 1) - k_{i+1}P(i+1, 1, 1).$$

Используя метод варьирования произвольной постоянной, получим решение этого уравнения:

$$P(i+1, 1, 1) = e^{-k_{i+1} t} \tilde{\lambda}_1(i, 1, 1) \left[\int P(i, 1, 1) e^{k_{i+1} t} dt + C_{i+1} \right].$$

С учётом соотношения (8) последняя формула может быть преобразована следующим образом:

$$P(i+1, 1, 1) = \prod_{n=1}^i \lambda_1(n, 1, 1) \left[\sum_{n=1}^i e^{-k_n t} / \prod_{\substack{\alpha=1 \\ \alpha \neq n}}^{i+1} (k_\alpha - k_n) + c_{i+1} e^{-k_{i+1} t} \right]. \quad (9)$$

Постоянную интегрирования c_{i+1} находим из условия $P(i+1, 1, 1) = 0$ при $t = 0$:

$$c_{i+1} = \left[\prod_{\substack{\alpha, n=1 \\ \alpha \neq n}}^{i+1} (k_\alpha - k_n) \right]^{-1}.$$

Таким образом, полученная зависимость для расчёта вероятности $P(i+1, 1, 1)$ (9) удовлетворяет общему решению (7), что доказывает его справедливость.

Окончательная форма для определения вероятности нахождения КА в состоянии S_{ijk} , достигнуть которого можно одним из маршрутов, представима в виде

$$P(i, j, k) = \left[\prod_{s=1}^{m-1} \tilde{\lambda}(S) \sum_{s=1}^m e^{-k_s t} / \prod_{\substack{\alpha=1 \\ \alpha \neq s}}^m (k_\alpha - k_s) \right].$$

Оценка вычислительных погрешностей

Проведён сравнительный анализ результатов, полученных с помощью предлагаемого метода, предусматривающего использование всех перечисленных возможностей сокращения продолжительности вычислительного процесса, и с применением известных методов численного интегрирования системы дифференциальных уравнений (1).

На величины погрешностей расчётов фазовых координат и на продолжительность процесса вычисления траекторий движения КА будут оказывать влияние значения интервалов ΔV , $\Delta \theta$, $\Delta \varepsilon$, шаг интегрирования уравнений Колмогорова Δt , интервал обновления начальных условий t^* (или граничные вероятности P^*): уменьшение значений ΔV , $\Delta \theta$, $\Delta \varepsilon$, Δt , P^*

и увеличение t^* приводят, с одной стороны, к уменьшению расчётных погрешностей, а с другой – к увеличению продолжительности вычислений. Анализ численных результатов показал, что наиболее целесообразным является использование следующих значений констант: $\Delta t = t^* = 1c$. Интервалы ΔV , $\Delta \theta$ и $\Delta \varepsilon$ меняются в процессе движения КА в атмосфере от 0,1 до 2-3 км/с, от 0,1 до 4–6°, от 0,1 до 2–4° соответственно, достигая максимальных (минимальных) значений на участках, где скорость роста переменных V , θ , ε наибольшая (наименьшая).

В целом показано, что на 75–80% общей продолжительности траекторий движения КА количественные отличия данных, полученных с помощью интегрирования уравнений (1), и результатов, рассчитанных с использованием разработанного алгоритма, не превышают 1–3%. Время расчётов сокращается в 5 раз по сравнению с применением методов численного интегрирования.

Заключение

Таким образом, проведённые исследования показали принципиальную возможность использования разработанного стохастического метода исследования возмущённого движения КА, основанного на теории марковских процессов. С помощью данного метода предоставляется возможность проведения расчётов для более сложных возмущающих воздействий: могут быть учтены все $n \times n$ элементы матрицы $G(x, t)$, в том числе при их изменении в процессе движения КА. Окончательное заключение об эффективности применения метода может быть сделано после его апробирования при ре-

шении задач с учётом определения статистических характеристик случайного про-

цесса посредством обработки реальной измерительной информации.

Библиографический список

1. Венцель Е.С. Исследование операций. М.: Советское радио, 1972. 552 с.
2. Беллман Р. Динамическое программирование. М.: Иностранная литература, 1960. 400 с.
3. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций. М.: Наука, 1968. 463 с.

4. Авдуревский В.С., Антонов Б.М., Анфимов Н.А. и др. Основы теории полёта космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1972. 607 с.

5. Соколов Н.Л. Приближенный аналитический метод расчета пространственных маневров космического аппарата в атмосфере // Космические исследования. 1988. № 2.

Информация об авторе

Соколов Николай Леонидович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заместитель начальника Центра управления полётами Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-

исследовательский институт машиностроения», г. Королёв. E-mail: sokolov@mcc.rsa.ru. Область научных интересов: оптимальное управление, динамика полёта, баллистика, теория вероятностей, математическое моделирование.

STOCHASTIC METHOD OF INVESTIGATING PERTURBED MOTION OF A SPACE VEHICLE IN THE ATMOSPHERE

© 2014 N. L. Sokolov

Federal State Unitary Enterprise "Central Research Institute of Machine Building"
Korolyov, Russian Federation

When space vehicles (SVs) are moving in the atmosphere detailed accounting of the influence of external perturbation factors is quite difficult: they are either unknown or have a complex nature. This necessitates development of methods to solve the problems of controlling SVs in conditions of uncertainty. A stochastic method of investigating perturbed paths of space vehicles in the atmosphere has been elaborated. The method is based on the mathematical theory of continuous Markovian processes. The principle of reduction from deterministic description of space vehicle motion to the stochastic one is applied. A SV is supposed to be in a limited number of states that are determined by a previously chosen algorithm of phase space discretization. Differential Kolmogorov equations for determining the probabilities of a SV being in each of the states and relationships for the calculation of mathematical expectations of SV space phases are set up. Relationships for calculating the rates of SV transition from one state to another are developed and validated. Ways of reducing the duration of the processes of calculating SV flight paths are proposed. Analytical relationships for determining the values of phase coordinates are formulated. Numerical results of calculating flight paths in a wide range of boundary conditions of SV design characteristics are given. The possibility of applying the proposed method for the analysis of SV motion in the atmosphere in conditions of conditions of flight indeterminacy is shown.

Stochastic method, space vehicle, atmospheric flight, perturbed motion, Markovian processes, Kolmogorov equations, discretization of phase space, transition rates, space vehicle presence at the destination points.

References

1. Ventzel E.S. Issledovanie operatsiy [Operation analysis]. Moscow: Sovetskoe radio Publ., 1972. 552 p.
2. Bellman R. Dinamicheskoe programmirovaniye [Dynamic Programming]. Moscow: Inostrannaya literatura Publ., 1960. 400 p.
3. Sveshnikov A.A. Prikladnye metody teorii sluchaynykh funktsiy [Applied methods of the theory of random functions]. Moscow: Nauka Publ., 1968. 463 p.
4. Avduevsky V.S., Antonov B.M., Anfimov N.A. et al. Osnovy teorii poleta kosmicheskikh apparatov [Theory of space flight]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1972. 607 p.
5. Sokolov N.L. Approximate analytical method for calculation of space maneuvers in the atmosphere // Cosmic research. 1988. No. 2.

About the author

Sokolov Nikolay Leonidovich, Candidate of Science (Engineering), Senior Researcher, Deputy Head of the Mission Control Centre of Federal State Unitary Enterprise “Central Research Institute of Machine

Building”. E-mail: sokolov@mcc.rsa.ru. Area of Research: optimizing control, flight dynamics, ballistics, probability theory, mathematical modelling.

УДК 621.438.056: 577.440

РАЗРАБОТКА МАЛОЭМИССИОННОЙ ДВУХТОПЛИВНОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

© 2014 А. В. Бубенцов, Д. К. Василюк, П. А. Голубев, Р. Е. Кириченко,
В. А. Ташкинов, Б. В. Шошин

ОАО «НПО «Сатурн», г. Рыбинск

В статье представлен опыт ОАО «НПО «Сатурн» по созданию двухтопливной камеры сгорания двигателя Е70/8РД. Представлены данные модернизации камеры сгорания по технологии RQQ («богатое» горение – резкое разбавление – «бедное» горение), которая позволила значительно снизить выбросы NO_x при работе на природном газе и обеспечить требования технического задания на двигатель. Также рассматривается проблема обеспечения теплового состояния стенок жаровой трубы.

Камера сгорания, форсунка, двухтопливность, сегментная конструкция, выбросы вредных веществ, тепловое состояние.

Механизмы образования вредных веществ при сгорании углеводородных топлив в камерах сгорания ГТД широко представлены в научных и инженерных публикациях. Разработаны также технологии их снижения. Однако при решении практических задач по разработке и доводке низкоэмиссионных камер сгорания (КС), кроме задачи собственно снижения выбросов вредных веществ, требуется обеспечить:

- устойчивое горение и отсутствие регулярных пульсаций давления воздуха в КС;
- приемлемое тепловое состояние элементов конструкции КС;
- неравномерность температурного поля на выходе из КС;
- заданный уровень гидравлических потерь.

Решение этой комплексной задачи существенно ограничивает возможности конструктивных изменений КС.

В рамках программы создания перспективных морских ГТД, предназначенных для работы в составе гражданских морских объектов различного назначения (пассажирских и транспортных судов, буровых платформ, плавучих электростанций, плавучих и припортовых производств), в НПО «Сатурн» разработан дви-

гатель мощностью 8 МВт и ресурсом 100000 часов с двухтопливной КС (рис. 1, а). Особое требование предъявлено к конструкции КС – необходимость надёжной работы как на жидком, так и газообразном топливе, а также обеспечение перехода от одного вида топлива к другому без останова двигателя.

Согласно ТЗ ГТД должен быть экологически чистым и оказывать минимальное воздействие на окружающую воздушную среду. Содержание вредных выбросов в выхлопных газах ГТД (сухие продукты сгорания при 0°C и давлении 101,3 кПа, при условной концентрации кислорода 15 %) на номинальном режиме не должно превышать:

- концентрация оксидов азота $\text{NO}_x^{15\%O_2}$ не более 200 мг/м³;
- концентрация окиси углерода $\text{CO}^{15\%O_2}$ не более 300 мг/м³.

В связи со сжатыми сроками работа была разделена на два этапа:

- отработка технологии двухтопливной КС на базе серийного прототипа;
- разработка низкоэмиссионной двухтопливной КС.

В качестве прототипа использовалась КС двигателя Е70ФРУ. На её базе спроектирована КС (рис. 1, а) с кольцевой прямооточной жаровой трубой (рис. 1, в).

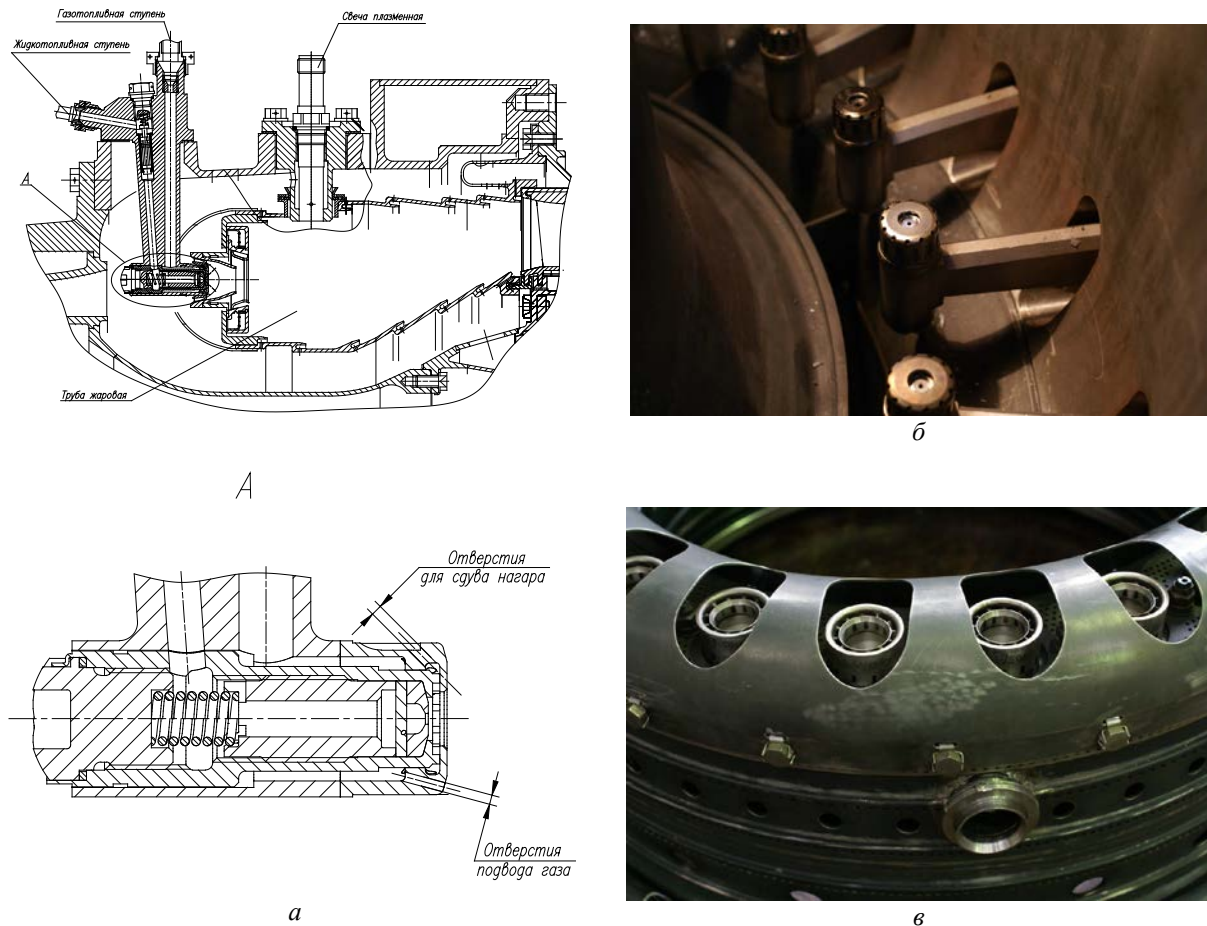


Рис. 1. Конструкция КС двигателя E70/8РД:
 а – продольный разрез; б – топливные форсунки; в – жаровая труба

Фронтное устройство с завихрителями включает в себя 24 комбинированные газожидкостные форсунки (рис. 1, б). Центральная ступень предназначена для подачи жидкого топлива, периферийная – для подачи газового топлива.

В 2011 году выполнен полный цикл испытаний в составе газогенератора и двигателя, подтверждена работоспособность прототипа КС на газообразном и жидком топливе, выполнен переход от одного вида топлива к другому без останова двигателя.

Так как данный ГТД может размещаться в черте прибрежных городов и портах, для уменьшения негативного влияния

на окружающую среду необходимо снижение уровня выбросов вредных веществ (табл. 1) КС прототипа. С этой целью была спроектирована низкоэмиссионная КС по технологии богато-бедного горения (рис. 2, а, б).

Фронтное устройство спроектированной низкоэмиссионной КС включает в себя 72 горелки (рис. 2, в), что позволяет обеспечить более равномерное распределение топливо-воздушной смеси во всем объеме жаровой трубы. Для опытной отработки КС в составе газогенератора использовались два комплекта двухъярусных форсунок: газовые и жидкотопливные центробежные.

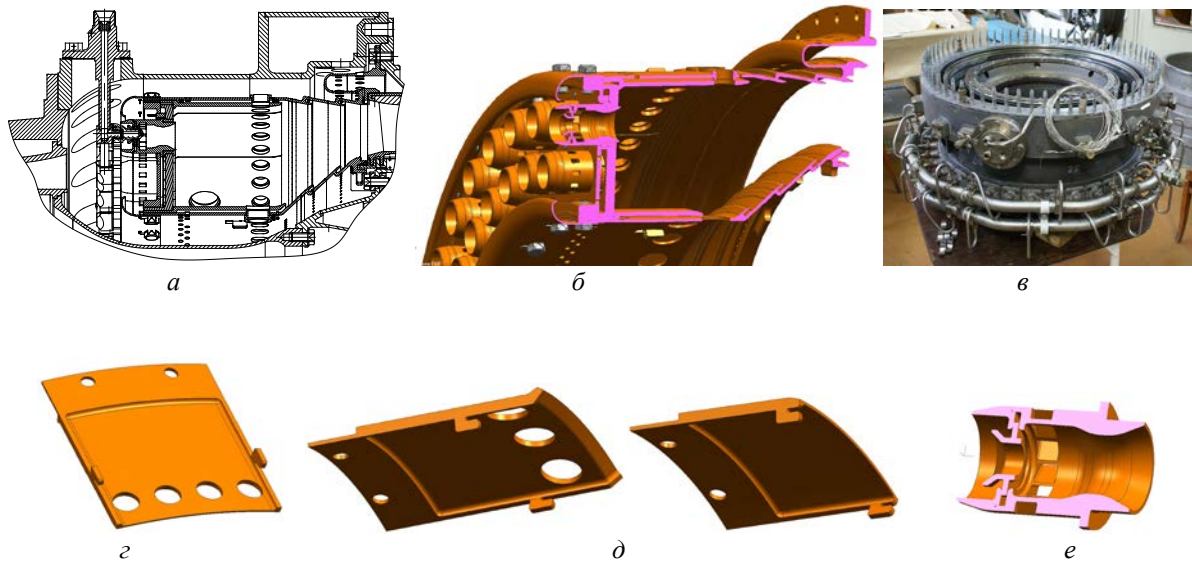


Рис. 2. Опытная КС:

а – продольный разрез КС; б – 3D-представление жаровой трубы; в – КС в сборе; г – сегмент наружный; д – сегменты внутренние; е – горелка

Первоначально отработка конструкции завихрителей выполнялась с использованием стериолитографических моделей. На основании «холодных» продувок выбраны и изготовлены опытные горелочные модули, проведены огневые испытания в составе открытого и многорелочного отсеков (рис. 3).

Одно из требований к данному двигателю – обеспечение перехода от жидкого к газовому топливу и обратно без перемонтажа форсунок. Для обеспечения данного требования разработана двухтоп-

ливная двухъярусная форсунка (рис. 4). После испытаний на газогенераторе с целью повышения качества смесеобразования, разделения зон подвода жидкого 1 и газового 2 топлива и снижения эмиссии выбросов NO_x на жидком топливе введён дополнительный 3й ярус завихрителя.

Изготовлены и испытаны в составе газогенератора и двигателя КС прототипа (рис. 1, а) и низкоэмиссионная КС (рис. 2, а). Получены следующие значения выбросов вредных веществ, приведённые в табл. 1 и на рис. 5.

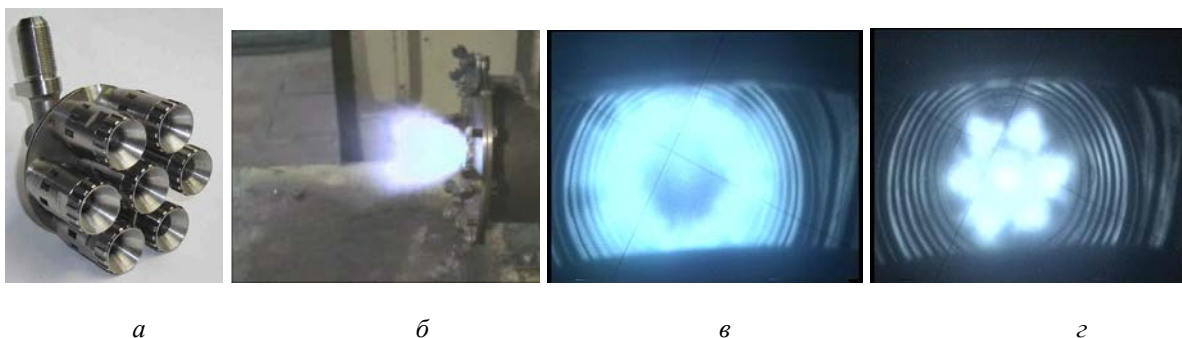


Рис. 3. Опытная конструкция горелочного модуля (а) и его огневые испытания: б – одной горелки на стенде НПО «Сатурн»; в – при $P_k=3,3 \text{ ата}$, $T_k=430 \text{ К}$, $\alpha=5$; г – при $P_k=3,3 \text{ ата}$, $T_k=430 \text{ К}$, $\alpha=14$ (граница срыва пламени)

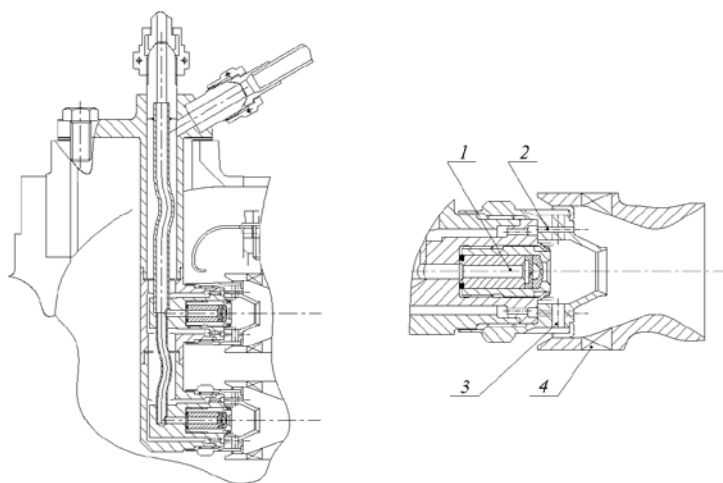


Рис. 4. Изменения конструкции горелки:

1 – канал подвода жидкого топлива; 2 – канал подвода газового топлива;
3 – первый ярус завихрителя; 4 – второй ярус завихрителя

Таблица 1. Уровень выбросов вредных веществ при работе на жидком и газообразном топливах (в мг/м³)

Уровень вредных выбросов	Жидкое топливо		Газообразное топливо	
	NO _x ^{15%O2}	CO ^{15%O2}	NO _x ^{15%O2}	CO ^{15%O2}
Прототип	378	31	215	40
Низкоэмиссионная КС	337	26	108–124	8–23

Высокие показатели выбросов вредных веществ при работе на дизельном топливе в составе низкоэмиссионной КС связаны с повышенной неравномерностью подачи топлива по коллекторам (порядка 26 %).

При применении технологии богатого горения в первичной зоне необходимо поддерживать постоянный коэффициент избытка воздуха порядка 0,5–0,6. Воздух, который идёт на охлаждение участка жаровой трубы, при попадании в первичную зону будет увеличивать коэффициент избытка воздуха, при этом произойдёт увеличение выбросов NO_x. Для

снижения количества «паразитного» воздуха в первичной зоне и обеспечения теплового состояния применена сегментная конструкция стенок жаровой трубы с ударно-конвективной системой охлаждения. Кроме того, сегментная конструкция также повышает ремонтпригодность жаровой трубы при относительно невысоком увеличении её массы (порядка 19 %). Оптимизация теплового состояния сегментов при проектировании КС выполнялась на двух типах сегментов (рис. 2, з, д). Исследование смешения выполнялось с использованием различного вида основных отверстий подвода воздуха в зону горения.

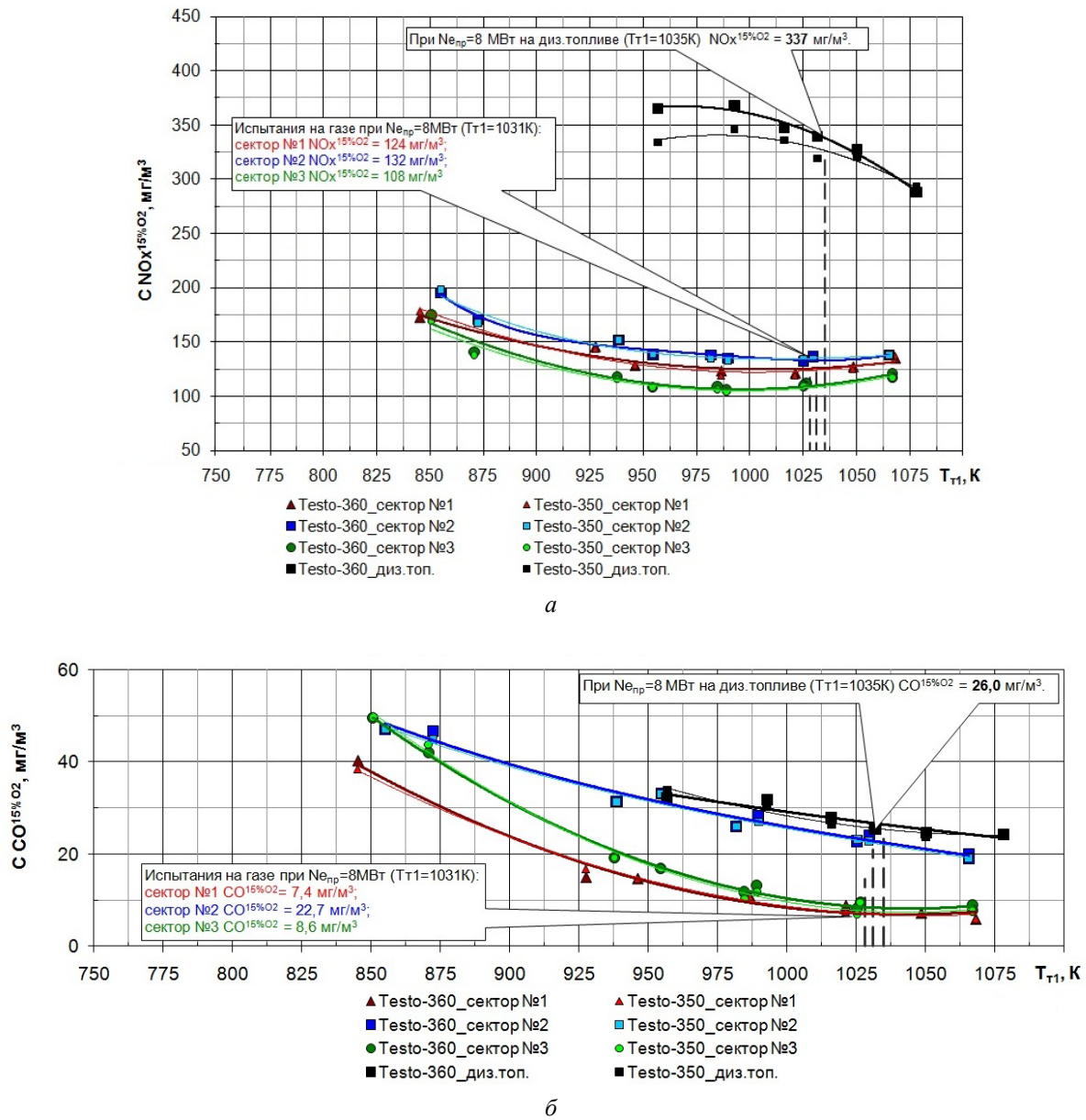


Рис. 5. Характеристики НЭКС при изменении температуры газа за турбиной:
 а – по NO_x ; б – по CO

Для оценки теплового состояния жаровой трубы были проведены испытания КС в составе опытного газогенератора (максимальная мощность 8,0 МВт). По результатам расшифровки термоиндикаторной краски, а также по данным термометрирования (рис. 6) получено:

- наружная стенка жаровой трубы имеет температуру в диапазоне от 505 °С до 888 °С;
- внутренняя стенка жаровой трубы имеет температуру в диапазоне от 583 °С до 888 °С;

- наружные сегменты имеют температуру в диапазоне от 753 °С до 1080 °С;
- внутренние сегменты имеют температуру в диапазоне от 753 °С до 1080 °С.

Полученные значения температуры не превышают допустимую величину для материала ХН50ВМТЮБ-ВИ (ЭП648-ВИ), но они выше значений, которые рекомендуются для длительной работы изделия (950 °С и ниже), в связи с этим необходима доработка системы охлаждения. При визуальном осмотре на внутрен-

них сегментах были выявлены зоны перегрева, а также деформация выходных кромок. Дефектов по тепловому состоянию стенок жаровой трубы не отмечено

за весь период испытаний в объеме 154 часов. Из них 146 часов работы на газообразном, 8 часов – на жидком топливе.

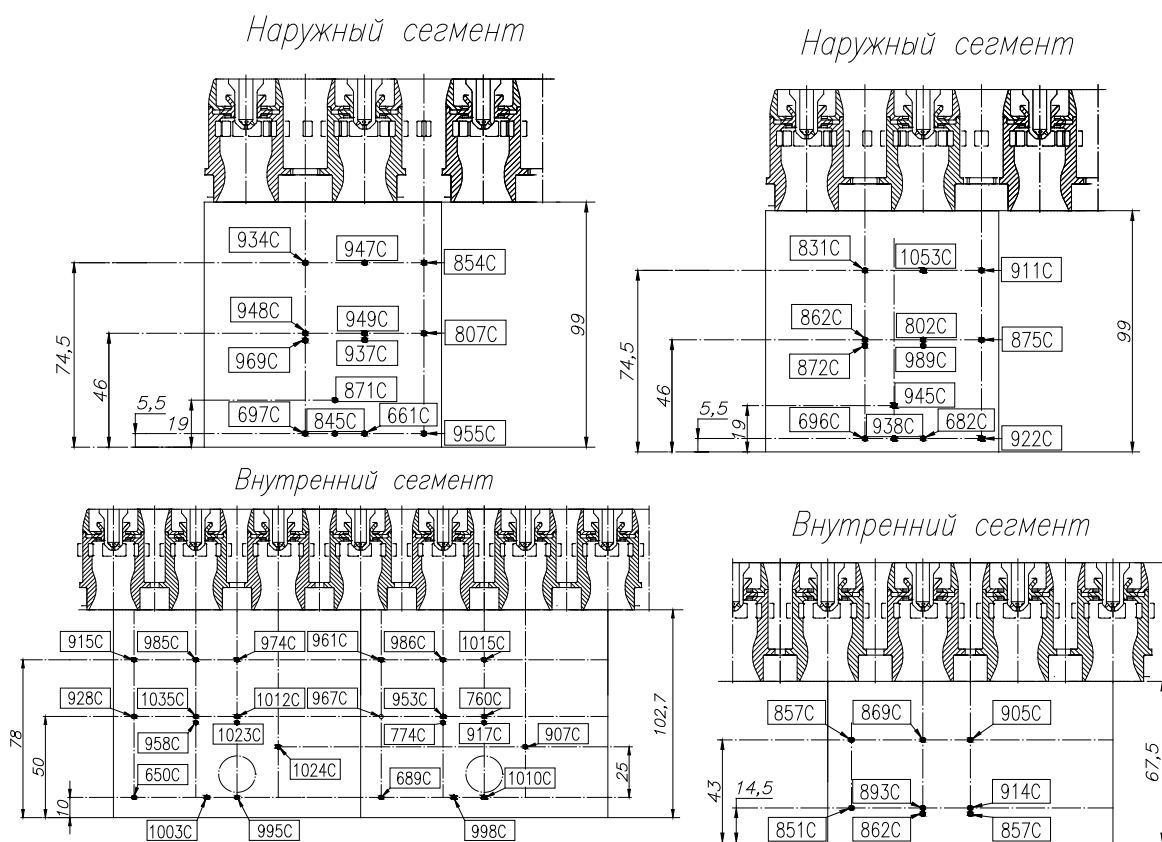


Рис. 6. Результаты термометрирования сегментов

В целях получения запасов по температуре сегментов жаровой трубы выполнена оптимизация системы охлаждения. Испытано два варианта:

1) Ударно-конвективное охлаждение – выполнено аналогично изображенному на рис. 2, а и 7, а, при этом первый ряд отверстий, подводящих воздух в канал между стенкой жаровой трубы и сегментом, смещён в наиболее горячую зону (рис. 7, б).

2) Ударно-конвективное пленочное охлаждение с выдувом охлаждающего воздуха через отверстия в сегменте (рис. 7, в).

По результатам термометрирования получено:

– максимальная температура наружного сегмента с ударно-конвективным охлаждением (вариант 1)

находится по показаниям: термокраски в диапазоне $T_w = 753 - 888 \text{ }^\circ\text{C}$; датчиков ИМТК – $794 \text{ }^\circ\text{C}$; термопар – $762 \text{ }^\circ\text{C}$;

– максимальная температура внутреннего сегмента с ударно-конвективным охлаждением (вариант 1) находится по показаниям указанных выше датчиков: $T_w = 681 - 753 \text{ }^\circ\text{C}$; $749 \text{ }^\circ\text{C}$; $738 \text{ }^\circ\text{C}$;

– максимальная температура наружного сегмента с ударно-конвективно-плёночным охлаждением (вариант 2) находится по показаниям указанных выше датчиков: $T_w = 658 - 683 \text{ }^\circ\text{C}$; $688 \text{ }^\circ\text{C}$; $676 \text{ }^\circ\text{C}$;

– максимальная температура внутреннего сегмента с ударно-конвективно-плёночным охлаждением (вариант 2) находится по показаниям указанных выше датчиков: $T_w = 658 - 683 \text{ }^\circ\text{C}$; $670 \text{ }^\circ\text{C}$; $661 \text{ }^\circ\text{C}$.

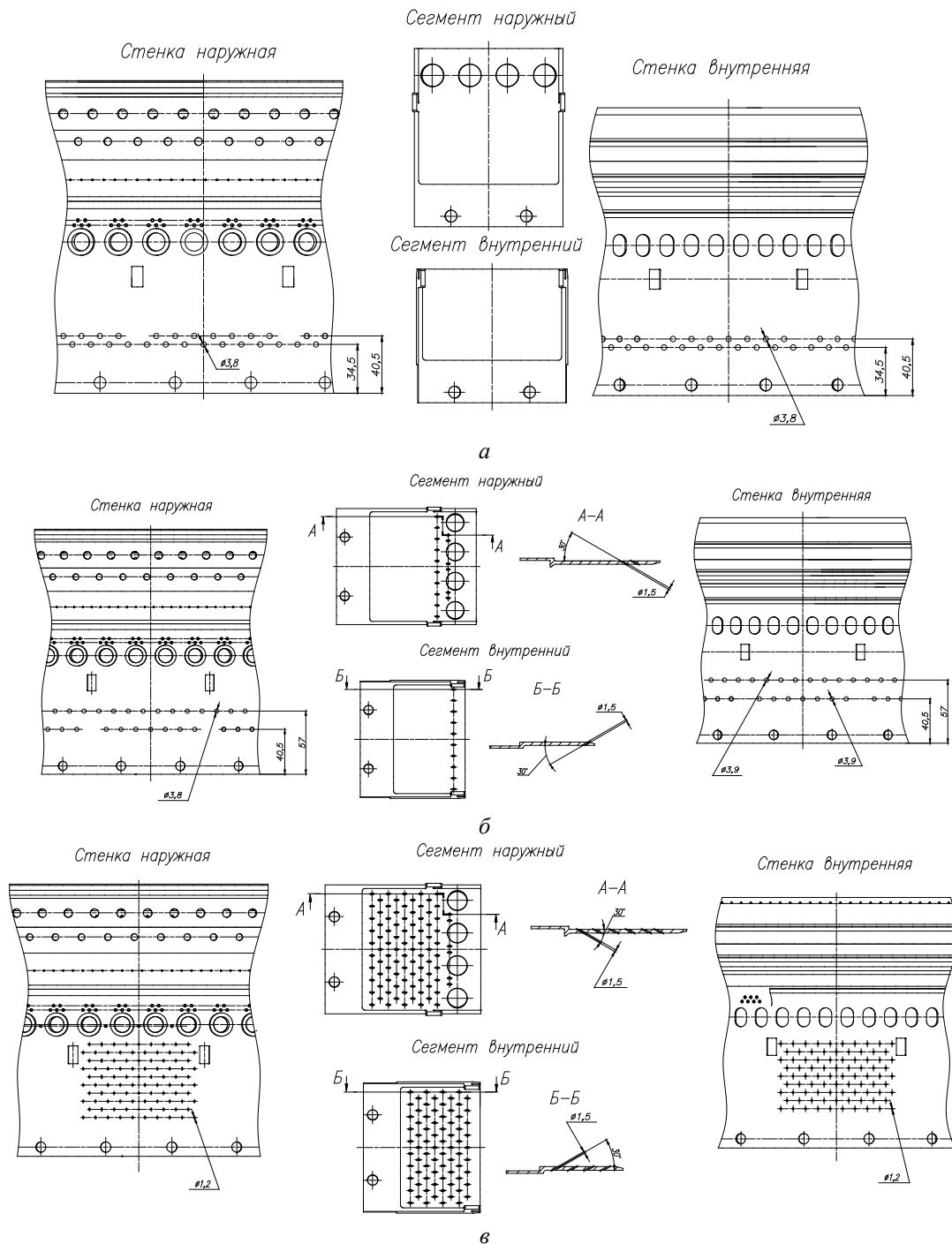


Рис. 7. Доработки системы охлаждения:

а – исходный вариант; б – вариант со смещённым рядом отверстий;
в – вариант с ударно конвективным охлаждением и перфорированным сегментом

Для обеих систем охлаждения получены величины температуры, не превышающие допустимую для материала ХН50ВМТЮБ-ВИ (ЭП648-ВИ). При этом максимальные температуры сегментов позволяют говорить, что оба типа охлаждения приемлемы в данной конструкции и обеспечивают длительную работу сегментов.

В продолжении работ по оптимизации охлаждения сегментов для дополнительного теплосъёма, а также предотвращения деформации сегментов и обеспечения гарантированного зазора между стенкой и сегментом в конструкцию введены рёбра-ограничители (рис. 8).

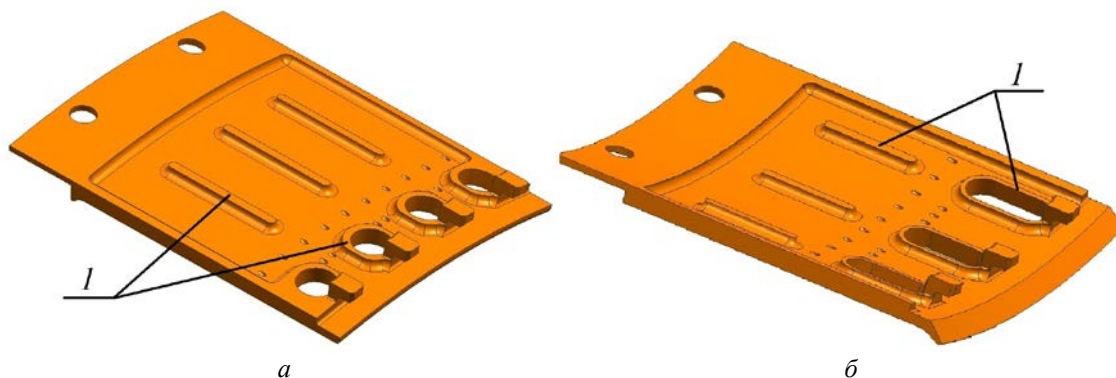


Рис. 8. Изменения конструкции:
а – наружный сегмент; б – внутренний сегмент; 1 – рёбра-ограничители

Выводы

1. Разработана и испытана КС, обеспечившая работоспособность двигателя на жидком и газообразном топливах. Проект двигателя Е70/8РД принят государственной комиссией в сентябре 2011 г.

2. Выбросы вредных веществ разработанной КС составили: $\text{NO}_x^{15\%O_2}$ от 108 до 124 в мг/м^3 , $\text{CO}^{15\%O_2}$ от 8 до 23 мг/м^3 .

3. Разработана и оптимизирована сегментная конструкция жаровой трубы, обеспечившая температуру её элементов не более 700 °С.

Информация об авторах

Бубенцов Алексей Витальевич, инженер-конструктор конструкторского отдела камер сгорания и выходных устройств, ОАО «НПО «Сатурн». Область научных интересов: камера сгорания ГТД, расчёт и эксперимент.

Василюк Дмитрий Константинович, начальник расчётно-экспериментальной бригады конструкторского отдела камер сгорания и выходных устройств, ОАО «НПО «Сатурн». Область научных интересов: камера сгорания ГТД, расчёт и эксперимент.

Голубев Павел Александрович, инженер-конструктор конструкторского отдела камер сгорания и выходных устройств, ОАО «НПО «Сатурн». Область научных интересов: камера сгорания ГТД, расчёт и эксперимент.

Кириченко Роман Евгеньевич, начальник конструкторского отдела камер сгорания и выходных устройств, ОАО «НПО «Сатурн». E-mail: roman.kirichenko@npo-saturn.ru. Область научных интересов: камера сгорания ГТД, проектирование, расчёт и эксперимент.

Ташкинов Валерий Александрович, начальник конструкторско-расчётной бригады отдела камер сгорания, ОАО «НПО «Сатурн». Область научных интересов: камера сгорания ГТД, расчёт и эксперимент.

Шошин Борис Васильевич, инженер-конструктор конструкторского отдела камер сгорания и выходных устройств, ОАО «НПО «Сатурн». Область научных интересов: камера сгорания ГТД, расчёт и эксперимент.

DEVELOPMENT OF A LOW-EMISSION BIFUEL COMBUSTION CHAMBER

© 2014 A. V. Bubentsov, D. K. Vasiluk, P. A. Golubev,
R. E. Kirichenko, V. A. Tashkinov, V. B. Shoshin

Science-and-Production Association SATURN, Rybinsk, Russian Federation

The paper presents the experience gained by the “Saturn” science-and-production association in producing a bifuel combustion chamber for the E70/8RD engine. The data on the modernization of the combustion chamber based on the RQQL (rich /quick quench/poor combustion) technology that made it possible to reduce significantly the emissions of NO_x while working on natural gas and to meet the requirements of the technical project of the engine are presented. The problem of providing the thermal state of the flame tube walls is also discussed.

Combustor, burner, two fuels, segmented structure, emission of harmful substances, thermal state

About the authors

Bubentsov Aleksey Vitalyevich, design engineer, Science-and-Production Association SATURN. Area of Research: gas turbine engine combustion chambers, calculation and experiment.

Vasilyuk Dmitry Konstantinovich, Calculation and Experimental Team Leader, Design Office of Combustion Chambers and Exhaust Systems, Science-and-Production Association SATURN. Area of Research: gas turbine engine combustion chambers, calculation and experiment.

Golubev Pavel Alexandrovich, design engineer, Science-and-Production Association SATURN. Area of Research: gas turbine engine combustion chambers, calculation and experiment.

Kirichenko Roman Yevgenyevich, Chief of the Design Office of Combustion Chambers and Exhaust Systems, Science-and-Production Association SATURN. E-mail: roman.kirichenko@npo-saturn.ru. Area of Research: gas turbine engine combustion chambers, design, calculation and experiment.

Tashkinov Valeri Alexandrovich, Design and Experimental Team Leader, Science-and-Production Association SATURN. Area of Research: gas turbine engine combustion chambers, calculation and experiment.

Shoshin Boris Yevgenyevich, design engineer, Science-and-Production Association SATURN. Area of Research: gas turbine engine combustion chambers, calculation and experiment.

УДК 621.751+621.438

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДИСКОВ ГАЗОВЫХ ТУРБИН

© 2014 М. А. Вишняков

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

В статье основное внимание уделено исследованию целесообразности применения метода термопластического упрочнения (ТПУ) для восстановления работоспособности ответственных деталей газотурбинных двигателей (ГТД), отработавших свой ресурс. Для этого на первом этапе выполнен анализ известных технологий ремонта, основной целью которых оказалось повышение работоспособности деталей путём восстановления механических характеристик их материала. Установлено, что применяемые технологии не позволяют достичь поставленной цели. Причинами этого являются формирование в поверхностном слое детали растягивающих остаточных напряжений, а также искажение структуры материала детали и, как следствие, уменьшение его механических характеристик. Метод термопластического упрочнения позволяет создать в поверхностном слое благоприятные сжимающие остаточные напряжения при сохранении исходной структуры материала. Проведённые испытания на усталость подтвердили эффективность применения метода термопластического упрочнения на заключительном этапе технологии восстановления работоспособности детали. Показано, что пределы выносливости новых деталей и восстановленных по предложенной технологии ремонта с применением метода термопластического упрочнения отличаются между собой на 5 %.

Газотурбинный двигатель, диск турбины, ремонтная технология, термопластическое упрочнение, сопротивление усталости.

Опыт эксплуатации газотурбинных двигателей (ГТД) показал, что большинство деталей, в частности, лопатки и диски компрессоров и турбин подвержены воздействию знакопеременных нагрузок, результатом которых, как правило, является возникновение и развитие усталостных трещин, которые создают в дальнейшем предпосылки для хрупкого разрушения [1]. Известно, что поломка дисков турбин не носит локального характера и может привести к выходу из строя всего двигателя.

Практика показала, что в условиях рынка проблема увеличения срока эксплуатации наиболее ответственных и дорогостоящих деталей ГТД должна решаться не только за счёт постановки на изделия новых деталей взамен изношенных, но и путём разработки и внедрения в производство таких технологических решений, которые обеспечивали бы эффективное восстановление вышедших из строя деталей. Эта задача вызвана необ-

ходимостью увеличения надёжности ответственных деталей авиадвигателей, а также высокой стоимостью их изготовления.

С целью увеличения номенклатуры восстанавливаемых деталей необходимо, во-первых, совершенствовать известные методы, во-вторых, внедрять в производство новые эффективные технологические процессы восстановления.

Современные технологические процессы изготовления деталей ГТД предполагают применение большого набора традиционных методов механической, термической, а также упрочняющей обработки [2, 3]. Последние, как правило, основаны на поверхностном пластическом деформировании (ППД) и предназначены для увеличения срока службы детали. Однако в процессе эксплуатации указанных выше деталей из-за воздействия на них высоких температур показатели напряжённо-деформированного состояния поверхностного слоя, созданные при ППД, с

течением короткого времени существенно уменьшаются. По этой причине они не нашли широкого применения для повышения работоспособности деталей, работающих при переменных нагрузках в условиях повышенных температур.

В настоящее время существует ряд научных работ, в которых авторы считают целесообразным подойти к рассматриваемым вопросам с точки зрения восстановления прочностных характеристик материала тех деталей, которые в результате эксплуатации получили разного рода механические повреждения или отработали свой ресурс.

Например, в работе [4] рассматриваются вопросы увеличения предела ограниченной выносливости рабочих лопаток турбин и компрессоров газоперекачивающих агрегатов (ГПА) методом сварки. Такое решение базируется на предположении, что технология ремонта обеспечит равнопрочность новой и отремонтированной лопаток с учётом различия механических свойств основного металла и наплавки. В качестве объектов рассматриваются лопатки, имеющие повреждения на входной кромке в виде забоин.

Эффективность технологии восстановления была исследована путём определения сопротивления усталостной прочности новых и отремонтированных сваркой рабочих лопаток турбины из жаропрочных сталей и сплавов.

В результате испытаний на усталость лопаток из сплава ХН77ТЮР установлено, что новые лопатки разрушаются по входной кромке и имеют предел ограниченной выносливости $\sigma_{-1}=250$ МПа на базе $N=2 \cdot 10^7$ циклов. Все отремонтированные лопатки разрушаются по сварке и имеют величину указанной характеристики на уровне $\sigma_{-1}=155$ МПа.

Таким образом, недостаточная степень восстановления сопротивления усталости отремонтированных лопаток по сравнению с новыми, выразившаяся в различии механических свойств основного сплава и наплавки, является наиболее

вероятной причиной разрушения лопаток из указанного материала.

В последние годы при разработке технологий восстановления усталостной долговечности деталей ГТД получила распространение лазерная обработка. В работе [5] авторы приводят результаты испытаний на усталость лопаток после газотермического покрытия с последующей лазерной обработкой. Их предел выносливости составил $\sigma_{-1}=100$ МПа. Зарождение усталостной трещины происходит на границе раздела покрытие-основа, а её движение – в направлении, перпендикулярном торцу. Причиной низкого сопротивления усталости, по-видимому, являются растягивающие остаточные напряжения. Последующие за этим исследования показали, что предел выносливости лопаток после лазерной обработки, отжига и виброгалтовки может достигать $\sigma_{-1}=200$ МПа. Однако это соответствует только возможностям лопаток со средней наработкой.

Таким образом, анализ известных результатов исследований, проведённых в различных работах, свидетельствует о том, что основной задачей, которую ставили перед собой большинство авторов, является создание ремонтной технологии для вышедших из строя высоко нагруженных деталей ГТД только на уровне восстановления целостности их материала при определённом воспроизведении его механических характеристик. Следствием этого должно было быть повышение сопротивления усталости отремонтированных деталей. Для целого ряда деталей ГТД решение проблемы только на таком уровне бывает не всегда достаточно, так как не обеспечивает необходимого повышения их работоспособности. Отдельные попытки, связанные с применением упрочняющих методов обработки, как видно из приведённых результатов исследований, не привели к требуемому результату: сближению пределов выносливости восстановленных и новых деталей. Предлагая один из эффективных технологических методов упрочняющей обработ-

ки, а именно термопластическое упрочнение на заключительной стадии ремонта, данные исследования позволяют решить вопрос восстановления деталей более полно: создать ремонтную технологию, обеспечивающую повышение выносливости восстановленных деталей до уровня новых.

Как было отмечено ранее, наиболее нагруженными деталями ГТД, определяющими работоспособность всего двигателя, являются диски и лопатки компрессора и турбины. Они подвержены действию статических и знакопеременных нагрузок и работают в условиях агрессивной газовой среды при повышенных температурах. Элементы соединения лопаток с дисками (замки лопаток и пазы дисков) испытывают, кроме того, высокие контактные нагрузки.

Соединение рабочих лопаток турбины с ёлочным пазом диска – одно из наиболее напряжённых и ответственных мест во всей конструкции газовой турбины. Практика длительной эксплуатации газотурбинных установок показала, что наиболее слабым элементом ёлочного паза является его верхняя впадина. Трещина, как результат потери прочности материала, появляется на некотором расстоянии от торца паза со стороны входа газового потока и распространяется вдоль впадины.

С целью выявления особенностей и характера излома были исследованы фрагменты выступа замковой части диска турбины высокого давления газоперекачивающего агрегата ГТК-10-4. На всех фрагментах в верхней впадине со стороны входа обнаружены трещины протяжённостью 15–20 мм с выходом на торец (рис. 1). Анализ излома проводился по участку раскрытой трещины длиной 8-10 мм, прилегающему к торцевой поверхности фрагмента диска. Установлено, что поверхность излома сглаженная, без следов пластической деформации – усталостного характера. По мере роста трещины шероховатость поверхности излома увеличивается, что свидетельствует о перераспреде-

лении нагрузок. Фронт распространения трещины имеет эллиптическую форму, что характерно для усталостного разрушения. Очаг разрушения расположен во впадине первого зуба замковой части диска на расстоянии ~ 5 мм от входного торца (рис. 1). Микроисследования, проведённые на микроскопе «Neophot 22», показали, что трещина заполнена продуктами окисления и распространяется на глубину ~ 5 мм (рис. 2). Разрушение выступа диска по телу первичного аустенитного зерна материала также подтверждает усталостный характер разрушения.



Рис. 1. Фрагмент излома замковой части диска турбины



Рис. 2. Трещина в пазу замковой части диска турбины ГПА ГТК-10-4 из стали 20Х12ВНМФ со стороны входного торца. $\times 10$

Причин возникновения усталостного разрушения в верхней впадине замковой части диска может быть несколько. Одной из них является то, что впадины паза, являясь концентраторами напряжений, испытывают наибольшее воздействие всех нагрузок. При этом реальные условия эксплуатации свидетельствуют о том, что рабочие напряжения на зубья паза возрастают в направлении от нижней впадины к верхней. Под воздействием газового потока усилия вдоль линии контакта зубьев могут перераспределяться таким образом, что они становятся наибольшими со стороны входа газа.

Другим фактором, влияющим на величину напряжений в разных зубьях, является клиновидная форма замка лопатки с различной степенью перераспределения напряжений по его сечениям.

Большое влияние на напряженно-деформированное состояние во впадинах паза диска оказывают вибронпряжения, возникающие в процессе эксплуатации под воздействием изменяющихся нагрузок.

Как уже было отмечено, наиболее характерным дефектом турбинного диска из жаропрочной стали 20X12ВНМФ является трещина в верхней впадине ёлочного паза. В настоящее время в производстве делается попытка ликвидации таких трещин с помощью их заварки. Такая технология ремонта имеет, среди прочих, два серьезных недостатка: сварка, во-первых, создает в области нагрева поле значительных по величине остаточных напряжений растяжения, удалить которые полностью практически невозможно, а во-вторых, в процессе нагрева происходят негативные структурные и фазовые превращения, уменьшающие механические характеристики материала детали. Указанные явления отрицательно сказываются на долговечности работы всего ремонтного диска. С целью устранения этих недостатков на заключительной стадии технологии восстановления целесообразно предусмотреть применение термопластического упрочнения. Использование данного ме-

тода позволит «подавить» наведённые при сварке негативные растягивающие напряжения, восстановить первоначальную равновесную структуру материала и создать новое напряженно-деформированное состояние, благоприятное с точки зрения работоспособности диска.

В этой связи для определения эффективности применения процесса термопластического упрочнения (ТПУ) в общей технологии восстановления было решено провести сравнительные испытания на усталость. Для этого были подготовлены две партии специальных образцов (рис. 3), обработанных по следующим вариантам: 1) отжиг (после мех. обработки) + получение усталостной трещины + заварка трещины + отжиг; 2) отжиг + получение трещины + заварка трещины + отжиг + ТПУ.

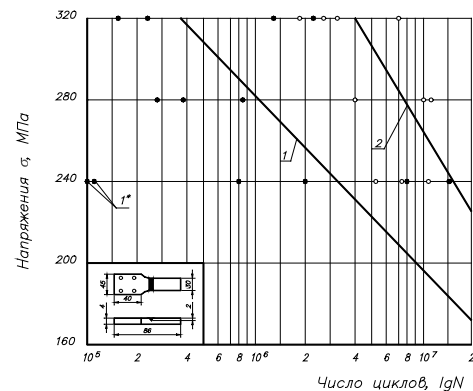


Рис. 3. Предел выносливости плоских образцов из 20X12ВНМФ:

- 1 – сварка+отжиг; 2 – сварка+отжиг+ТПУ;
1* – образец с остатками трещины+сварка+отжиг+ТПУ. Режим ТПУ: $T = 700^{\circ}\text{C}$,
 $P = 0,48-0,50 \text{ МПа}$, $\tau = 13 \text{ мин}$.

Оба варианта образцов после механической обработки были отожжены для снятия внутренних напряжений. После отжига они были подвергнуты усталостным нагрузкам для получения соответствующих трещин. Продолжительность воздействия нагрузок выбиралась из условия получения трещины по глубине, равной половине толщины образца. Место образования трещины разделялось та-

ким образом, чтобы полностью устранить её следы. После этого производилась заварка полученной впадины с последующей слесарной зачисткой выступающих частей сварного шва (рис. 3). Для снятия сварочных остаточных напряжений образцы обеих партий после сварки подвергались отжигу по режиму: нагрев до температуры $750-760^{\circ}\text{C}$ в течение 0,5 часа, естественное остывание под асбестовым полотном в течение 6 часов.

Вторая партия образцов после отжига была термоупрочнена на режиме: $T = 700^{\circ}\text{C}$, $P = 0,48-0,50$ МПа, $\tau = 13$ мин. С целью воспроизведения реальных условий термоупрочнения пазов диска турбины была выбрана схема ТПУ, обеспечивающая одностороннее охлаждение при упрочнении усталостных образцов. Испытания проходили при колебании образца по основному тону при частоте $f = 900-1000$ Гц. На рис. 3 показаны изменения предела ограниченной выносливости образцов на базе $N = 2 \cdot 10^7$. Из графиков видно, что выносливость образцов, подвергнутых термоупрочнению после сварки, составляет $\sigma_{-1} = 220$ МПа, что на 29,4 % больше, чем у неупрочненных образцов ($\sigma_{-1} = 170$ МПа). Основной причиной этого явления можно считать наведение остаточных напряжений сжатия, которые не только устраняют растягивающие остаточные напряжения, образовавшиеся после сварки, но и создают соответствующее поле благоприятных напряжений.

Проведение испытаний на усталость образцов с заваренными трещинами без и с последующим термоупрочнением свидетельствует об эффективности процесса упрочнения. Учитывая, что нагрев и охлаждение при термопластическом упрочнении осуществляются со стороны входного торца выступа паза, важным обстоятельством является равномерный прогрев паза диска на необходимую глубину при соответствующей эффективности охлаждения.

С целью подтверждения влияния тщательности удаления на выступе паза трещины, появившейся в процессе эксплуатации, среди образцов первой партии были изготовлены такие, на которых оставались следы указанной трещины (вариант 1*). Испытания на усталость позволили выявить следующую закономерность. Образцы, в которых заваренная эксплуатационная трещина не была до конца выбрана механическим путём, показали значительно более низкую долговечность по сравнению с теми образцами, где следов такой трещины после её удаления и последующей заварки не осталось. Таким образом, процессы подготовки образца и заварки удалённой в результате механической обработки части выступа паза играют существенную роль в восстановлении целостности выступа и продлении работоспособности диска в целом.

Исследования поверхностного слоя, проведённые с целью проверки сохранения физических характеристик материала диска, проработавшего в составе изделия 50–60 тыс. часов, выявили повышение микротвёрдости поверхностного слоя выступа паза по сравнению с его сердцевиной на 10–15 % (исходная твёрдость в сердцевине составила $\text{HRc} = 29-32$, на поверхности после наработки – $\text{HRc} = 32-38$). Последующий спектральный анализ показал, что содержание углерода на поверхности фрагмента диска составляет до 0,8 % вместо допустимых 0,23%. Толщина слоя металла с повышенной микротвёрдостью составляет 0,2–0,3 мм. Ясно, что избыточный углерод, внедряясь в кристаллическую решетку металла, является причиной повышения твёрдости поверхностного слоя, а последний, испытывая при эксплуатации значительные температурно-силовые нагрузки, становится потенциальным источником образования в нём микротрещин с последующим их развитием в усталостные трещины.

Таким образом, рекомендуемая технология ремонта пазов и восстановления работоспособности всего диска турбины

из жаропрочной стали 20X12ВНМФ состоит из следующих основных этапов:

- удаление части выступа с трещиной; операцию можно предварительно выполнить электрической дрелью с шарошкой с последующим окончательным устранением трещины слесарным методом. После этого необходимо проконтролировать обработанную поверхность на наличие трещины. В качестве контрольного можно использовать токовихревой прибор ВДМ-2М или цветную дефектоскопию;

- прогрев завариваемой части зуба газовой горелкой с контролем температуры нагрева с помощью контактной хромель-капелевой (ХК) термопары;

- заварка удалённой части металла; указанную операцию проводить методом ручной дуговой сварки с подогревом места наплавки в непрерывном режиме, материал электрода – Э12Х11НМФ или Э14Х11НМФ; допускается наплавка аргоно-дуговой сваркой не расплавляющимся вольфрамовым электродом с присадочной проволокой из Св12Х11НМФ или Св10Х11НМФ и непрерывным подогревом. Материалы, применяемые при сварке электродов, по химическому составу и механическим свойствам близки по своим характеристикам к основному материалу ремонтируемого диска;

- естественное остывание локальной зоны зуба; контроль температуры с помощью ХК контактной термопары;

- отжиг локальной зоны нагрева с помощью газовой горелки с последующим накрытием асбестовым полотном и естественным остыванием на воздухе; контроль температур – контактной термопарой ХК;

- слесарная доработка паза с целью восстановления геометрии замкового соединения диска и лопатки соответствующей ступени и удаление тонкого поверхностного слоя металла (0,2–0,3 мм) с повышенной твёрдостью; в качестве инструмента применять напильники, надфили и шлифовальную шкурку;

- дефектоскопия заваренной части зуба с проверкой твёрдости наплавленно-го места; при контроле использовать, например, прибор ВДМ-2М, а при определении твёрдости – прибор типа ПМТ (твёрдость должна составлять HRC = 25-30);

- термопластическое упрочнение паза диска на оптимальном режиме: температура нагрева $T = 700^{\circ}\text{C}$, давление охлаждающей жидкости $P = 0,48-0,50$ МПа, время нагрева $\tau = 13$ мин, расстояние от горелки до торца нагреваемого зуба должно составлять $L_{\text{гор}} = 160-180$ мм, а расстояние от спрейера до торца – $L_{\text{спр}} = 50-55$ мм.

Данная технология ремонта отработана на образцах, испытание на усталость которых показало возможность существенного увеличения усталостной долговечности отремонтированного диска.

Таким образом, рекомендуемая технология ремонта пазов и восстановления работоспособности дисков турбины состоит в следующем:

- удаление части выступа с трещиной;

- восстановление целостности выступа путем заварки удаленного металла;

- слесарная доработка паза с целью восстановления геометрии замкового соединения диска и лопатки соответствующей ступени и удаление тонкого поверхностного слоя металла с повышенной твёрдостью;

- местный отжиг заваренной части выступа с целью снятия сварочных растягивающих напряжений;

- термопластическое упрочнение паза диска на оптимальном режиме.

Испытания на усталость новых образцов, без термопластического упрочнения, показали, что их сопротивление усталостному разрушению составляет $\sigma_{-1} = 230$ МПа. Таким образом, видно, что в результате термопластического упрочнения выносливость образцов с заваренными трещинами ($\sigma_{-1} = 220$ МПа) практически мало отличается от усталостной прочно-

сти новых образцов без ТПУ, не имеющих усталостных трещин. Следовательно, процесс термоупрочнения позволяет существенным образом восстановить работоспособность ремонтных дисков.

Результаты проведенных испытаний подтверждают высказанное предположение о том, что в предлагаемой методике восстановления вышедших из строя деталей ГТД, а именно диска турбины, одно из основных значений для повышения работоспособности отремонтированной детали имеет процесс термопластического упрочнения.

Длительный набор статистических данных, связанный с определением места и характера дефектов дисков турбины га-

зоперекачивающих установок, свидетельствует о том, что наиболее массовым является, как уже отмечалось ранее, дефект в виде усталостной трещины на верхней впадине выступа зуба. Причём наиболее интенсивный рост количества трещин начинается через 50–60 тыс. часов работы газоперекачивающего агрегата. В связи с этим, целесообразно подвергнуть процессу термопластического упрочнения все турбинные диски высокого давления, находящиеся в эксплуатации 35–40 тыс. часов. Это даст возможность отдалить момент появления микротрещин и увеличить срок службы газоперекачивающего агрегата до его ремонта.

Библиографический список

1. Биргер И.А. Стержни, пластинки, оболочки. М.: Физматлит, 1992. 392 с.
2. Кудрявцев И.В., Наумченко Н.Е., Саввина Н.М. Усталость крупных деталей машин. М.: Машиностроение, 1981. 240 с.
3. Молохов И.Ф., Евстафьев Н.Н., Никольский Ю.А. Повышение качества и предела выносливости поверхностей полостей дисков турбин из сплава ХН51ВМТЮКФР-Н // Авиационная промышленность. 2000. № 2. С. 29-33.
4. Грязнов Б.А., Городецкий С.С., Налимов Ю.С., Герасимчук О.Н. Сопротивление усталости рабочих лопаток турбин и компрессоров, отремонтированных сваркой // Проблемы прочности. 1994. № 11. С. 20-25.
5. Логунов А.В., Белявский А.К., Дмитриенко Л.Н. Восстановление деталей ГТД с использованием лазерного излучения // Авиационная промышленность. 1999. № 3. С. 45-52.

Информация об авторе

Вишняков Михаил Анатольевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва

(национальный исследовательский университет). E-mail: barvinok@ssau.ru. Область научных интересов: применение технологических методов упрочняющей обработки с целью повышения сопротивления усталости высоконагруженных деталей ГТД.

APPLICATION OF THERMOPLASTIC HARDENING FOR RESTORATION OF FATIGUE DURABILITY OF GAS TURBINE DISKS

© 2014 M. A. Vishnyakov

Samara State Aerospace University, Russian Federation

The main concern of the paper is the research of expediency of applying the method of thermoplastic hardening to restore the performance of the essential parts of gas turbine engines with expired service life. For this purpose at the first stage the known repair technologies the main objective of which was to increase the operability of parts by restoring the mechanical characteristics of their material are analyzed. It was found that the technologies applied do not make it possible to achieve the goal due to the formation of tensile residual stresses in the surface layer of the part as well as the distortion of the structure of the material the part is made of and, as a consequence, the reduction of its mechanical characteristics. The method of thermoplastic hardening makes it possible to create favorable tensile residual stresses while maintaining the initial structure of the material. The fatigue tests carried out confirmed the efficiency of applying the method of thermoplastic hardening at the final stage of technology of restoring the part's performance. It is shown that the difference of the endurance limits of new parts and those restored according to the proposed technology of repair using the method of thermoplastic hardening is 5%.

Gas turbine engine, turbine disk, repair technology, thermoplastic hardening, fatigue resistance.

References

1. Birger I.A. Sterzhni, plastinki, obolochki [Rods, plates, shells]. Moscow: Fizmatlit Publ., 1992. 392 p.
2. Kudrjavcev I.V., Naumchenko N.E., Savvina N.M. Uсталost krupnyh detalej mashin [Fatigue of large machine parts]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1981. 240 p.
3. Molohov I.F., Evstaf'ev N.N., Nikol'skij Ju.A. Improving the quality and endurance limit of the cavity surface of turbine disks made of HN51VMTYUKFR-H alloy // *Aviacionnaja promyshlennost'*. 2000. No. 2. P. 29-33. (In Russ.)
4. Grjaznov B.A., Gorodeckij S.S., Nalimov Ju.S., Gerasimchuk, O.N. Fatigue resistance of turbine blades and compressor repaired by welding // *Problemy prochnosti*. 1994. No. 11. P. 20-25. (In Russ.)
5. Logunov A.V., Beljavskij A.K., Dimitrienko L.N. Restoration of gas turbine engine components using laser radiation // *Aviacionnaja promyshlennost'*. 1999. No. 3. P. 45-52. (In Russ.)

About the author

Vishnyakov Mikhail Anatolyevich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Professor of the Department of Aircraft Construction and Quality Management in Mechanical Engineering, Samara State Aerospace University, Russian Federation.

E-mail: barvinok@ssau.ru. Area of Research: application of technological methods of strengthening treatment for the purpose of increasing fatigue resistance of high-loaded parts of gas turbine engines.

УДК 539.374

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ В СОСТАВНЫХ СТЕРЖНЯХ

© 2014 Т. Д. Каримбаев¹, Ш. Мамаев²¹Центральный институт авиационного моторостроения, Москва²Московский физико-технический институт

Рассматривается продольный упругопластический удар по двухслойному составному стержню с закреплённым противоположным концом. Составной стержень сформирован из мягкого (алюминий) и жёсткого (сталь) слоёв при различном их расположении. На контактной границе стержней выполняется условие неразрывности вектора скорости частиц и напряжения. Для описания волновых процессов используется сеточно-характеристический метод, позволяющий корректно строить вычислительные алгоритмы на границах области интегрирования и контактных границах. Изучалось взаимодействие отражённых, преломлённых волн напряжений на границе раздела составных стержней. Явления на границе раздела составных стержней усложнялись их взаимодействием с динамикой изменения, как приложенной внешней нагрузки, так и отражёнными от граничных поверхностей волнами напряжений. В результате численных исследований показаны возможность разрушений на контактной границе для составного стержня алюминий-сталь, а также быстрое затухание нелинейных эффектов в случае сталь-алюминий. Располагая стержни с определёнными механическими характеристиками в определённых расчётах порядке, оказалось возможным управлять уровнем динамической нагруженности каждого отдельного элемента составного стержня, а следовательно, и работоспособностью всего составного стержня.

Составной стержень, контактная граница, волна разгрузки, отражённая волна, преломлённая волна, предел текучести.

В технике получают распространение составные конструкции, основной целью создания которых является использование материалов с необходимыми качествами в соответствующих областях составной конструкции. Например, в дисках авиационных двигателей наиболее напряжённой областью является ступица, в то время как полотно менее нагружено. Использование материала с повышенной прочностью в области ступицы и материала, отвечающего менее жёстким требованиям, в полотне позволяет создать составную конструкцию с привлекательными техническими характеристиками: конструкция может быть более лёгкой, иметь повышенные параметры долговечности и другие технические преимущества. Для изготовления составных конструкций применяют методы сварки трением или диффузионной сварки. В настоящей работе рассматриваются динамические характеристики таких составных конструкций и исследуются особенности волновых процессов, происходящих в них.

1. Основные уравнения плоской продольной волны для неоднородных составных стержней

Процесс распространения продольных волн в неоднородных стержнях, составленных из произвольного числа стержней, характеристики которых изменяются скачком при переходе от одного стержня к другому, описывается следующей системой уравнения в частных производных [1]

$$\begin{cases} \rho_n \frac{\partial v_n}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_n}{\partial x}, \\ \frac{\partial v_n}{\partial x} = \frac{\partial \varepsilon_n}{\partial t}, \\ \frac{\partial \varepsilon_n}{\partial t} - \frac{1}{E_n} \frac{\partial \sigma_n}{\partial t} = F_n(\sigma_n, \chi_n), \end{cases} \quad (1.1)$$

где n – номер соответствующего стержня; σ_n , ε_n – осевое напряжение и деформация; v_n – скорость смещения частиц; E_n – модуль упругости; ρ_n – плотность материала стержня; первое уравнение – уравнение движения, второе – уравнение неразрывности, третье – уравнение состояния для

соответствующих стержней. Правая часть третьего уравнения зависит от скорости пластической деформаций и при отсутствии вязкости преобразуется в известное соотношение пластического течения [2]

$$F_n(\sigma_n, \chi_n) = \begin{cases} 0 & \text{при } \sigma \leq \sigma_n^s, \\ \left(\frac{1}{(E_k)_n} - \frac{1}{E_n} \right) \frac{\partial \sigma}{\partial t} & \text{при } \sigma > \sigma_n^s, \end{cases} \quad (1.2)$$

где $E_k = d\sigma/d\varepsilon$ – касательный модуль к кривой деформирования ($\sigma - \varepsilon$), χ_n – накопленная пластическая деформация.

Решение системы уравнений (1.1) удобно искать относительно безразмерных параметров и безразмерных переменных

$$\bar{\sigma}_n = \frac{\sigma_n}{\sigma_k^s} = \frac{\sigma_n}{\rho_k c_k^2}, \quad \bar{\varepsilon}_n = \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_k^s}, \quad \bar{v}_n = \frac{v_n}{c_k \varepsilon_k^s}, \quad (1.2)$$

$$\bar{\rho}_n = \frac{\rho_n}{\rho_k}, \quad \bar{t} = \frac{t c_k}{l}, \quad \bar{x} = \frac{x}{l},$$

где l – характерная длина, $\sigma_n^s, \varepsilon_n^s$ – пределы упругости стержня по напряжению и деформации, k – номер стержня, где скорость распространения волн $c_n = (E_n/\rho_n)^{1/2}$ максимальная ($c_k = \max c_n$).

В матричной форме данная система уравнений (1.1) относительно безразмерных параметров и переменных представляется в виде

$$\bar{U}_{n,t} + A_n \bar{U}_{n,x} + \bar{B}_n = 0, \quad (1.3)$$

где

$$\bar{U}_n = \{v_n, \varepsilon_n, \sigma_n\}^T, \quad \bar{B}_n = \{0, 0, E_n F_n\}^T,$$

$$A_n = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{\rho_n} \\ -1 & 0 & 0 \\ -E_n & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (1.4)$$

Запятая перед индексом означает частное дифференцирование по соответствующей переменной, T – знак транспонирования.

Система уравнений (1.4) является гиперболической [3] и имеет три семейства действительных характеристик

$$\frac{dx}{dt} = \sqrt{\frac{E_n}{\rho_n}}, \quad \frac{dx}{dt} = -\sqrt{\frac{E_n}{\rho_n}}, \quad \frac{dx}{dt} = 0, \quad (1.5)$$

вдоль которых выполняются следующие дифференциальные соотношения

$$\begin{aligned} d\sigma_n - \sqrt{\rho_n E_n} dV_n &= -E_n F_n dt, \\ d\sigma_n + \sqrt{\rho_n E_n} dV_n &= -E_n F_n dt, \\ d\varepsilon_n - \frac{1}{E_n} d\sigma_n &= F_n dt. \end{aligned} \quad (1.6)$$

Интегрирование уравнений вдоль характеристик реализуется конечно-разностным представлением основных соотношений (1.6).

2. Конечно-разностное представление разрешающих уравнений

Интегрируя соотношения (1.6) вдоль характеристик, можно получить систему уравнений для определения неизвестных величин $\sigma_n^{j+1}, v_n^{j+1}, \varepsilon_n^{j+1}$:

$$\begin{cases} \sigma_{ni}^{j+1} - \sigma_{ni+}^j - \sqrt{\rho_n E_n} \cdot (v_{ni}^{j+1} - v_{ni+}^j) = -E_n (F_{ni}^{j+1} + F_{ni+}^j) \tau / 2, \\ \sigma_{ni}^{j+1} - \sigma_{ni-}^j + \sqrt{\rho_n E_n} \cdot (v_{ni}^{j+1} - v_{ni-}^j) = -E_n (F_{ni}^{j+1} + F_{ni-}^j) \tau / 2, \\ \varepsilon_{ni}^{j+1} - \varepsilon_{ni}^j - \frac{1}{E_n} \cdot (\sigma_{ni}^{j+1} - \sigma_{ni}^j) = \frac{\tau}{2} (F_{ni}^{j+1} + F_{ni}^j), \end{cases} \quad (2.1)$$

n – номер стержня, i – номер узла по пространственной переменной, $j, j+1$ – номер нижнего и верхнего слоя по времени, значки “+” и “-” – точки пересечения характеристики нижним слоем по времени (неузловые точки шаблона), опущенной из точки $A(i, j+1)$ верхнего слоя по времени. Детали получения уравнения (2.1) приведены в [4].

Для вычисления величин $\sigma_{ni\pm}^j, v_{ni\pm}^j, F_{ni\pm}^j$ в неузловых точках шаблона проводится интерполирование значений функции через их значения в узловых точках сетки [5]. При этом для того, чтобы ошибка, вводимая на одном шаге по времени, имела третий и более высокие порядки точности относительно σ, v и не ниже второго порядка точности относительно F , что позволяет обеспечить расчёт со вторым порядком точности относительно искомых величин, следует использовать следующие соотношения квадратичного интерполирования для вычисления $\sigma_{ni\pm}^j, v_{ni\pm}^j$ и линейного интерполирования для вычисления $F_{ni\pm}^j$.

При линейном интерполировании используется формула

$$R_{n\pm} = R_{in} - \frac{\sqrt{E_n/\rho_n}\tau}{h} \cdot (R_{in} - R_{(i\mp 1)n}) + O(\tau^2). \quad (2.2)$$

Квадратичное интерполирование для внутренних точек

$$\begin{cases} v_{ni}^{j+1} = \frac{1}{2} \left[(\sigma_{ni-}^j - \sigma_{ni+}^j - 0.5\tau \cdot E_n (F_{ni-}^j - F_{ni+}^j)) / \sqrt{\rho_n E_n} + v_{ni-}^j + v_{ni+}^j \right] \\ \sigma_{ni}^{j+1} = \sigma_{ni+}^j + \sqrt{\rho_n E_n} (v_{ni}^{j+1} - v_{ni+}^j) - 0.5\tau \cdot E_n (F_{ni}^{j+1} + F_{ni+}^j), \\ \varepsilon_{ni}^{j+1} = \sigma_{ni}^{j+1} + (\varepsilon - \sigma)_{ni}^j + \frac{\tau}{2} (F_{ni}^{j+1} + F_{in}^j). \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} R_{n\pm} &= \frac{\sqrt{E_n/\rho_n}\tau \cdot (\sqrt{E_n/\rho_n}\tau \pm h)}{2h^2} \cdot R_{(i-1)n} - \\ &- \frac{(E_n/\rho_n)\tau^2 - h^2}{h^2} \cdot R_{in} + \\ &+ \frac{\sqrt{E_n/\rho_n}\tau (\sqrt{E_n/\rho_n}\tau \mp h)}{2h^2} R_{(i+1)n} + O(\tau^3) \end{aligned} \quad (2.3)$$

и для граничных точек и точек контактных границ стержней

$$\begin{aligned} R_{n\pm} &= \frac{(\sqrt{E_n/\rho_n}\tau - h) \cdot (\sqrt{E_n/\rho_n}\tau - 2h)}{2h^2} R_{in} - \\ &- \frac{\sqrt{E_n/\rho_n}\tau \cdot (\sqrt{E_n/\rho_n}\tau - 2h)}{h^2} R_{(i\mp 1)n} + \\ &+ \frac{\sqrt{E_n/\rho_n}\tau \cdot (\sqrt{E_n/\rho_n}\tau - h)}{2h^2} \cdot R_{(i\mp 2)n} + O(\tau^3). \end{aligned} \quad (2.4)$$

Шаги по времени τ и пространственной переменной h выбираются в соответствии с требованием условия устойчивости [4]: $c\tau/h \leq 1$.

3. Расчетная схема решения уравнений

При реализации расчётной схемы конечно-разностным методом разрешающие уравнения отличаются во внутренних и граничных точках и в точках контактных границ стержней.

3.1. Решения во внутренних точках. Во внутренних точках неизвестные величины $\sigma_i^{j+i}, \varepsilon_i^{j+i}, v_i^{j+i}$ определяются из системы линейных алгебраических уравнений (2.1)

3.2. Решения в граничных точках.

Обычно на границе задаются напряжение σ или скорость частицы v . Граничные условия в общем случае можно записать в виде

$$x = 0, \quad (3.2)$$

$$A_1 \cdot \sigma(0, t) + B_1 \cdot v(0, t) = Q_1(t),$$

$$x = L, \quad (3.3)$$

$$A_2 \cdot \sigma(L, t) + B_2 \cdot v(L, t) = Q_2(t),$$

в которых A_1, B_1, A_2, B_2 – некоторые постоянные. В зависимости от конкретных значений A_i, B_i можно сформулировать граничные условия различного типа.

В граничных точках одна из характеристик выходит за предел рассматрива-

емой области. В связи с этим в системе уравнений (2.1) нельзя использовать одно из уравнений, которое соответствует характеристике, выходящей из области исследования. Если присоединить к оставшимся при этом двум уравнениям одно из граничных условий (3.2) или (3.3), то получается замкнутая система уравнений относительно искомых величин σ, ε, v в граничной точке.

3.3. Решение в точках контактной границы стержней. Точка контактной границы стержней одновременно принадлежит обоим стержням (n -му и $(n+1)$ -му). По отношению к n -му стержню эта граница будет считаться как правая, а по отношению к $(n+1)$ -му стержню – как левая, поэтому получается следующая система двух уравнений

$$\sigma_{ni}^{j+1} - \sigma_{ni+}^j - \sqrt{\rho_n E_n} \cdot (v_{ni}^{j+1} - v_{ni+}^j) = -E_n (F_{ni}^{j+1} + F_{ni+}^j) \tau / 2, \quad (3.4)$$

$$\sigma_{(n+1)i}^{j+1} - \sigma_{(n+1)i-}^j + \sqrt{\rho_{n+1} E_{n+1}} \cdot (v_{(n+1)i}^{j+1} - v_{(n+1)i-}^j) = -E_{n+1} (F_{(n+1)i}^{j+1} + F_{(n+1)i-}^j) \tau / 2.$$

На контактной границе стержней принимается условие неразрывности вектора скорости частиц и напряжения

$$\sigma_{ni}^{j+1} = \sigma_{(n+1)i}^{j+1}, \quad v_{ni}^{j+1} = v_{(n+1)i}^{j+1}. \quad (3.5)$$

Таким образом, на контактной границе стержней имеются четыре уравнения (3.4), (3.5) с четырьмя неизвестными

$$\sigma_{ni}^{j+1}, \quad v_{ni}^{j+1}, \quad \sigma_{(n+1)i}^{j+1}, \quad v_{(n+1)i}^{j+1}.$$

4. Постановка задачи

Исследуется распространение плоских продольных упругопластических волн

в биметаллическом стержне конечной длины l . Составными частями биметаллического стержня являются алюминий и сталь при различных способах их расположения (алюминий–сталь, сталь–алюминий). Нелинейное поведение материалов стержня задано экспериментальными кривыми деформирования, заданными в табличной форме и приведёнными в табл. 1 и 2. Модули упругости и плотности материалов исследуемых стержней составляют:

$$E^{cm} = 200 \text{ ГПа},$$

$$E^{al} = 68,5 \text{ ГПа}$$

$$\rho^{cm} = 7,9511 \cdot 10^{-10} \text{ кг} \cdot \text{сек}^2 / \text{мм}^4.$$

$$\rho^{al} = 2,755 \cdot 10^{-10} \text{ кг} \cdot \text{сек}^2 / \text{мм}^4.$$

Таблица 1. Экспериментальная зависимость напряжение – деформация (сталь)

$\varepsilon_i \cdot 10^4$	$\frac{\sigma_i}{9.8} \text{ МПа}$	$\sigma_i = \frac{\sigma_i}{\rho c_1^2} \cdot 10^4$	$\varepsilon_i \cdot 10^4$	$\frac{\sigma_i}{9.8} \text{ МПа}$	$\sigma_i = \frac{\sigma_i}{\rho c_1^2} \cdot 10^4$
0	0	0	22	28,0	1,4
10	20,00	1,0	32	30,0	1,5
11	20,75	1,0375	46	32,0	1,6
12	21,50	1,075	72	34,0	1,7
14	23,00	1,15	133	36,0	1,8
16	24,50	1,225	3600	74,0	3,7
18	26,00	1,3		0	

Таблица 2. Экспериментальная зависимость напряжение – деформация (алюминиевый сплав Д-16 АТ)

$\varepsilon_i \cdot 10^4$	$\frac{\sigma_i}{9.8} \text{ МПа}$	$\sigma_i = \frac{\sigma_i}{\rho c_1^2} \cdot 10^4$	$\varepsilon_i \cdot 10^4$	$\frac{\sigma_i}{9.8} \text{ МПа}$	$\sigma_i = \frac{\sigma_i}{\rho c_1^2} \cdot 10^4$
0	0	0	14	31,75	1,5875
2,77	19,00	0,95	20	33,5	1,675
3,6	24,00	1,2	27,5	35,00	1,75
4,1	26,00	1,3	47,5	37,50	1,875
5,0	27,50	1,375	71,87	40,0	2,0
6,5	29,00	1,45	140	44,0	2,2
8,75	30,00	1,50			

На конце стержня $x=0$ действует нестационарная нагрузка

$$\sigma_1(0,t) = f(t) \quad \text{при } x = 0. \quad (4.1)$$

Другой конец стержня $x = l$ жёстко закреплён, т.е.

$$v_2(l,t) = 0 \quad \text{при } x = l. \quad (4.2)$$

На контактной границе стержней принято условие неразрывности вектора скорости частиц и напряжения

$$\sigma_1(l_1,t) = \sigma_2(l_1,t), \quad v_1(l_1,t) = v_2(l_1,t). \quad (4.3)$$

Здесь $l = l_1 + l_2$ – общая длина стержня, l_1, l_2 – длины соответствующих стержней.

Стержень в начальный момент времени находится в состоянии покоя

$$\sigma_n(x,0) = v_n(x,0) = \varepsilon_n(x,0) = 0 \quad (n=1,2) \quad \text{при } t=0 \text{ и } 0 \leq x \leq l \quad (4.4)$$

При $t > 0$ от начального сечения $x=0$ начинает распространяться возмущение со скоростью упругих волн. Перед фронтом волны точки стержня находятся в состоянии покоя, т.е.

$$\sigma_n(x,t) = v_n(x,t) = \varepsilon_n(x,t) = 0 \quad (n=1,2) \quad \text{при } x \geq t \quad (4.5)$$

Внешняя динамическая нагрузка $f(t)$ в начале до момента времени t_0 линейно возрастает, а затем так же линейно убывает до нуля, т.е.

$$f(t) = \begin{cases} At & \text{при } t \leq t_0, \\ At_0 - B(t-t_0) & \text{при } t_0 < t \leq t_1, \\ 0 & \text{при } t > t_1. \end{cases} \quad (4.6)$$

Здесь A, B – постоянные, характеризующие скорости возрастания и убывания внешней нагрузки, t_0 – время, соответствующее максимуму внешней нагрузки,

t_1 – общее время действия внешней нагрузки.

Задача сводится к интегрированию системы уравнений (1.3) при граничных условиях (4.1)-(4.3) и нулевых начальных условиях (4.4). Задача решалась при следующих данных:

$$h = \tau = 0,025; l = 100h; l_1 = l_2 = 50h; A = 3; \\ B = 2; t_0 = 20\tau = 0,5; t_1 = 50\tau = 1,25.$$

Здесь h, τ – шаг по координате и по времени, $\sigma_s^{cm} = \varepsilon_s^{cm} = 1, \sigma_s^{al} = 0,95, \varepsilon_s^{al} = 2,77$ – пределы упругости по напряжению и деформации. $f(t_0) = 1,5$ – максимальное значение внешней нагрузки.

5. Анализ численных результатов

На рис. 1, а представлено распределение напряжений по оси x для составного стержня алюминий-сталь в фиксированные моменты времени. Из приведённых кривых 1, 2 при $t=20\tau$ и $t=50\tau$ видно, что со временем $t > t_0 = 20\tau$ стержень начинает разгружаться и по нему распространяется волна разгрузки, максимальные значения напряжений падают. В момент времени $t=50\tau$ возмущение доходит до контактной границы (раздела) стержней. В этот момент времени обширная область ($18h \leq x \leq 37h$) первого стержня находится в зоне пластических деформаций. В дальнейшем с ростом времени область пластических деформаций приближается к контактной границе стержней. Известно [6], что при увеличении акустического импеданса $R = \rho_i c_i$ упругих слоёв волна напряжения увеличивается, скорость её распространения снижается (при уменьшении акустического импеданса ситуация будет обратной). Этим обстоятельством объясняется то, что при прохождении возмущений в стержень с большей жёсткостью:

– уровни напряжений повышаются и второй стержень в приведённые на рис.1, а моменты времени находится в пластически нагруженном состоянии;

– передний фронт упругой волны в расчётное время не достигает нулевого значения (кривые 3 и 4).

Так как уровни напряжений во втором стержне повышаются и выполняется условие равенства напряжений на контактной границе (4.3), то в менее жёстком и прочном первом стержне могут появиться граничные повреждения.

Из-за отставания заднего фронта пластической волны расширяется время действия нагрузки в области нелинейных деформаций. После отражения волны от жёстко закрепленного конца (кривая 6) напряжение в зафиксированный момент времени $t = 120\tau$ достигает максимального значения и волна напряжения движется в обратном направлении. Отражённая от закреплённой поверхности волна в моменты времени $t < 150\tau$ (кривые 3, 4, 5, 6 и 7) ещё не достигает контактной границы. Те же кривые 3, 4, 5, 6 и 7 в первом стержне характеризуют распределения напряжений в соответствующие моменты времени отражённой от контактной границы волны напряжений.

В моменты времени $t = 160\tau, t = 200\tau$ характер распределения напряжений определяется:

– во втором стержне наложением волн, отражённых от закреплённой поверхности и отражённых и преломлённых от контактной границы;

– в первом стержне наблюдается наложение отражённых от свободной поверхности волны, отражённой от контактной границы и преломлённой из второго стержня (отражённая от закреплённого конца) волны напряжений.

На рис. 1, б представлен график распределения напряжений для составного стержня при обратном расположении стержней по жёсткости (сталь, алюминий). Здесь картина существенно изменилась. Все события, как правило, происходят в первом (жёстком) стержне. Пик начального пластического деформирования в первом

стержне постепенно снижается, стержень начинает разгружаться (кривые 1 и 2). На переднем участке этих кривых имеется область постоянных напряжений, которая с возрастанием времени растёт. Эта область соответствует отставанию пластической волны от упругой волны.

Волна разгрузки, последовательно разгружая заданный внешний импульс, превращает его в упругий сигнал в форме трапеции (кривые 3, 4). В соответствии с импедансом стержней уровни напряжений во втором стержне меньше, чем в первом.

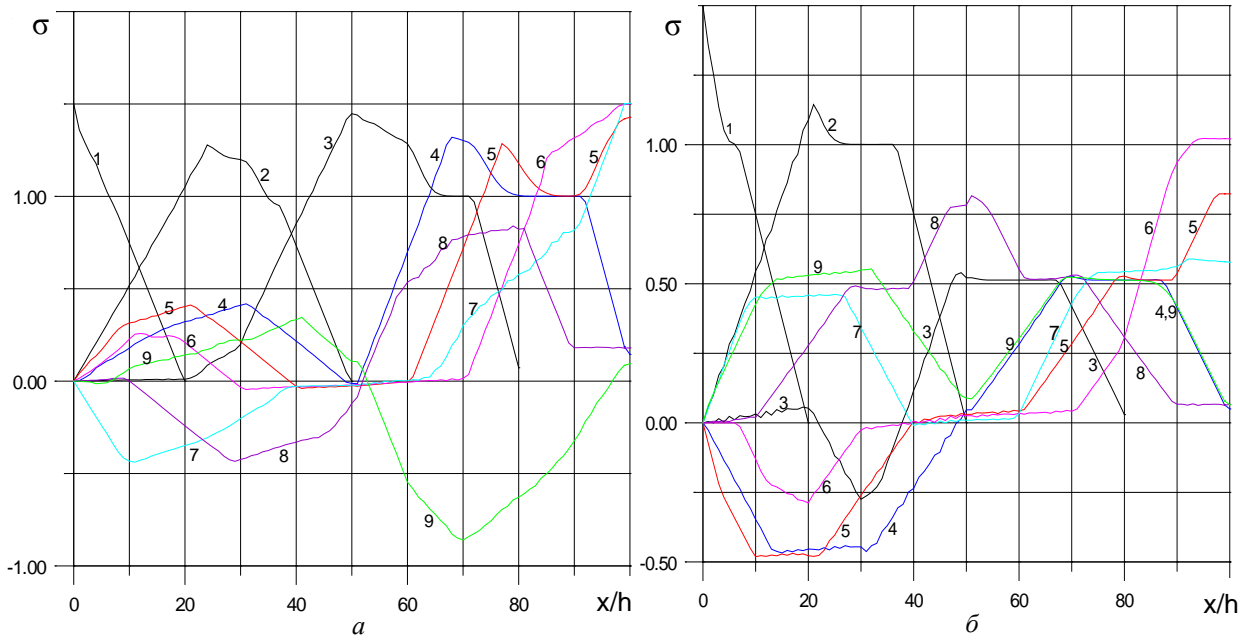


Рис. 1. Составной стержень алюминий-сталь (а) и сталь-алюминий (б).
 Распределение напряжений по оси x в фиксированные моменты времени t :
 1(20τ), 2(50τ), 3(80τ), 4(100τ), 5(110τ), 6(120τ), 7(140τ), 8(160τ), 9(200τ)

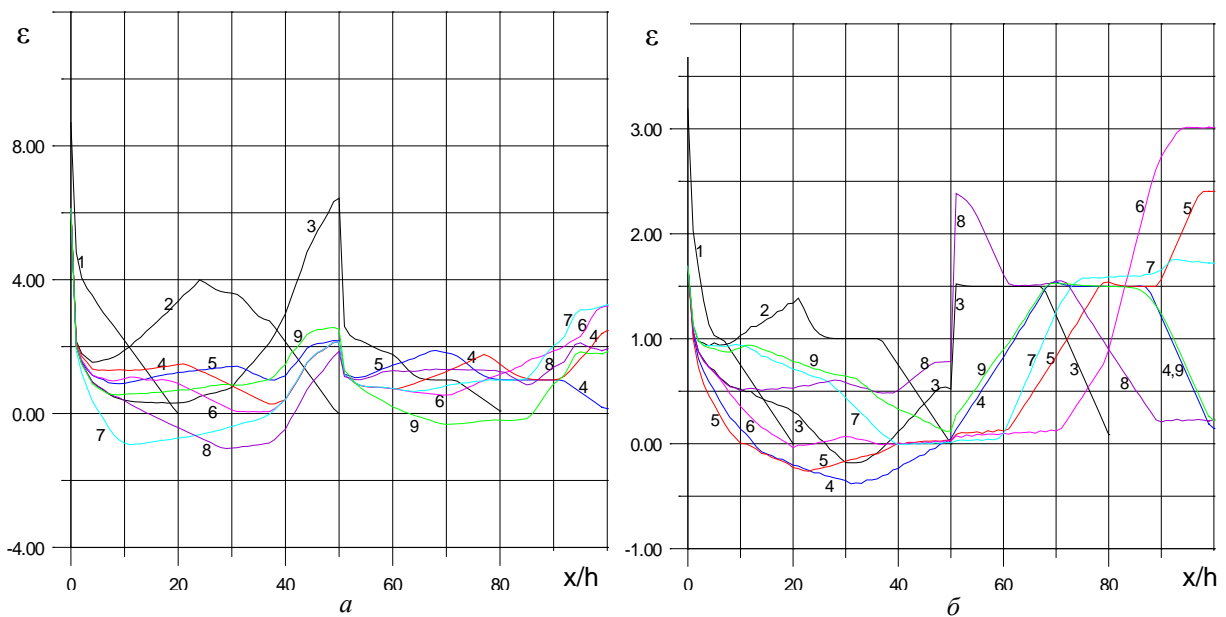


Рис. 2. Составной стержень алюминий-сталь (а) и сталь-алюминий (б).
 Распределение деформаций по оси x в фиксированные моменты времени t :
 1(20τ), 2(50τ), 3(80τ), 4(100τ), 5(110τ), 6(120τ), 7(140τ), 8(160τ), 9(200τ)

Кривая 3 демонстрирует, что передний фронт отражённой от контактной границы волны напряжений в первом стержне и передний фронт преломлённой волны напряжений во втором стержне находятся практически на равном удалении от контактной поверхности. В момент времени $t=120\tau$ (кривая 6) при отражении волны от закреплённого конца точки в его окрестности пластически деформированы. До момента времени $t=150\tau$ отражённые в первом стержне волны и преломлённые во втором не взаимодействуют друг с другом (кривые 3, 4, 5, 6, 7). При переходе преломлённой волны в моменты времени $t > 150\tau$ на её состояние оказывает влияние

отражённая волна, а на состояние первого стержня – преломлённая из второй области волна. Это обстоятельство можно видеть на кривых 8 и 9, соответствующих моментам времени $t=160\tau$ и $t=200\tau$.

Из рис. 2 видно, что в районе перехода от слоя к слою градиент деформации большой и деформации практически здесь терпят разрыв. При переходе от мягкого слоя к жёсткому на границе раздела стержней деформация резко падает (рис. 2, а), а при переходе из жёсткого слоя к мягкому слою деформация резко возрастает (рис. 2, б). Это обстоятельство в некоторой мере может быть обусловлено принятыми в расчётах пределами текучести материалов.

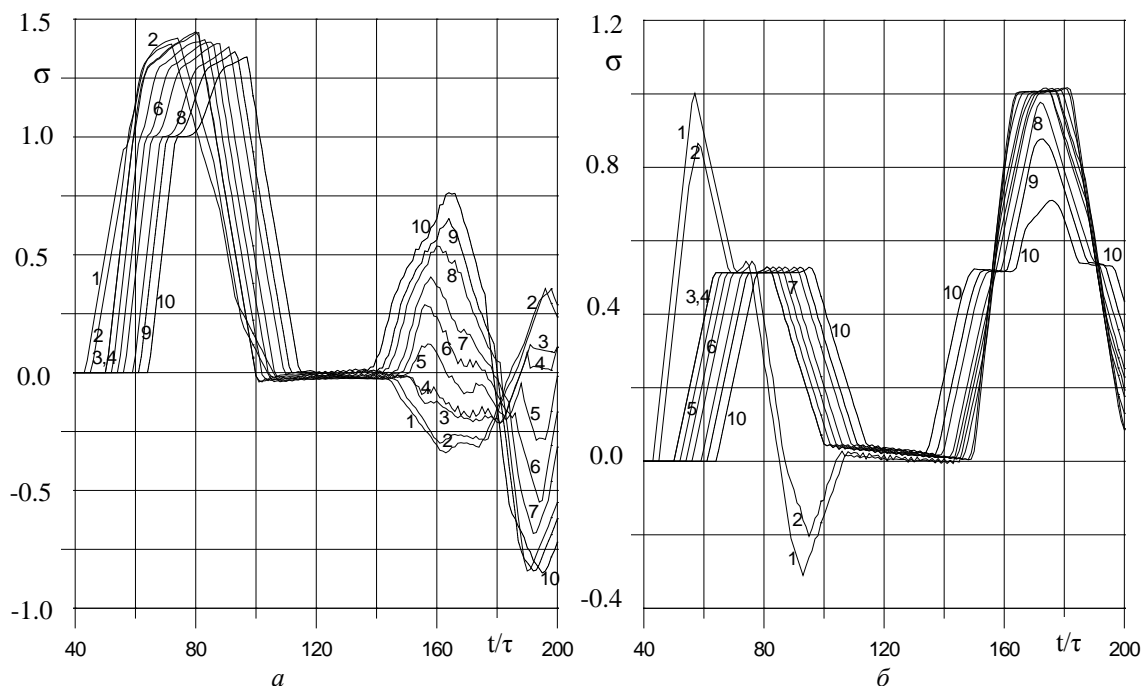


Рис. 3. Составной стержень алюминий-сталь (а) и сталь-алюминий (б).

Осциллограммы напряжений для сечений x :

43h (1), 45h (2), 50h (3), 51h (4), 53h (5), 55h (6), 57h (7), 60h (8), 62h (9), 65h (10)

На рис. 3, б приведены осциллограммы напряжений для точек, расположенных в окрестности контактной границы стержней $x=43, 45, 50, 51, 53, 55, 57, 60, 62, 65h$ составного стержня сталь-алюминий. Из осциллограммы видно, что в точках, лежащих в отрезке (50h, 65h), уровни напряжений в течение определённого времени держатся на постоянном

уровне. Это состояние области постоянных упругих напряжений во времени, образованной волной разгрузки (сравни с кривой 3, 4 рис. 1, б). В рассматриваемых точках с момента времени $t=100\tau$ по $t=140\tau$ напряжения практически равны нулю. Это означает, что упругая волна в рассматриваемой точке заканчивает своё действие и через некоторое время

накладывается отражённая от закреплённого конца волна напряжения, которая вырастает до максимального значения, равного 1. В случае, когда волна возвращается к свободному концу ($x=0$) $t > 150\tau$, напряжения в рассматриваемых точках для комбинации алюминий-сталь (рис. 3, а) могут принимать как отрицательные, так и положительные значения, в то время как для другого расположения стержней они принимают только положительные значения. Отмеченный результат легко объясняется анализом распространения волны на характеристической плоскости (x, t). Сначала рассмотрим точку $x=45h$ (2), расположенную в первом стержне, а поведение точек 1–4 аналогичное. В момент времени $t=45\tau$ внешнее возмущение вступает в точку $x=45h$ (2), заканчивает своё действие в момент времени $t=95\tau$, а в момент времени $t=55\tau$ в эту точку вступает отражённая волна от

контактной границы и происходит наложение волн, и этот процесс продолжится до момента времени $t=105\tau$, уровень напряжения понизится, становится отрицательным. В момент времени $t=145\tau$ в эту точку вступает отражённая от свободного конца (отражённая от контактной границы волна отражается от свободного конца) волна, а в момент времени $t=155\tau$ вступает отражённая волна от закреплённого конца. Начиная с момента времени $t > 155\tau$ происходит наложение волн, отражённых от свободного и закреплённого концов. Отражённая волна от свободного конца отрицательная, поэтому до момента времени $t=185\tau$ напряжение отрицательное, а затем становится положительным. Для точек $x > 51h$, расположенных ближе к закреплённому сечению, картина будет обратная (смотри кривые 5–10).

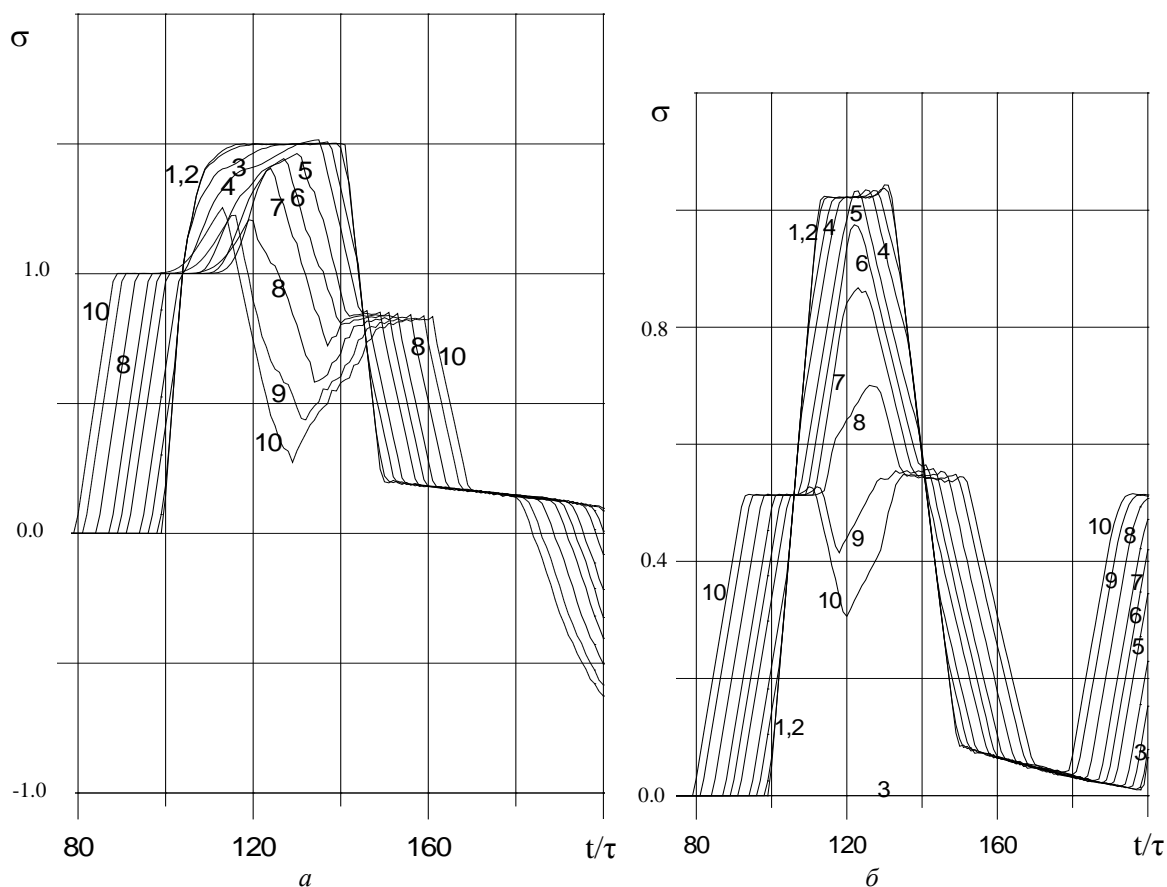


Рис. 4. Составной стержень алюминий-сталь (а) и сталь-алюминий (б).

Осцилограммы напряжений для сечений x :

100h (1), 99h (2), 97h (3), 95h (4), 92h (5), 90h (6), 88h (7), 85h (8), 82h (9), 80h (10)

На рис. 4 приведены осциллограммы напряжений для точек, расположенных в окрестности закреплённого конца $80h \leq x \leq 100h$ стержня.

Из рис 4, а для стержня (алюминий-сталь) видно, что максимальное значение напряжений превышает предел текучести стали в 1,5 раза, т.е. $\sigma_{ст}^{max} = 1,5 = 1,5\sigma_s^{ст}$. Все точки указанного интервала находятся в пластическом состоянии.

Для стержня (сталь-алюминий) (рис. 4, б) максимальное значение напряжений превышает предел текучести алюминия в 1,1 раза, т.е. $\sigma_{ал}^{max} = 1,043 = 1,1\sigma_s^{ал}$ и область пластических деформации, примыкающая к закреплённому концу, сужается, т.е. $90h < x \leq 100h$.

В первом случае (алюминий-сталь) максимальное значение напряжений в закреплённом конце в 1,44 раза превышает максимальное значение напряжений, реа-

лизованном при другом расположении стержней, т.е. $\sigma_{ст}^{max} = 1,44\sigma_{ал}^{max}$.

Выводы

Результаты расчётов находятся в полном соответствии с общими законами перехода от области к области согласно акустическому импедансу, в том числе в области нелинейных деформаций.

Расчётами показана возможность появления разрушений на границе контакта разнородных материалов в случае составной конструкции с материалом меньшей жёсткости на материал большей жёсткости.

Составная конструкция с комбинацией «жёсткий» материал – «мягкий» материал способствует относительно быстрому затуханию нелинейных эффектов в ней.

Библиографический список

1. Ержанов Ж.С., Каримбаев Т.Д., Байтелиев Т.Б. Волны напряжений в однородных и неоднородных средах. Алматы: Гылым, 1998. 171 с.
2. Каримбаев Т.Д., Мамаев Ш. Теория течения при переменных скоростях деформаций // Прикладные задачи механики деформируемого твёрдого тела. Алма-Ата, 1989. С. 52-58.
3. Годунов С.К. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1971. 416 с.
4. Кукуджанов В.Н. Компьютерное моделирование деформирования, повреждения и разрушение неупругих материалов и конструкций: учеб. пособие. М.: МФТИ, 2008. 215 с.
5. Турчак Л.И. Основы численных методов. М.: Наука, 1987. 320 с.
6. Лаптев В.И., Тришин Ю.А. Увеличение начальной скорости и давления при ударе по неоднородной преграде // Прикладная механика и техническая физика. 1974. № 6. С. 128-132.

Информация об авторах

Каримбаев Тельман Джамалдинович, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом композиционных материалов, Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва. E-mail: karimbayev@ciam.ru. Область научных интересов: динамика сплошной среды.

Мамаев Шари, кандидат физико-математических наук, доцент, стажёр кафедры «Вычислительная математика», Московский физико-технический институт. E-mail: sch_mamaev@mail.ru. Область научных интересов: моделирование нестационарных процессов в деформируемых твёрдых телах.

PECULIARITIES OF DISTRIBUTION OF DYNAMIC DISTURBANCES IN COMPOSITE RODS

© 2014 T. D. Karimbayev¹, Sh. Mamayev²

¹Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russian Federation

²Moscow institute of Physics and Technology, Moscow, Russian Federation

The paper deals with longitudinal elastic-plastic impact on a two-layer composite rod with a fixed opposite end. The composite rod consists of a soft layer (aluminum) and a hard layer (steel), with their position varying. The condition of the continuity of the particle velocity vector and the stress is met on the contact boundary of the rods. To describe the wave processes the grid-characteristic method is used which makes it possible to construct computational algorithms on the borders of the integration area and the interfaces correctly. The interaction of reflected and refracted stress waves at the interface of composite rods is analyzed. The phenomena on the interface of composite rods are made more complicated by their interaction with the dynamics of changing both the applied external load and the stress waves reflected from the boundary surfaces. As a result of numerical studies we have shown the possibility of damages on the interface for an aluminum-steel composite rod and rapid decay of non-linear effects in the case of steel-aluminum. Positioning rods with specific mechanical characteristics in the order specified by the calculations, we found a possibility to control the level of dynamic loading of each individual element of the composite rod, and hence the operability of the whole composite rod.

Composite rod, interface, unloading wave, reflected wave, refracted wave, yield strength.

References

1. Erzhanov Zh.S., Karimbaev T.D., Bajteliev T.B. Volny naprjazhenij v odnorodnyh i neodnorodnyh sredah [Stress waves in homogeneous and nonhomogeneous media.]. Alma-ty: Gylym Publ., 1998. 171 p.
2. Karimbaev T.D., Mamaev Sh. Teorija techenija pri peremennyh skorostjah deformacij. Prikladnye zadachi mehaniki deformiruemogo tverdogo tela. [Flow theory for variable deformation velocities]. Alma-Ata, 1989. P. 52-58.
3. Godunov S.K. Uravnenija Matematicheskoj fiziki [Equations of mathematical physics.]. Moscow: Nauka Publ., 1971. 416 p.
4. Kukudzhанov V.N. Komp'juternoe modelirovanie deformirovanija, povrezhdaemosti i razrushenie neuprugih materialov i konstrukcij [Computer simulation of deformation, damage resistance and destruction of non-elastic materials and structures]. Moscow: Moscow Inst. of Phys. and Tech. St. Univ. Publ., 2008. 215 p.
5. Turchak L.I. Osnovy chislennyh metodov [Foundations of numerical methods]. Moscow: Nauka Publ., 1987. 320 p.
6. Laptev V.I., Trischin Yu.A. Increase of initial velocity and pressure in case of impact on an inhomogeneous obstacle // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 1974. No.6. P.128-132.

About the authors

Karimbayev Telman Dzhamaldinovich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of the Department of Composite Materials, Central Institute of Aviation Motors (CIAM), Moscow, Russian Federation. E-mail: karimbayev@ciam.ru. Area of Research: continuum dynamics.

Mamayev Shari, Candidate of Science (Engineering), research assistant of the Department of Computational Mathematics, Moscow institute of Physics and Technology (State University), Moscow, Russian Federation. E-mail: sch_mamaev@mail.ru. Area of Research: modeling non-stationary processes in deformable solid bodies.

УДК 534.83

РАСЧЁТ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ МНОГОСЛОЙНОЙ КОНСТРУКЦИИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА «ОБРАТНОЙ МАТРИЦЫ»

© 2014 П. А. Попов¹, А. С. Осипов², А. А. Синдюков¹¹Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)²ОАО «РКЦ «ПРОГРЕСС», г. Самара

Многослойные конструкции широко применяются в строительстве жилых помещений, судостроении, в авиационной и ракетно-космической технике. При проектировании таких конструкций для прогнозирования уровней шума, возникающего внутри того или иного помещения или отсека, необходима оценка их звукоизоляционной способности. В данной работе описывается методика расчёта звукоизоляции многослойной конструкции, разработанная на основе решения волновых уравнений в каждом из слоёв с учётом угла падения звуковых волн и потерь в слоях; ввода граничных условий, устанавливающих равенство на границах сред нормальных составляющих колебательных скоростей и акустических давлений; составления системы алгебраических комплексных уравнений и соответствующего им матричного уравнения, составления обратной матрицы коэффициентов при функциях акустического давления. Приводятся примеры расчётов коэффициентов звукоизоляции для многослойных конструкций с различными параметрами (поверхностными массами, толщинами слоёв, различными углами падения), приводится графическое сравнение результатов расчётов методами «обратной матрицы» и импедансным методом, а также графическое сравнение результатов лётно-конструкторских измерений (ЛКИ) звукоизоляции штатного головного обтекателя (ГО), состоящего из слоёв углеродной стеклоткани, алюминиевых сот и слоя пенополиуретана, и результаты расчёта методом «обратной матрицы», указывается преимущество используемого метода.

Акустическое давление, звукоизоляция, коэффициент потерь, обратная матрица, импеданс, коэффициент распространения, волновое число, частота.

Звукоизоляционные характеристики различных панелей условно разделяют на «резонансные» и «нерезонансные». Звукоизоляционный спектр, где перепад интенсивности акустического давления зависит лишь от инерционных свойств обечайки, называют «нерезонансной» звукоизоляцией. Наиболее интенсивное прохождение акустических волн наблюдается в местах совпадения собственных частот звукоизолирующей панели и частот акустических волн, а также на частотах, соответствующих возникновению стоячих волн в замкнутых объёмах («резонансная звукоизоляция»). Наиболее простые закономерности «нерезонансной» звукоизоляции, получившие практическое применение, могут быть сформулированы и проанализированы при рассмотрении прохождения звука через плоскопараллельный слой произвольной толщины и бесконечной длины. Будем предполагать, что

распространение звука в слое происходит только в виде продольных волн.

В соответствии с классическим определением *звукоизоляции* [1] имеем:

$$R = 10 \lg \left(\frac{I_{11}}{I_{31}} \right),$$

где I_{11} – интенсивность падающей волны, Вт/м²; I_{31} – интенсивность прошедшей волны, Вт/м².

Если среды по разные стороны конструкции одинаковые, получим:

$$R = 10 \lg \left(\frac{P_{11}^2}{P_{31}^2} \right). \quad (1)$$

Рассмотрим волновое уравнение:

$$\Delta P - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = 0,$$

где $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа;

c – скорость звука в веществе, м/с; P – функция пульсаций давления, Па.

Его решение представляет собой распространение акустических волн внутри каждой из сред. В нашем, частном, случае – это распространение акустического давления соответственно слева, внутри и справа («отраженная часть» отсутствует) от границы с конструкцией панели:

$$\begin{aligned} P_1(x, t) &= P_{11}e^{i(\omega t - k_1 x)} + P_{12}e^{i(\omega t + k_1 x)}, \\ P_2(x, t) &= P_{21}e^{i(\omega t - k_2 x)} + P_{22}e^{i(\omega t + k_2 x)}, \\ P_3(x, t) &= P_{31}e^{i(\omega t - k_3 x)}. \end{aligned}$$

Амплитуды (константы интегрирования) P_{sj} находят из граничных условий, выражающих III закон Ньютона:

$$P_s = P_{s+1}, \tag{2}$$

а также закон равенства нормальных составляющих колебательных скоростей, которые на границе равны между собой [1]:

$$v_s^n = v_{s+1}^n. \tag{3}$$

При этом связь между нормальными составляющими колебательных скоростей и давления на границе имеет вид:

$$v_s^n = \frac{P_{sj} - P_{s,j+1}}{\rho_s c_s}, \tag{4}$$

где s – количество сред (в данном случае $s = 1, 2$), $j = 1, 2$ – индекс падающей «1» и отраженной «2» волн.

Установим граничные условия, для этого воспользуемся выражениями (1) – (4):

1) На границе воздуха и левого края конструкции при $x=0$ получим:

$$\begin{aligned} P_{11} + P_{12} &= P_{21} + P_{22}, \\ \frac{P_{11} - P_{12}}{\rho_1 c_1} &= \frac{P_{21} - P_{22}}{\rho_2 c_2}. \end{aligned} \tag{5}$$

2) На границе правого края конструкции и воздуха при $x=h$:

$$\begin{aligned} P_{21}e^{i(\omega t - k_2 h)} + P_{22}e^{i(\omega t + k_2 h)} &= P_{31}e^{i(\omega t - k_3 h)}, \\ \frac{P_{21}e^{i(\omega t - k_2 h)} - P_{22}e^{i(\omega t + k_2 h)}}{\rho_2 c_2} &= \frac{P_{31}e^{i(\omega t - k_3 h)}}{\rho_1 c_1}. \end{aligned} \tag{6}$$

Как легко заметить, выражения (6) можно сократить на $e^{i\omega t}$ при $x=h$:

$$\begin{aligned} P_{21}e^{-ik_2 h} + P_{22}e^{ik_2 h} &= P_{31}e^{-ik_3 h}, \\ \frac{P_{21}e^{-ik_2 h} - P_{22}e^{ik_2 h}}{\rho_2 c_2} &= \frac{P_{31}e^{-ik_3 h}}{\rho_1 c_1}. \end{aligned} \tag{7}$$

В соответствии с определением звукоизоляции (1) найдём из 4 уравнений (5)

и (7) отношение $\frac{P_{11}^2}{P_{31}^2}$. Для этого выразим

амплитуды падающей, отражённой и прошедшей волн P_{11} , P_{21} , P_{22} через амплитуду прошедшей волны P_{31} .

В результате получим следующее выражение для расчёта «нерезонансной» звукоизоляции произвольной толщины [1]:

$$R = 10 \lg(\cos^2(hk_2) + \frac{1}{4}(\frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2} + \frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1})^2 \sin^2(hk_2)),$$

где h – толщина слоя, k_2 – волновое число материала конструкции, $\rho_1 c_1$ – акустическое сопротивление воздуха, $\rho_2 c_2$ – акустическое сопротивление материала конструкции.

Для многослойных конструкций, учитывая потери в веществе, наклонный угол падения, можно написать следующую систему уравнений, выражающих граничные условия (2), (3), (4):

$$\begin{aligned} P_{11} + P_{12} &= P_{21} + P_{22}, \\ \frac{P_{11} - P_{12}}{Z_{11}} &= \frac{P_{21} - P_{22}}{Z_{22}}, \end{aligned} \tag{8}$$

$$\frac{P_{21}e^{\gamma_2(-d_{11}\sin(\alpha_2)-d_1\cos(\alpha_2))} + P_{22}e^{\gamma_2(-d_{11}\sin(\alpha_2)+d_1\cos(\alpha_2))}}{Z_{22}} = \frac{P_{31}e^{\gamma_3(-d_{11}\sin(\alpha_3)-d_1\cos(\alpha_3))} + P_{32}e^{\gamma_3(-d_{11}\sin(\alpha_3)+d_1\cos(\alpha_3))}}{Z_{33}},$$

$$\frac{P_{21}e^{\gamma_2(-d_{11}\sin(\alpha_2)-d_1\cos(\alpha_2))} - P_{22}e^{\gamma_2(-d_{11}\sin(\alpha_2)+d_1\cos(\alpha_2))}}{Z_{22}} = \frac{P_{31}e^{\gamma_3(-d_{11}\sin(\alpha_3)-d_1\cos(\alpha_3))} - P_{32}e^{\gamma_3(-d_{11}\sin(\alpha_3)+d_1\cos(\alpha_3))}}{Z_{33}},$$

...

$$P_{j1}e^{\gamma_j(-d_{j-1,j-1}\sin(\alpha_j)-d_{j-1}\cos(\alpha_j))} + P_{j2}e^{\gamma_j(-d_{j-1,j-1}\sin(\alpha_j)+d_{j-1}\cos(\alpha_j))} =$$

$$= P_{j+1,1}e^{\gamma_{j+1}(-d_{j-1,j-1}\sin(\alpha_{j+1})-d_{j-1}\cos(\alpha_{j+1}))} + P_{j+1,2}e^{\gamma_{j+1}(-d_{j-1,j-1}\sin(\alpha_{j+1})+d_{j-1}\cos(\alpha_{j+1}))},$$

$$\frac{P_{j1}e^{\gamma_j(-d_{j-1,j-1}\sin(\alpha_j)-d_{j-1}\cos(\alpha_j))}}{Z_{jj}} - \frac{P_{j2}e^{\gamma_j(-d_{j-1,j-1}\sin(\alpha_j)+d_{j-1}\cos(\alpha_j))}}{Z_{jj}} =$$

$$= \frac{P_{j+1,1}e^{\gamma_{j+1}(-d_{j-1,j-1}\sin(\alpha_{j+1})-d_{j-1}\cos(\alpha_{j+1}))}}{Z_{j+1,j+1}} - \frac{P_{j+1,2}e^{\gamma_{j+1}(-d_{j-1,j-1}\sin(\alpha_{j+1})+d_{j-1}\cos(\alpha_{j+1}))}}{Z_{j+1,j+1}},$$

$$P_{n-1,1}e^{\gamma_{n-1}(-d_{n-2,n-2}\sin(\alpha_{n-1})-d_{n-2}\cos(\alpha_{n-1}))} + P_{n-1,2}e^{\gamma_{n-1}(-d_{n-2,n-2}\sin(\alpha_{n-1})+d_{n-2}\cos(\alpha_{n-1}))} = P_{n,1}e^{\gamma_n(-d_{n-2,n-2}\sin(\alpha_n)-d_{n-2}\cos(\alpha_n))},$$

$$\frac{P_{n-1,1}e^{\gamma_{n-1}(-d_{n-2,n-2}\sin(\alpha_{n-1})-d_{n-2}\cos(\alpha_{n-1}))}}{Z_{n-1,n-1}} - \frac{P_{n-1,2}e^{\gamma_{n-1}(-d_{n-2,n-2}\sin(\alpha_{n-1})+d_{n-2}\cos(\alpha_{n-1}))}}{Z_{n-1,n-1}} = \frac{P_{n,1}e^{\gamma_n(-d_{n-2,n-2}\sin(\alpha_n)-d_{n-2}\cos(\alpha_n))}}{Z_{n,n}},$$

где α_j – угол падения звуковой волны, отсчитываемый от нормали,

$\alpha_{j+1} = \arcsin\left(\frac{c_{j+1}}{c_j}\sin(\alpha_j)\right)$ – угол преломления в материале (закон Снеллиуса),

$Z_{jj} = \frac{Z_j}{\cos(\alpha_j)}$ – импеданс материала конструкции или воздуха с учётом угла падения,

$Z_j = \rho_j c_j \sqrt{1 + i\eta_j}$ – акустическое сопротивление в материале конструкции или воздухе с учётом коэффициента потерь η_j , $d_{jj} = d_j \operatorname{tg}(\alpha_j)$, d_j – толщины слоёв, P_{jk} – амплитуды давлений акустических волн, $k=1,2$.

Суть предлагаемой методики заключается в следующем.

1. Составляется матрица из коэффициентов при амплитуде давлений акустических волн P_{jk} , при этом $P_{11} = 1 \text{ Па}$ (входное воздействие можно задать единичным).

Коэффициенты при неизвестных амплитудах обозначим следующим образом:

$$A_{j,k}^- = P_{j1}e^{\gamma_j(-d_k \sin(\alpha_j)-d_k \cos(\alpha_j))},$$

$$A_{j,k}^+ = P_{j2}e^{\gamma_j(-d_k \sin(\alpha_j)+d_k \cos(\alpha_j))}.$$

В табл. 1 представлены коэффициенты при P_{j1} и P_{j2} уравнений (8) в матричной форме.

Таблица 1. Представление коэффициентов при P_{j1} и P_{j2}

1	1	-1	-1	0	0	0	0	...	0
$\frac{1}{Z_{11}}$	$-\frac{1}{Z_{11}}$	$-\frac{1}{Z_{21}}$	$\frac{1}{Z_{21}}$	0	0	0	0	...	0
0	0	A_{21}^-	A_{21}^+	$-A_{31}^-$	$-A_{31}^+$	0	0	...	0
0	0	$\frac{A_{21}^-}{Z_{22}}$	$-\frac{A_{21}^+}{Z_{22}}$	$-\frac{A_{31}^-}{Z_{33}}$	$\frac{A_{31}^+}{Z_{33}}$	0	0	...	0
...
0	0	0	...	$A_{j,j-1}^-$	$A_{j,j-1}^+$	$-A_{j+1,j-1}^-$	$A_{j+1,j-1}^+$...	0
0	0	0	...	$\frac{A_{j,j-1}^-}{Z_{jj}}$	$-\frac{A_{j,j-1}^+}{Z_{jj}}$	$-\frac{A_{j+1,j-1}^-}{Z_{j+1,j+1}}$	$\frac{A_{j+1,j-1}^+}{Z_{j+1,j+1}}$...	0
...
0	0	0	0	0	0	...	$A_{n-1,n-2}^-$	$A_{n-1,n-2}^+$	$-A_{n,n-2}^+$
0	0	0	0	0	0	...	$\frac{A_{n-1,n-2}^-}{Z_{n-1,n-1}}$	$-\frac{A_{n-1,n-2}^+}{Z_{n-1,n-1}}$	$-\frac{A_{n,n-2}^+}{Z_{n,n1}}$

Данные табл. 1 обозначим через символ [Matr], амплитуды падающих и отраженных от слоёв конструкции акустических волн запишем в виде

$$\vec{p} = \begin{pmatrix} 0 \\ P_{12} \\ P_{21} \\ P_{22} \\ \dots \\ P_{i1} \\ P_{i2} \\ \dots \\ P_{n+1,1} \end{pmatrix},$$

кроме того, введём в рассмотрение следующий вектор

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ -\frac{1}{Z_{11}} \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Используя эти обозначения, уравнения (8) можно записать в матричном виде:

$$[\text{Matr}] \times \vec{p} = \vec{a}. \tag{9}$$

2. Для нахождения вектора \vec{p} необходимо найти матрицу, обратную матрице [Matr], которую обозначим $[\text{Matr}]^{-1}$, такую что $[\text{Matr}]^{-1} \times [\text{Matr}] = [E]$, где

$$[E] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix} \text{ – единичная матрица}$$

(метод нахождения обратной матрицы представлен в [2]). При этом решение уравнения (9) представится в виде:

$$\vec{p} = [\text{Matr}]^{-1} \times \vec{a}. \tag{10}$$

Из (10) находится амплитуда $p_{n+1,1}$, затем вычисляется звукоизоляция $R = 10 \lg(\frac{1}{P_{n+1,1}^2})$.

Результаты расчёта для трёх конструкций, состоящих из двух дюралевых панелей с поверхностными массами $M=t=2 \text{ кг/м}^2$; $M=3 \text{ кг/м}^2$, $t=1 \text{ кг/м}^2$; $M=3,6 \text{ кг/м}^2$, $t=0,4 \text{ кг/м}^2$ и воздухом между ними, представлены на рис. 1.

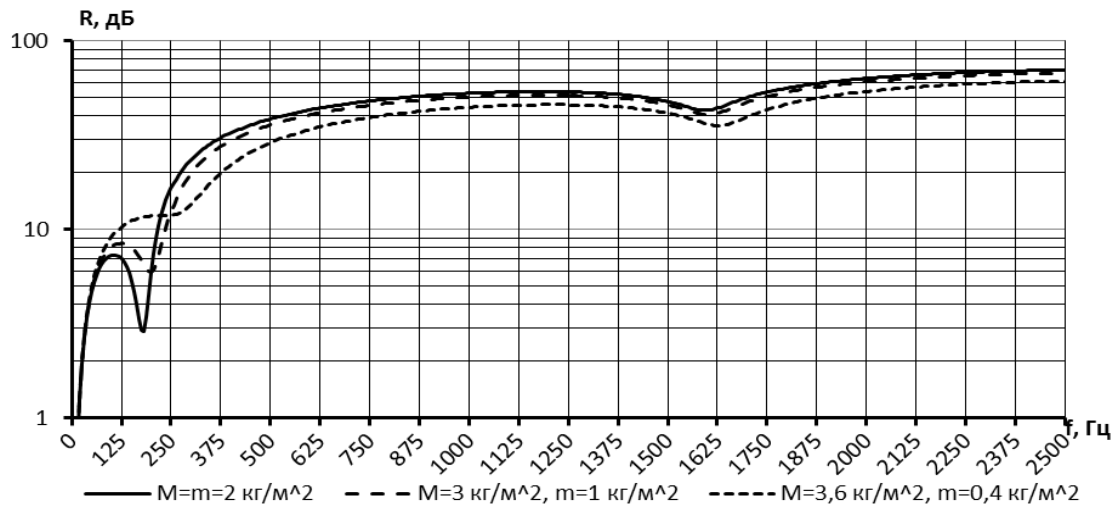


Рис. 1. Звукоизоляционные характеристики конструкции с различными поверхностными массами используемых в ней панелей

Как видно из рис. 1, при рассогласовании поверхностных масс пластин так называемый резонанс слоя (на рисунке он показан как снижение звукоизоляции) смещается в высокочастотную область и при этом демпфируется, но на более высоких частотах, большее рассогласование поверхностных масс приводит к сниже-

нию звукоизоляционной способности конструкции.

Для сравнительного анализа на рис. 2 представлены параметры звукоизоляции конструкций с различными по толщине воздушными слоями, но одинаковыми поверхностными массами панелей в конструкции.

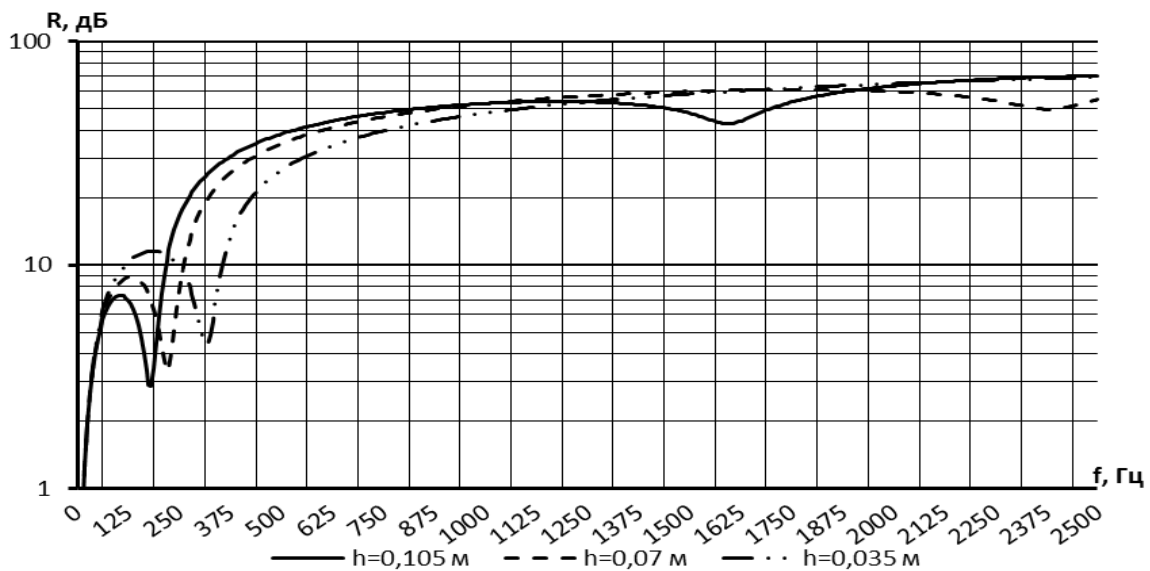


Рис. 2. Звукоизоляционные характеристики панелей с различными толщинами воздушного слоя

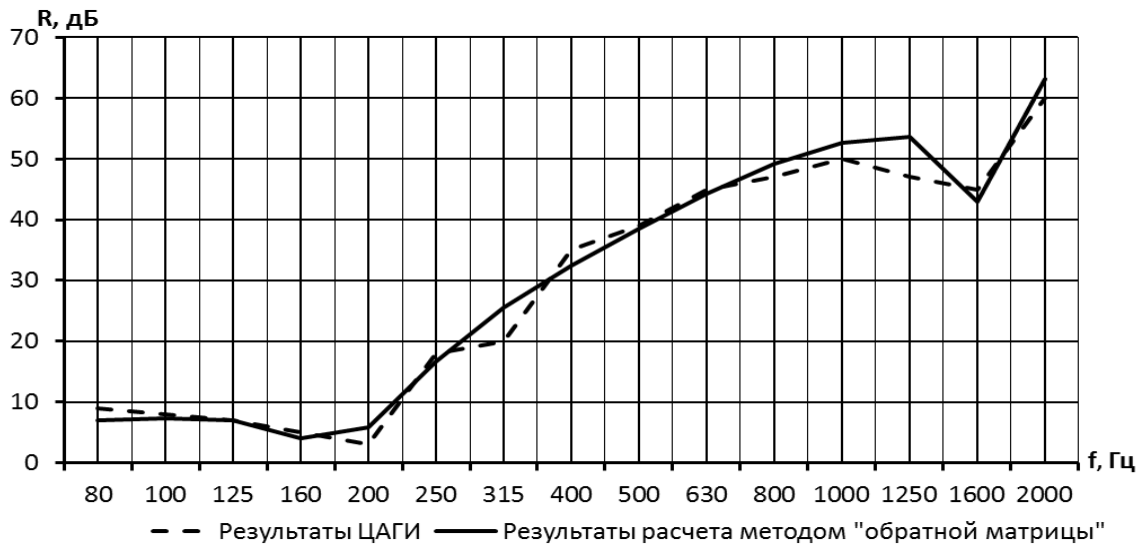


Рис. 3. Сравнение результатов расчёта звукоизоляции импедансным методом (ЦАГИ) и методом «обратной матрицы» при $M=t=2 \text{ кг/м}^3$

Как видно из рис. 2, уменьшение расстояния между панелями конструкции ведёт к смещению упомянутого выше резонанса слоя в высокочастотную область.

Похожие результаты были получены ранее ЦАГИ и представлены в статье [3] для аналогичной по конструкции трёхслойной панели (рис. 3).

Метод «обратной матрицы» позволяет находить звукоизоляцию при падении волн под различными углами, что является преимуществом по сравнению с алгоритмами, представленными в [1, 3].

На рис. 4 представлены уровни звукоизоляции для панелей с поверхностными массами $M = m = 2 \text{ кг/м}^2$ при перпендикулярном падении акустических волн и при угле падения 45° .

Данный метод был использован для оценки звукоизоляционного коэффициента штатного ГО в полосе частот от 625 Гц, при этом до 625 Гц применялась модель «резонансной звукоизоляции» [1]. Результаты расчёта (рис. 5) даны в сравнении с результатами ЛКИ.

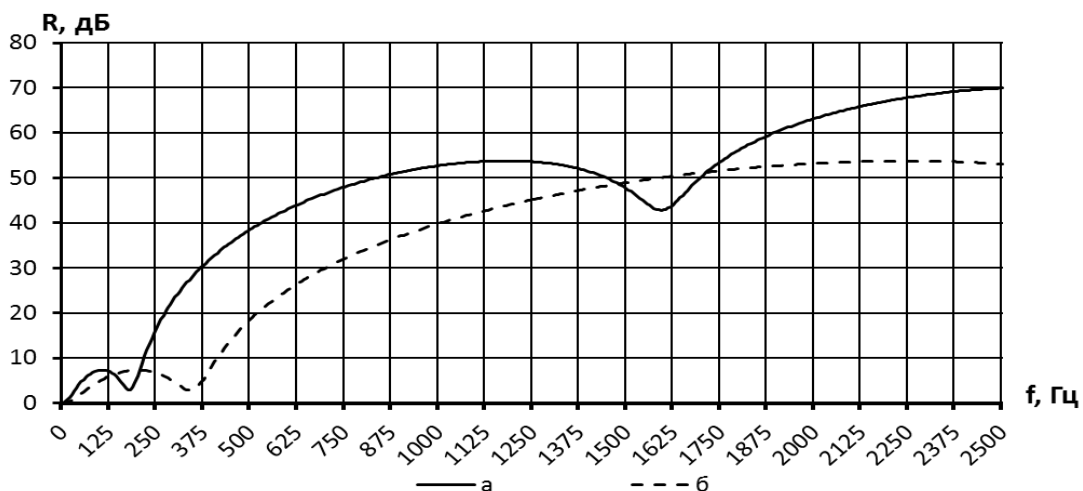


Рис. 4. Уровни звукоизоляции при перпендикулярном падении акустических волн (а) и при угле падения 45° (б)

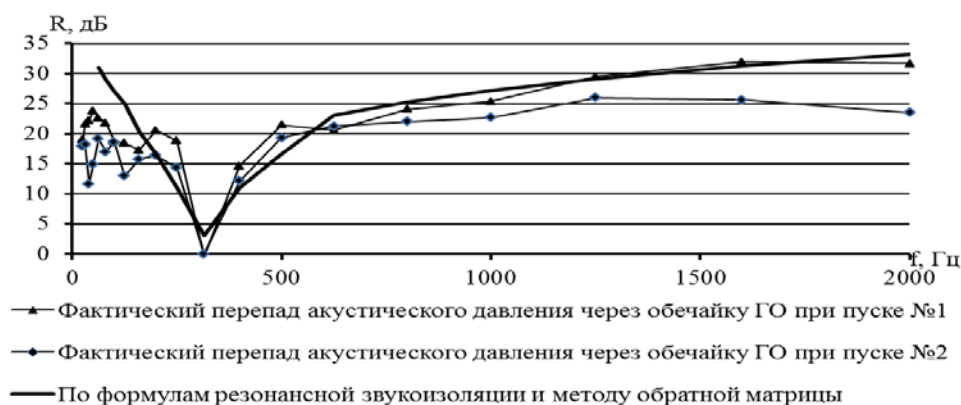


Рис. 5. Результаты расчёта и фактическая звукоизоляция, полученная при лётно-конструкторских испытаниях

Падение коэффициента звукоизоляции в полосе частот до 200 Гц по сравнению с расчётными данными является следствием возникновения стоячих колебаний среды между обечайкой ГО и космическим аппаратом (КА). Минимум, попадающий в 1/3-октавную полосу частот с центральной частотой 315 Гц, является следствием поперечного резонанса конструкции, который для такого ГО равен 338 Гц.

Посредством метода «обратной матрицы», описанного в данной статье, мож-

но оценить только нерезонансную передачу акустической энергии, так как в данном случае учитываются лишь инерционные свойства механического импеданса обечайки ГО.

Полученный алгоритм позволяет выявить особенности многослойной конструкции с точки зрения её звукоизоляции и подобрать необходимые характеристики слоёв, которые бы соответствовали спектральному составу нагрузки, действующей на объект исследования.

Библиографический список

1. Боголепов И. И. Промышленная звукоизоляция. Л.: Судостроение, 1986. 367 с.
2. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1970. 720 с.
3. Калинина Л.Н. Кудисова Л.Я. Расчет на ЭВМ звукоизоляции двухстенных и трёхстенных конструкций // Труды ЦАГИ. 1978. Вып. 1902. С. 23-28.

Информация об авторах

Попов Павел Александрович, аспирант кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: banduir@rambler.ru. Область научных интересов: динамика машин.

Осипов Александр Сергеевич, специалист отдела грузов ОАО «РКЦ «Прогресс», г. Самара. E-mail:

oas89@inbox.ru. Область научных интересов: звукоизоляция и акустические нагрузки.

Синдюков Артём Арсентьевич, аспирант кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: sindyukovart@mail.ru. Область научных интересов: динамика машин.

CALCULATING SOUND INSULATION OF A SANDWICH STRUCTURE ON THE BASIS OF THE «INVERSE MATRIX» METHOD

© 2014 P. A. Popov¹, A. S. Osipov², A. A. Sindyukov¹

¹Samara State Aerospace University, Russian Federation

²Open Joint-Stock Company “Space Rocket Centre “Progress”, Samara, Russian Federation

Multilayered structures are widely used in housing construction, shipbuilding, aviation and space-rocket engineering. In designing such structures it is necessary to estimate their sound insulation capacity for the forecasting of levels of noise taking place in this or that premise or compartment. The paper presents a methodology of calculating sound insulation of a multilayered structure developed on the basis of solving wave equations in each of the layers taking into account the incident angle of sound waves and losses in layers; introduction of boundary conditions establishing equality on the borders of media of normal oscillatory speeds and acoustic pressure; drawing up a system of algebraic complex equations and a matrix equation corresponding to them; drawing up an inverse matrix of factors at functions of acoustic pressure. Examples of calculating factors of sound insulation for multilayered structures with various parameters are presented (superficial weights, thickness of layers, various incident angles). A graphic comparison of the results of calculations using the methods of “inverse matrix” and the impedance method as well as a graphic comparison of results of flight-design measurements (FDM) of the sound insulation of a regular head part, consisting of layers of coal tape, fiber glass fabrics, aluminum honeycombs and a layer of polyurethane foam are given. The results of calculation using the “inverse matrix” method are given and the advantage of the method is emphasized.

Acoustic pressure, sound insulation, factor of losses, inverse matrix, impedance, distribution factor, wave number, frequency.

References

1. Bogolepov I.I. Promyshlennaya zvukozolyatsiya [Industrial sound insulation]. Leningrad: Sudostroenie Publ., 1986. 367 p.
2. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov [Guidebook on mathematics for research workers and engineers]. Moscow: Nauka Publ., 1970. 720 p.
3. Kalinina L.N., Kudisova L.Y. Calculation of sound insulation of two-wall and three-wall structures using a computer // Trudy TsAGI. 1978. Issue 1902. P. 23-28. (In Russ.)

About the authors

Popov Pavel Aleksandrovich, post-graduate student of the Department of Automatic Systems of Power Plants, Samara State Aerospace University, Russian Federation. E-mail: banduir@rambler.ru. Area of Research: dynamics of machines.

Osipov Alexander Sergeevich, expert of the Load Department, Open Joint-Stock Company Space Rocket Center «Progress»,

Samara, Russian Federation. E-mail: oas89@inbox.ru. Area of Research: sound insulation and acoustic loads.

Sindyukov Artem Arsentevich, post-graduate student of the Department of Automatic Systems of Power Plants, Samara State Aerospace University. E-mail: sindyukovart@mail.ru. Area of Research: dynamics of machines.

УДК 621.793.164

ОСАЖДЕНИЕ АЛЮМИНИЕВОГО ПОКРЫТИЯ НА ИЗДЕЛИЯ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛИ МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ИЗ ПАРОВОЙ ФАЗЫ АЛЮМООРГАНИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ ДОБАВКИ

© 2014 А. В. Пугин, И. И. Гафуров

Ульяновский научно-технологический центр
Всероссийского института авиационных материалов (УНТЦ ВИАМ)

Представлены результаты работы по нанесению из паровой фазы металлоорганического соединения алюминиевого покрытия на высокопрочную стальную подложку с применением каталитической добавки. Процесс проводился в герметичной камере с последующим улавливанием продуктов распада в азотной ловушке. Для снижения температуры осаждения плёнки алюминия из ТИБА методом МОСVD были выбраны 3 каталитические добавки: титан сек-бутоксид, тетрахлорид титана и три-п-пропиламин. Все эти вещества обладают заметной летучестью и термически устойчивы относительно температуры разложения ТИБА. В результате исследований был выбран титан сек-бутоксид, который снижает температуру разложения на 50 °С и наиболее близок к ТИБА по летучести и температуре разложения. Скорость осаждения пиролитического алюминиевого покрытия с каталитической добавкой увеличилась в 1,5 раза. Приводятся результаты применения каталитической добавки титан сек-бутоксид. Исследования показали, что процесс алюминирования высокопрочной стали возможен при использовании каталитической добавки титан сек-бутоксид. Процесс получения качественного алюминиевого покрытия из ТИБА не влияет на замедленное хрупкое разрушение (ЗХР) и статическое растяжение. Коррозионные испытания показали, что образцы с пиролитическим алюминиевым покрытием по защитным свойствам превышают цинковые покрытия. Потенциостатические исследования установили, что пиролитические алюминиевые покрытия по отношению к стали являются анодными. Прочность сцепления покрытий с основой соответствует требованиям ГОСТ, отслаивания и вздутия покрытий отсутствуют. Металлографическим анализом установлен размер кристаллитов («зёрен») пиролитических покрытий. Методом растровой электронной микроскопии проведено исследование поверхности покрытия.

Высокопрочная сталь, металлоорганическое соединение, сек-бутоксид титана, пиролитическое алюминиевое покрытие.

Введение

Для изделий космической и авиационной техники широко применяются разработанные в ВИАМ высокопрочные и коррозионностойкие стали, такие как 30ХГСН2А, ВКС-170, ВКС-210, 07Х16Н6, ВНС-2, ВНС-16, ВНС-5, ВНС-25 и др. 30ХГСН2А обладает повышенной прочностью, применяется практически во всех отечественных самолётах [1–4]. Учитывая её недостаточную коррозионную стойкость, необходимо применять защиту путём нанесения лакокрасочных, гальванических, пиролитических и других покрытий [5–7]. Наиболее целесообразными для защиты от коррозии высокопрочных сталей считаются покрытия, являющиеся анодными по отношению к ним: алюми-

ниевые [8], кадмиевые, цинковые [9–10]. Цинковые и кадмиевые покрытия в основном наносят гальваническим методом, а алюминиевые – и гальваническим, и пиролитическим.

Электролиты для гальванического алюминирования делятся на три группы: эфирногидридные, алкилбензолные, металлоорганические [11]. Недостатками алкилбензолного электролита являются сложность приготовления, чувствительность к влаге воздуха, высокие рабочие температуры, высокая стоимость компонентов, а также ухудшение механических свойств сталей из-за процесса наводороживания. В современной промышленности производство стали с алюминиевым покрытием осуществляется в основном следующими способами: совместной про-

каткой алюминия и стали или плакированием, сваркой взрывом, напылением, газотермическим алюминированием и погружением в расплав алюминия [12].

В рассматриваемом случае использован метод химического осаждения из паровой фазы металлоорганических соединений (МОС). Этот метод основан на химической реакции термораспада паровой фазы МОС, протекающей на поверхности изделия с формированием покрытия. Возможность получения алюминиевых покрытий при термическом разложении из триизобутилалюминия (ТИБА) предложил немецкий химик Карл Циглер. Применение пиролитического алюминиевого покрытия (ПАП) для защиты деталей из высокопрочной стали от коррозии исключает наводороживание стали, тем самым позволяет не проводить операцию обезводороживания деталей с пиролитическим алюминиевым покрытием. Метод получения алюминиевых плёнок из паровой фазы является экологически чистым и безопасным за счёт герметизации камеры установки и улавливания органических продуктов распада МОС [13–15]. Применение алюминирования методом МОСVD (metalorganic chemical vapor deposition) позволяет снизить класс экологической опасности по сравнению с процессами цинкования, кадмирования, хроматирования.

Методическая часть

При нанесении алюминиевого покрытия на детали из стали 30ХГСА использовалось алюмоорганическое соединение (АОС) ТИБА. Технологические режимы осаждения ПАП не подходят для высокопрочной стали 30ХГСН2А, так как температура разложения ТИБА превышает температуру отпуска высокопрочной стали на 50 °С. Для снижения температуры осаждения плёнки алюминия из ТИБА методом МОСVD были выбраны три каталитические добавки: титан сек-бутоксид, тетрахлорид титана и три-*n*-пропиламин. Все эти вещества обладают заметной летучестью и термически устой-

чивы относительно температуры разложения ТИБА. Был исследован процесс осаждения пиролитических плёнок алюминия из ТИБА в пяти вариантах:

а) в чистом виде;

б) в присутствии катализаторов:

- титан сек-бутоксид;

- тетрахлорид титана;

- три-*n*-пропиламина;

- смеси три-*n*-пропиламина-ТИБА и катализатора титан сек-бутоксид.

В каждом случае проводился поиск минимальной температуры осаждения плёнок алюминия. Результаты исследований показали, что каталитические добавки титан сек-бутоксид, тетрахлорид титана и три-*n*-пропиламин обеспечивают снижение температуры разложения ТИБА на 50 °С, но при использовании тетрахлорида титана могут возникнуть проблемы с коррозией металлических поверхностей аппаратуры, а комплекс ТИБА с три-*n*-пропиламином требует большого расхода реагента. Поэтому предпочтение следует отдать титан сек-бутоксиду, который наиболее близок к ТИБА по летучести и температуре разложения. В промышленном масштабе каталитические добавки не производятся. Поэтому для этого ННГУ была изготовлена экспериментальная партия образца кислородосодержащего титанорганического соединения титан сек-бутоксид.

Синтез титана сек-бутоксид состоит из трёх основных стадий:

- этерификации тетрахлорида титана сек-бутиловым спиртом;

- нейтрализации хлористого водорода аммиаком;

- отгонки избытка секбутилового спирта и фильтрования готового продукта.

Процесс осаждения ПАП из ТИБА в присутствии каталитических добавок проводился на установке в соответствии с общими требованиями к установкам осаждения плёнок МОС методом МОСVD. На рис. 1 приведена схема установки для осаждения ПАП из ТИБА в присутствии катализаторов.

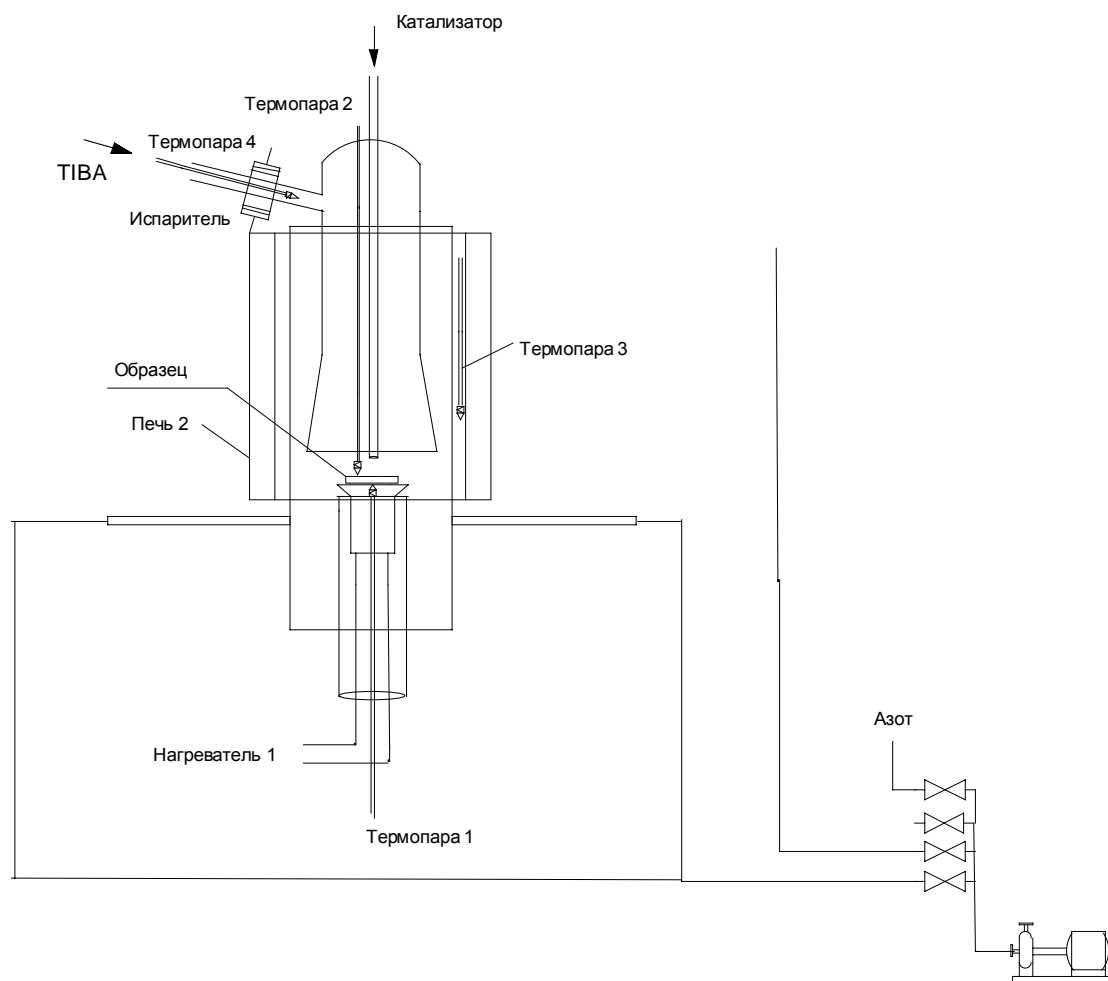


Рис. 1. Схема лабораторной установки пиролиза ТИБА совместно с каталитической добавкой

Установка для нанесения ПАП состоит из реакционной камеры; дозатора ТИБА и его испарителя; термостатированного испарителя катализатора диффузионного типа и трубопровода подачи катализатора; ТЭНа; азотной ловушки; вакуумного насоса. В азотной ловушке остаются все ненужные продукты распада. Установка снабжена вакуумным насосом, который производит постоянную откачку из камеры.

Процесс осаждения пиролитического алюминия из ТИБА с каталитической добавкой титан сек-бутоксид осуществляется следующим образом. ТИБА и сек-бутоксид титана в жидкой фазе из ампул через дозаторы подаются в испарители.

Из испарителя пары ТИБА и каталитической добавки поступают к поверхности подложки одновременно. Пары титан сек-бутоксид подаются к поверхности подложки по отдельному трубопроводу из термостатированного испарителя.

Для получения качественных ПАП требуется не выходить за температурный режим, соблюдать соотношение катализатора и ТИБА, а также их смешивание вблизи подложки.

Технологические режимы получения качественных плёнок алюминия из ТИБА могут заметно отличаться в зависимости от типа установок, поскольку формирование газодинамического потока вблизи подложки зависит от кон-

струкции реактора, температуры испарения МОС и каталитической добавки, скорости откачки вакуумной системы.

Результаты

Исследования показали, что процесс алюминирования высокопрочной стали типа 30ХГСН2А возможен при использовании каталитической добавки титан секбутоксида. Процесс получения качественного алюминиевого покрытия из ТИБА не

влияет на замедленное хрупкое разрушение (ЗХР) и статическое растяжение.

Влияние технологического процесса нанесения пиролитических алюминиевых покрытий на наводороживание стали определяли по изменению относительного сужения поперечного сечения (ψ , %) покрытых и непокрытых образцов.

Результаты испытаний на статическое растяжение (кратковременную прочность) приведены в табл. 1.

Таблица 1. Испытания на статическое растяжение (кратковременную прочность)

Вид покрытия	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности σ_B , МПа	Относительное удлинение δ_5 , %	Относительное сужение ψ , %
Образцы без покрытия	1440	1730	13,5	54,5
Образцы с покрытием ПАП с каталитической добавкой	1420	1700	13,5	53,5

Результаты испытаний показали, что процесс осаждения пиролитических алюминиевых покрытий не изменяет механические (прочностные) характеристики высокопрочной стали. Следовательно, технологические параметры, а именно температура разложения ТИБА во время процесса нанесения ПАП, не изменяют механические свойства высокопрочной стали 30ХГСН2А. Результаты свидетельствуют о том, что технологический процесс осаждения пиролитических алюминиевых покрытий не наводороживает высокопрочную сталь 30ХГСН2А, так как относительное сужение поперечного сечения незначительно изменяется от исходного значения. Испытания на замедленное хрупкое разрушение образцов с пиролитическими алюминиевыми покрытиями ПАП в сравнении с контрольными образцами без покрытия показали, что образцы с покрытиями и без покрытий в течение 13 суток не разрушаются. Это свидетельствует о том, что процесс нанесения покрытия не влияет на охрупчиваемость стали 30ХГСН2А.

ПАП с каталитической добавкой имеет светло-серый цвет.

Прочность сцепления покрытий с основой соответствует требованиям ГОСТ 9.301, отслаивания и вздутия покрытий отсутствуют.

Ускоренные коррозионные испытания [16] в камере солевого тумана образцов из стали 30ХГСН2А с пиролитическими алюминиевыми покрытиями проводили по ГОСТ 9.308. Длительные испытания [17–19] были проведены в естественных климатических условиях г. Москвы (промышленная атмосфера, Московский центр климатических исследований – МЦКИ) и в тёплом влажном климате г. Геленджика (приморская атмосфера, Геленджикский центр климатических исследований – ГЦКИ). Экспозицию образцов проводили в течение 27 месяцев на стендах, ориентированных на юг, угол наклона плоскости образцов к земле составлял 45° , регистрацию внешних измерений поверхности образцов осуществляли согласно требованиям ГОСТ 9.909.

В качестве критериев оценки коррозионной стойкости образцов использовались:

- время до появления первых очагов коррозии стали;
- площадь поверхности образцов, поражённой коррозией;
- глубина и характер коррозионных поражений.

Испытания показали, что образцы с ПАП по защитным свойствам превосходят цинковые покрытия.

Потенциостатические исследования установили, что пиролитические алюминиевые покрытия по отношению к стали 30ХГСН2А являются анодными. Измеренные токи коррозии пары «покрытие – подложка» показали, что сближение стационарных потенциалов пиролитического алюминиевого покрытия и стали 30ХГСН2А приводит к снижению токов коррозии.

Металлографическим анализом установлен размер кристаллитов («зёрен») пиролитических покрытий, кото-

рый составил $0,65 \pm 0,02$ мкм. Для всех образцов характерна равноосная форма зёрен.

Методом растровой электронной микроскопии проведено исследование поверхности покрытия. На рис. 2, 3 показана структура поверхности пиролитического алюминиевого покрытия при увеличении 1000 и 2500 соответственно.

Проведены исследования влияния технологического процесса осаждения алюминиевого пиролитического покрытия на прочностные характеристики образцов из стали 30ХГСН2А при статическом растяжении с ПАП в сравнении с образцами без покрытий. Испытания на статическое растяжение (кратковременную прочность) показали, что нагрев образца во время процесса нанесения ПАП не изменяет механические свойства стали 30ХГСН2А.

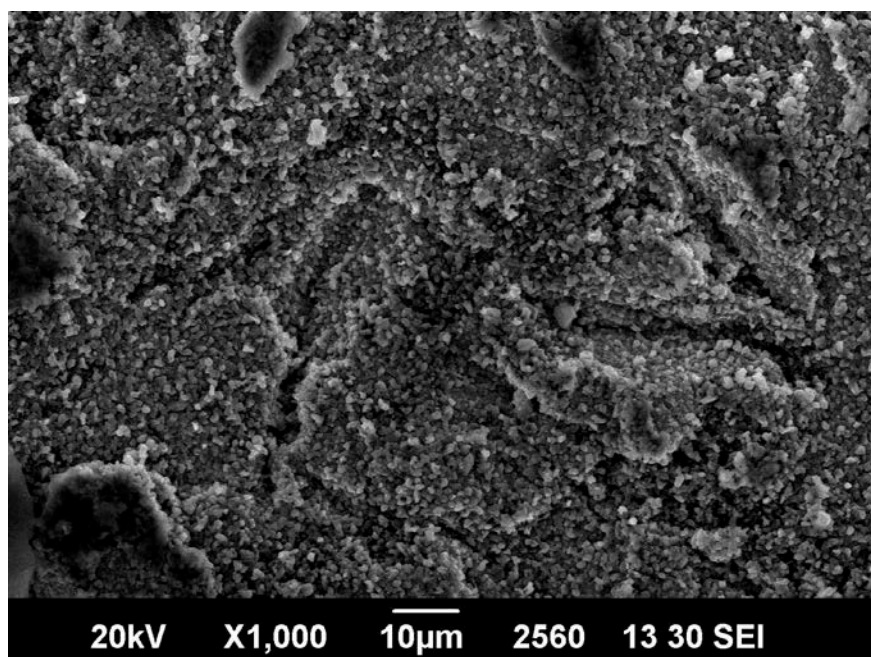


Рис. 2. Структура поверхности пиролитического алюминиевого покрытия при увеличении 1000

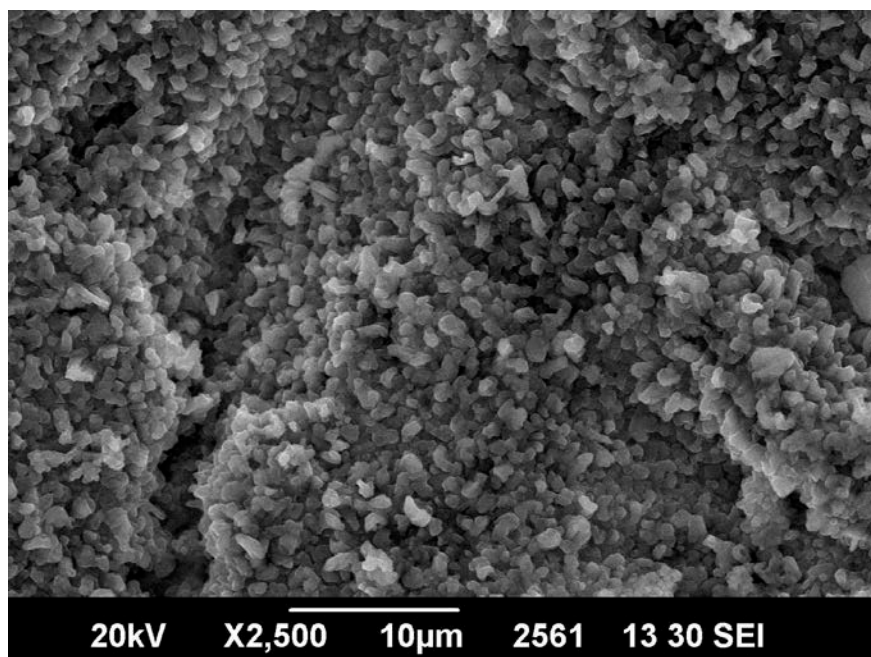


Рис. 3. Структура поверхности пиролитического алюминиевого покрытия при увеличении 2500

Заключение

Из трёх каталитических добавок выбран титан сек-бутоксид, который позволяет снизить температуру разложения ТИБА на 50 °С.

Скорость осаждения пиролитического алюминиевого покрытия с каталитической добавкой увеличилась в 1,5 раза.

Исследования показали возможность нанесения ПАП на сложно профилированные детали.

Пиролитическое алюминиевое покрытие может быть использовано для защиты от коррозии деталей из высокопрочных сталей в гражданской авиации и других отраслях машиностроения.

Библиографический список

1. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 80 лет: годы и люди / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ. 2012. С. 133–142.
2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 7–17.
3. Покровская Н.Г., Беляков Л.Н., Каблов Е.Н., Шалькевич А.Б., Петраков А.Ф., Жегина И.П., Остроухова Н.И. Высокопрочная конструкционная сталь: патент РФ 2155820; опубл. 27.05.1999.
4. Семенов В.Н., Каблов Е.Н., Качанов Е.Б., Петраков А.Ф., Козловская В.И., Бирман С.И., Батурина А.В., Шалькевич А.Б., Сысоева И.Б., Пестов Ю.А., Кукин Е.А., Харламов В.Г., Деркач Г.Г., Мовчан Ю.В., Каторгин Б.И., Чванов В.К., Головченко С.С., Сигаев В.А., Евмененко Ф.Ф. Высокопрочная коррозионно-стойкая сталь: патент РФ 2175684; опубл. 20.11.1998.
5. Каблов Е.Н. Коррозия или жизнь // Наука и жизнь. 2012. № 11. С. 16–21.
6. Солнцев С.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А., Гаврилов С.В. Керамические покрытия для защиты высокопрочной стали при термической обработке // Авиационные материалы и технологии. 2011. № 4. С. 3–8.
7. Семенычев В.В., Салахова Р.К., Тюриков Е.В., Ильин В.А. Защитные и

функциональные гальванические покрытия, получаемые с применением наноразмерных частиц // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 335–342.

8. Панарин А.В., Ильин В.А. Алюминиевые покрытия и способы их получения // Авиационные материалы и технологии. 2014. №1. С. 20–24.

9. Проскуркин Е.В., Сухомлин Д.А. Анализ цинковых покрытий на основе их структурных и электрохимических свойств // Коррозия: материалы, защита. 2013. № 10. С. 30–38.

10. Проскуркин Е.В., Сухомлин Д.А. Мифы и реальность коррозионной стойкости цинковых покрытий, в частности, диффузионных цинковых покрытий // Коррозия: материалы, защита. 2010. № 5. С. 34–38.

11. Шавкунов С.П. Коррозионно-электрохимическое поведение алюминиевых гальванопокрытий, полученных из электролитов на основе ксилола // Коррозия: материалы, защита. 2011. № 5. С. 39–41.

12. Ковтунов А.И. Жидкофазное алюминирование стали // Технология металлов. 2011. № 2. С. 33–38.

13. Панарин А.В. Пиролитические карбидохромовые покрытия. Технология получения и свойства // Авиационные материалы и технологии. 2011. № 4. С. 14–18.

14. Сатаев Е.Е., Пугин А.В. Особенности технологии нанесения пиролитического алюминиевого покрытия с дополни-

тельной оксидацией // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14, № 4(3). С. 798–801.

15. Ильин В.А., Семенычев В.В., Панарин А.В., Тюриков Е.В., Сатаев Е.Е. Способ нанесения коррозионно-стойкого покрытия оксида алюминия на металлическое изделие: патент РФ 2430993; опубл. 10.10.2011; бюл. № 28.

16. Жиликов В.П., Каримова С.А., Лешко С.С., Чесноков Д.В. Исследование динамики коррозии алюминиевых сплавов при испытании в камере солевого тумана (КСТ) // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 4. С. 18–22.

17. Салахова Р.К. Коррозионная стойкость стали 30ХГСА с «трехвалентным» хромовым покрытием в естественных и искусственных средах // Коррозия: материалы, защита. 2012. № 1. С. 44–48.

18. Каримова С.А., Жиликов В.П., Михайлов А.А., Чесноков Д.В., Игонин Т.Н., Карпов В.А. Натурно-ускоренные испытания алюминиевых сплавов в условиях воздействия морской атмосферы // Коррозия: материалы, защита. 2012. № 10. С. 1–3.

19. Панченко Ю.М., Стрекалов П.В., Чесноков Д.В., Жирнов А.Д., Жиликов В.П., Каримова С.А., Тарараева Т.И. Зависимость коррозионной стойкости сплава Д16 от засоленности и метеопараметров приморской атмосферы // Авиационные материалы и технологии. 2010. № 3. С. 8–14.

Информация об авторах

Пугин Андрей Владимирович, инженер-технолог, Ульяновский научно-технологический центр Всероссийского института авиационных материалов. E-mail: untcviam@viam.ru. Область научных интересов: химическое осаждение покрытий из паровой фазы металлоорганических соединений.

Гафуров Ильдар Иршатович, инженер-технолог, Ульяновский научно-технологический центр Всероссийского института авиационных материалов. E-mail: untcviam@viam.ru. Область научных интересов: химическое осаждение покрытий из паровой фазы металлоорганических соединений.

**DEPOSITION OF ALUMINUM COATING ON ITEMS MADE
OF HIGH-STRENGTH STEEL BY CHEMICAL VAPOR DEPOSITION
OF AN ORGANOMETALLIC COMPOUND WITH THE USE
OF A CATALYTICAL ADDITIVE**

© 2014 A. V. Pugin, I. I. Gafurov

Ulyanovsk Science and Technology Centre of the All-Russian Institute
of Aviation Materials (USTC AIAM), Ulyanovsk, Russian Federation

The paper presents the results of work involving chemical vapor plating of an organometallic compound of aluminum coatings on a high-strength steel backplate using a catalytical additive. The process of coating deposition is carried out in a sealed chamber with subsequent capture of decomposition products in a nitrogen trap, which provides environmental safety of the process. The paper describes the choice of a catalytical additive among the following liquids: titanium sec-butoxide, titanium tetrachloride, three-n-propylamine used to reduce the deposition temperature. It was found that the deposition of pyrolysis-induced aluminum coatings using catalytical additives does not change the mechanical properties of high-strength steel. Corrosion tests have shown that the protective properties of samples with pyrolysis-induced aluminum coatings are superior to those of zinc coatings.

High-strength steel, organometallic compound, sec-butoxide titanium, pyrolytic aluminum coating.

References

1. History of aviation materials. VIAM - 80 years: years and people / Edited by E.N. Kablov. Moscow: VIAM. 2012. P. 133-142.
2. Kablov E.N. Strategic Areas of Developing Materials and Their Processing Technologies for the Period up to 2030 // Aviation materials and technology. 2012. No. S. P. 7-17. (In Russ.)
3. Pokrovskaja N.G., Beljakov L.N., Kablov E.N., Shalkevich A.B., Petrakov A.F., Zhegina I.P., Ostroukhova N.I. Vysokoprochnaya konstruktsionnaya stal' [High-strength structural steel]. Patent RF, No. 2155820, 1999 (Publ. 27.05.1999).
4. Semenov V.N., Kablov E.N., Kachanov E.B., Petrakov A.F., Kozlovskaja V.I., Bearman S.I., Buchanan A.V., Shalkevich A.B., Sysoev I.B., Pestov Y.A., Kykin E.A., Kharlamov V.G., Derkach G.G., Movchan Y.V., Katorgin B.I., Chvanov V.K., Golovchenko S.S., Sigayev V.A., Evmenenko F.F. Vysokoprochnaya korrozionno-stoykaya stal' [High-strength corrosion-resistant steel]. Patent RF, no. 2175684, 1998 (Publ. 20.11.1998).
5. Kablov E.N. Corrosion or life // Nauka i zhizn'. 2012. No.11. P. 16-21. (In Russ.)
6. Solntcev S.S., Rozenenkova V.A., Mironova N., Gavrilov S.V. Ceramic coatings for the protection of high-strength steels during the heat treatment // Aviation materials and technology. 2011. No. 4. P. 3-8. (In Russ.)
7. Semenychev V.V., Salakhova R.K., Tyurikov E.V., Ilyin V.A. Protective and Functional Galvanic Coatings, Produced with the use of Nanosize Particles // Aviation materials and technology. 2012. No. S. P. 335-342. (In Russ.)
8. Panarin A.V., Ilyin V.A. Aluminium coatings and methods for their preparation // Aviation materials and technology. 2014. No. 1. P. 20-24. (In Russ.)
9. Proskurkin E.V., Suhomlin D.A. Analysis of zinc coatings on the basis of their structural and electrochemical properties // Korroziya: Materialy, Zashchita. 2013. No.10. P. 30-38. (In Russ.)
10. Proskurkin E.V., Suhomlin D.A. Myths and reality of corrosion resistance of zinc coatings, in particular, diffusion zinc coatings // Korroziya: Materialy, Zashchita. 2010. No.5. P. 34-38. (In Russ.)
11. Shavkunov S.P. Corrosion - electrochemical behavior of aluminum electro-

plating obtained from electrolytes based on xylene // *Korroziya: Materialy, Zashchita*. 2011. No.5. P. 39-41. (In Russ.)

12. Kovtunov A.I. Liquid-phase steel aluminizing // *Tekhnologiya metallov*. 2011. No. 2. P. 33-38. (In Russ.)

13. Panarin A.V. Pyrolytic chromium carbide coatings. Production technology and properties // *Aviation materials and technology*. 2011. No. 4. P. 14-18. (In Russ.)

14. Sataev E.E., Pugin A. Features of technology application pyrolytic aluminum cover with additional oxidation // *Izvestiya samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2012. V. 14, no. 4(3). P. 798-801. (In Russ.)

15. Ilin V.A., Semenychev V.V., Panarin A.V., Tjurikov E.V., Sataev E.E. Sposob naneseniya korrozionno-stoykogo pokrytiya oksida alyuminiya na metallicheskie izdelie [Method of applying a corrosion-resistant aluminum oxide coating of on a metal item]. Patent RF, No. 2430993, 2010 (Publ. 10.10.2011, bull. no. 28).

16. Zhilikov V.P., Karimov S.A., Lesco S.S., Chesnokov D.V. Study of alu-

minium alloy corrosion dynamics in the salt-spray chamber (SSC) // *Aviation materials and technology*. 2012. No. 4. P. 18-22. (In Russ.)

17. Salakhova R.K. Corrosion resistance of 30KhGSA steel with a "trivalent" chromium coating in natural and artificial environments // *Korroziya: Materialy, Zashchita*. 2012. No. 1. P. 44-48. (In Russ.)

18. Karimov S.A., Zhilikov V.P., Mikhailov A.A., Chesnokov D.V., Igonin T.N., Karpov V.A. Full-scale tests of aluminum alloys under the impact of marine atmosphere // *Korroziya: Materialy, Zashchita*. 2012. No. 10. P. 1-3. (In Russ.)

19. Panchenko Y.M, Strelalov P.V., Chesnokov D.V., Zhirnov A.D., Zhilikov V.P., Karimova S.A., Tararaeva T.I. Relationship between D16 alloy corrosion resistance and seaside atmosphere salt spraying and meteoroparameters // *Aviation materials and technology*. 2010. No. 3. P. 8-14. (In Russ.)

About the authors

Pugin Andrey Vladimirovich, production engineer, Ulyanovsk Science and Technology Center of the All-Russian Institute of Aviation Materials, Ulyanovsk, Russian Federation. E-mail: untcviam@viam.ru. Area of Research: organometallic chemical vapor deposition.

Gafurov Ildar Irshatovich, production engineer, Ulyanovsk Science and Technology Center of the All-Russian Institute of Aviation Materials, Ulyanovsk, Russian Federation. E-mail: untcviam@viam.ru. Area of Research: organometallic chemical vapor deposition.

УДК 621.357.7

ИССЛЕДОВАНИЕ УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ЭЛЕКТРОЛИТОВ ХРОМИРОВАНИЯ И НИКЕЛИРОВАНИЯ

© 2014 Р. К. Салахова, В. В. Семенычев, А. Б. Тихообразов

Ульяновский научно-технологический центр
Всероссийского института авиационных материалов (УНТЦ ВИАМ)

Представлены результаты измерений удельной электропроводности (УЭП) электролитов хромирования и никелирования с помощью бесконтактного кондуктометра типа КРАБ-Д № 064 в температурных интервалах, соответствующих рабочим диапазонам электрохимических процессов осаждения покрытий. Показана принципиальная схема установки для измерений УЭП электролитов. В качестве объектов исследования выбраны электролиты на основе соединений хрома различной степени валентности (Cr^{3+} , Cr^{6+}) и стандартный электролит никелирования (электролит Уотса). Исследована зависимость УЭП электролитов от их температуры, дана сравнительная оценка влияния температурного фактора на величину электропроводности различных электролитов хромирования.

Изучено влияние добавок наноразмерных частиц оксида алюминия и карбида кремния дисперсностью 40-100 нм и удельной поверхностью 23-32 м²/г на величину электропроводности оксалатно-сульфатного электролита хромирования при заданных значениях температуры. Исследованием наносuspензий установлено, что добавка в электролиты наноразмерных частиц различной природы концентрацией 5-10 г/л не оказывает существенного влияния на величину УЭП.

Для оценки взаимосвязи электропроводности электролитов с технологическими параметрами процесса электроосаждения хромовых и никелевых покрытий была проведена количественная оценка выхода по току хрома и никеля и представлены гистограммы, показывающие соотношение величин электропроводности электролита и выхода металла по току. Установлено, что электропроводность электролитов и выход металла по току являются независимыми друг от друга параметрами.

Удельная электропроводность, кондуктометр, электролит хромирования, электролит никелирования, выход по току, наноразмерные частицы.

Введение

Защитные и функциональные гальванические покрытия являются наиболее распространёнными в машиностроении и нашли массовое применение в различных отраслях промышленности. Вместе с этим постоянно растут и требования, предъявляемые к вновь разрабатываемым покрытиям по их пористости, износостойкости, коррозионной стойкости и по экологической безопасности процессов их осаждения [1]. В связи с этим интенсивно разрабатываются новые технологические процессы осаждения покрытий, обладающих необходимыми свойствами [2].

Одной из важнейших физико-химических характеристик электролитов является их электропроводность. Несмотря на значительное количество работ, по-

свящённых изучению природы электропроводности электролитов, до сих пор окончательно не выяснены и не объяснены важнейшие экспериментально наблюдаемые закономерности изменения электропроводности электролитов в зависимости от температуры, природы растворителя и концентрации компонентов. Изучение зависимостей электропроводности от температуры и состава раствора позволяет получить данные, которые делают возможным рациональный выбор электролитов, конструкции электролизёров и источников питания [3]. Имеющиеся в литературе данные по исследованию электропроводности посвящены в основном сравнительно разбавленным системам [4–6]. В случае изучения концентрированных систем, к которым относятся исследуемые электролиты хромирования и никелиро-

вания, необходимо учитывать процессы комплексообразования и структурные перестройки в растворах, как это делается для органических сред. Несмотря на ряд попыток ввести дополнения и поправки на учёт активности ионов и ионных ассоциатов, вопрос об интерпретации свойств и особенностях строения концентрированных водных растворов сильных электролитов остаётся до сих пор открытым.

В качестве количественной меры способности раствора электролита проводить электрический ток обычно используют удельную электропроводность – величину, обратную удельному сопротивлению. Известно, что величина удельной электропроводности электролита зависит от целого ряда факторов: природы электролита, температуры, концентрации раствора [7, 8]. В данной работе рассматривается взаимосвязь (корреляция) между удельной электропроводностью (УЭП) электролитов хромирования и никелирования и выходом металла по току, а также оценивается влияние вводимых в электролиты наноразмерных частиц на величину УЭП. Исследования электропроводности электролитов-суспензий с добавками наночастиц представляет особый интерес, так как являются частью исследований в рамках существующего в УНТЦ ВИАМ научного направления «кластерная галь-

ваника», объектами исследований которого являются процессы электроосаждения покрытий в электролитах, содержащих наноразмерные частицы [9, 10].

Методическая часть

Измерения удельной электропроводности (УЭП) электролитов проводили с помощью кондуктометра радиочастотного бесконтактного типа КРАБ-Д № 0647. Погрешность показаний прибора, проверенная на стандартном растворе хлористого калия в соответствии с ГОСТ 22171, составила 6 %. Исследуемый температурный интервал электролитов был выбран исходя из рабочих диапазонов электрохимических процессов осаждения покрытий, а за величину УЭП принимали среднее значение измеренной УЭП, полученной в режиме нагрев-охлаждение. Составы исследуемых электролитов представлены в табл. 1. В качестве объектов исследования были использованы электролиты хромирования на основе соединений Cr^{6+} : стандартный – I, саморегулирующийся концентрированный – II, саморегулирующийся разбавленный – III; на основе соединений Cr^{3+} (оксалатно-сульфатный) – IV; стандартный электролит никелирования (электролит Уотса) – V по ГОСТ 9.305.

Таблица. 1. Составы электролитов

№/№	Состав электролита	Концентрация, г/л				
		I	II	III	IV	V
1	CrO_3	230 – 270	230 – 270	140 – 170	-	-
2	H_2SO_4	23 – 27	-	-	-	-
3	K_2SiF_6	-	18 – 22	-	-	-
4	Sr_2SO_4	-	3-5	3 – 5	-	-
5	$\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$	-	-	-	200 – 250	-
6	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	-	-	-	90 – 120	-
7	Na_2SO_4	-	-	-	120 – 140	-
8	NaF	-	-	-	20 – 30	-
9	$\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$	-	-	-	20 – 30	-
10	NiSO_4	-	-	-	-	280 – 330
11	NiCl_2	-	-	-	-	35 – 50
12	H_3BO_3	-	-	-	-	25 – 35
13	Температура, °C	43 – 65	43 – 65	43 – 65	30 – 51	18 – 45

Выход металла (хрома, никеля) по току, т.е. отношение фактически осаждённого определённым количеством электричества металла к его теоретическому эквиваленту (отнесённому к тому же количеству электричества), выраженное в процентах, определяли по уравнению [11,12]:

$$\eta = 6000(b - a)/\mathcal{E}_{Me}IT,$$

где η – выход по току, %; I – сила тока, А; T – продолжительность электролиза, мин.;

a – масса электрода до покрытия, г; b – масса электрода после покрытия, г; \mathcal{E}_{Me} – электрохимический эквивалент металла.

В качестве электрода для оценки величины выхода по току использовали стальной шарик диаметром 19 мм (площадь поверхности равна 0,1 дм²).

Была исследована электропроводность оксалатно-сульфатного электролита хромирования с добавками наноразмерных частиц оксида алюминия и карбида кремния. Характеристики используемых наночастиц представлены в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики наноразмерных частиц Al₂O₃ и SiC

Вид нанопорошка	Форма частиц	Размер частиц, нм	Среднее значение дисперсности, нм	Удельная поверхность, м ² /г	Хим. состав основных веществ, %
Al ₂ O ₃	сферическая	5 – 100	40	32	> 99
SiC	кубическая, осколочная	50 – 250	100	23	> 99

Таблица 3. Результаты измерений УЭП

№ электролита / Температура, °С	I	II	III	IV	V
31	-	-	-	6,1	5,6
33	-	-	-	6,35	5,8
35	-	-	-	6,65	6,1
37	-	-	-	6,95	6,3
39	-	-	-	7,3	6,5
41	-	-	-	7,55	6,8
43	55,5	52,6	42,9	7,85	7,0
45	56,35	53,25	43,7	8,2	7,2
47	57,15	53,95	44,4	8,5	7,5
49	57,9	54,8	45,0	8,9	7,7
51	58,6	55,55	45,6	9,25	7,9
53	59,4	56,3	46,1	-	-
55	60,1	57,05	46,7	-	-
57	60,8	57,7	47,3	-	-
59	61,5	58,4	47,8	-	-
61	62,2	59,1	48,3	-	-
63	62,65	59,7	48,8	-	-
65	63,2	60,3	49,2	-	-

Результаты и их обсуждение

В табл. 3 представлены результаты измерений УЭП исследуемых электролитов в температурном диапазоне, соответствующем оптимальным значениям температуры в процессе электроосаждения покрытий. Графическая интерпретация зависимости УЭП электролитов от температуры растворов показана на рис. 1, 2. Видно, что электролиты на основе хромовой кислоты (I – III) имеют самую высокую удельную электропроводность, которая почти на порядок выше значений УЭП оксалатно-сульфатного электролита хромирования и стандартного электролита

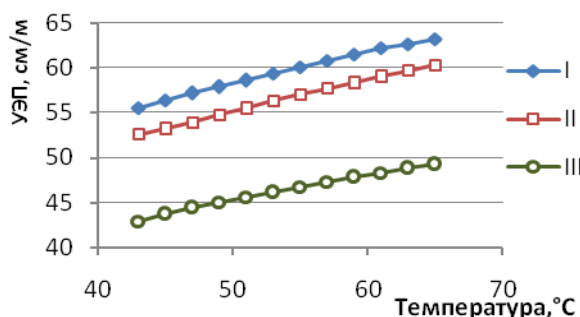


Рис. 1. УЭП электролитов хромирования на основе Cr⁶⁺

никелирования. Исходя из этого, можно утверждать, что «шестивалентные» электролиты хромирования являются более сильными электролитами, чем электролиты IV и V. Для всех видов электролитов характерно увеличение электропроводности с повышением температуры, что согласуется с теоретическими основами электрохимии и данными, приведёнными в [13–16]. Однако стоит отметить, что температурный фактор оказывает меньшее влияние на электролиты хромирования на основе соединений Cr⁶⁺ (увеличение УЭП на 15 %), чем на остальные электролиты (увеличение УЭП на 40–50 %).

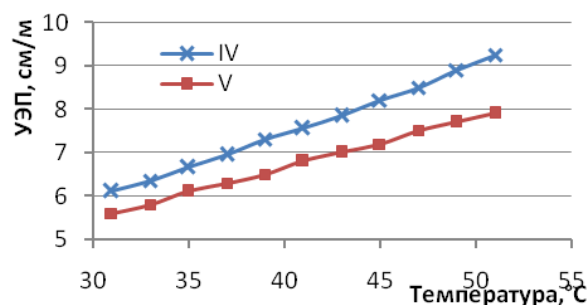
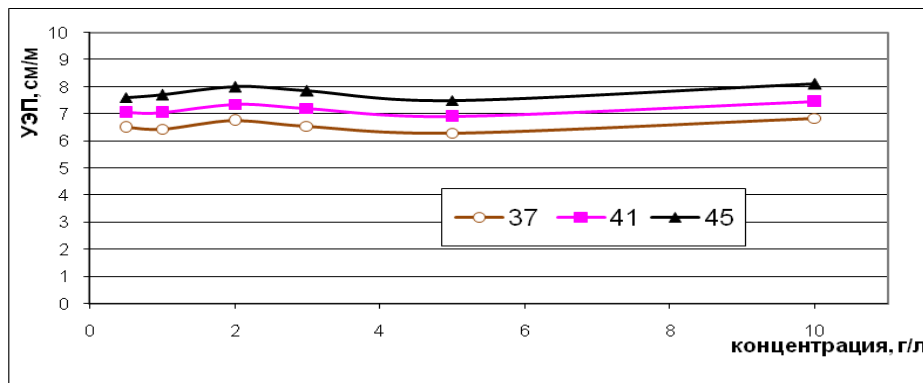


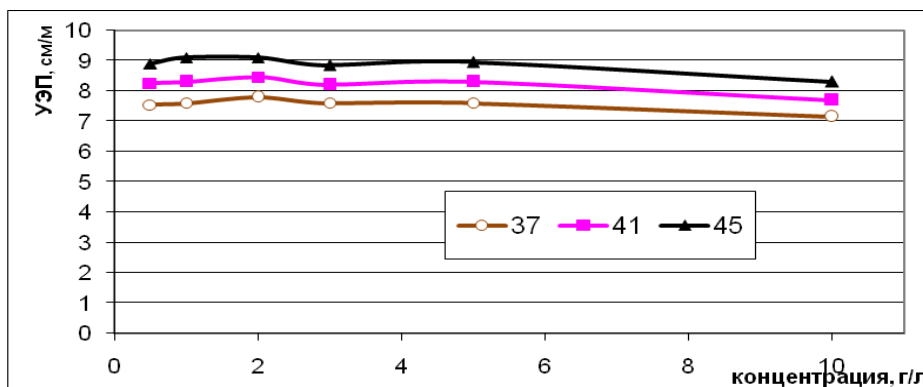
Рис. 2. УЭП оксалатно-сульфатного электролита (IV) и электролита Уотса (V)

Если вопрос о зависимости электропроводности электролитов от их температуры и концентрации изучен достаточно хорошо, то публикаций об исследовании электропроводности электролитов-суспензий практически не встречается. В связи с этим особый интерес представляет получение экспериментальных данных о зависимости электропроводности электролитов от концентрации вводимых в них наноразмерных частиц различной природы. В качестве добавок использовали наночастицы Al₂O₃, которые являются диэлектриками, и наночастицы SiC, относящиеся к полупроводникам. Измерение электропроводности проводили при температурах 37°C, 41°C, 45°C, соответствующих рабочему температурному диапазо-

ну процесса «трёхвалентного» хромирования. Установлено, что добавка в электролиты наноразмерных частиц концентрацией 5–10 г/л не оказывает существенного влияния на величину УЭП, что показано на примере исследования наносuspензии оксалатно-сульфатного электролита хромирования (рис. 3). Это свидетельствует о том, что наночастицы не оказывают влияния на степень диссоциации электролита и подвижность ионов в растворе и их функциональная роль, как было доказано исследованиями [17–20], сводится в основном к адсорбции на своей поверхности ионов покрываемого металла и доставке образовавшихся кластеров в прикатодное пространство.



а



б

Рис. 3. УЭП электролита хромирования IV при температурах 37°C, 41°C, 45°C: а – с добавками наночастиц Al₂O₃; б – с добавками наночастиц SiC

На рис. 4 представлена гистограмма, демонстрирующая соотношение величин электропроводности электролита и выхода металла по току. Как видно из рис. 4, электропроводность электролита и выход по току не коррелируют между собой, т.е. являются независимыми друг от друга параметрами. Полученные результаты сви-

детельствуют о том, что стадия массопереноса реагирующих веществ не является лимитирующей стадией электроосаждения хромовых и никелевых покрытий, а выход металла по току определяется в основном величиной перенапряжения выделения водорода, которая, по-видимому, не связана с УЭП электролитов.

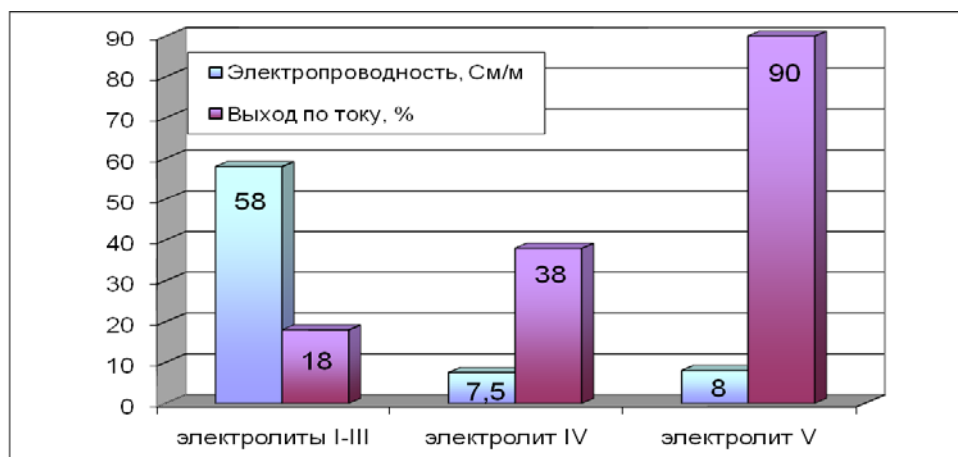


Рис. 4. Соотношение величин электропроводности электролита и выхода металла по току

Заключение

С повышением температуры удельная электропроводность стандартного и саморегулирующегося электролитов хромирования увеличивается на 15 %, оксалатно-сульфатного электролита хромирования и стандартного электролита никелирования – на 40–50 %.

Содержание в электролитах хромирования и никелирования наноразмерных частиц Al_2O_3 и SiC в рабочем диапазоне концентраций 5–10 г/л не оказывает существенного влияния на величину УЭП.

Не установлена корреляция между электропроводностью исследуемых электролитов и выходом металла по току.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № S. С. 7-17.
2. Семенычев В.В., Салахова Р.К., Тюриков Е.В., Ильин В.А. Защитные и функциональные гальванические покрытия, получаемые с применением наноразмерных частиц // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № S. С. 335-342.
3. Антропов Л.И. Теоретическая электрохимия. М.: Высшая школа, 1969. 510 с.
4. Щербаков В.В., Артемкина Ю.М., Понамарева Т.Н., Кириллов А.Д. Электропроводность системы аммиак-вода // *Журнал неорганической химии*. 2009. Т. 54, № 2. С. 321-323.
5. Щербаков В.В., Артемкина Ю.М., Плешкова Н.В., Седдон К.Р. Электрическая проводимость растворов некоторых ионных жидкостей в ацетонитриле // *Химическая промышленность сегодня*. 2011. № 12. С. 36-41.
6. Артемкина Ю.М. Закономерности в электропроводности некоторых растворов ассоциированных электролитов в воде и в ацетонитриле: Автореф. дис. канд. хим. наук. М., 2008. С. 16.
7. Артёмкина Ю.М., Ворошилова Ю.В., Плешкова Н.В. и др. Ассоциация некоторых ионных жидкостей в ацетонитриле по данным кондуктометрических измерений // *Успехи в химии и химической технологии*. 2008. Т. 22, № 3. С. 11-16.
8. Артёмкина Ю.М., Плешкова Н.В., Седдон К.Р., Щербаков В.В. Электропроводность некоторых ионных жидкостей // *Физико-химические свойства растворов и неорганических веществ: сб. научных трудов*. Вып. 182. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2008. С. 139-144.
9. Ильин В.А. Нанотехнологии нанесения кластерных гальванических покрытий // *Авиационные материалы и технологии*. 2009. № 2. С. 3-6.
10. Налётов Б.П. Кластерная гальваника – нанотехнология электрохимических коллоидных систем // *Авиационные материалы и технологии*. 2009. № 1. С. 27-32.
11. Вячеславов П.М., Шмелёв Н.М. Контроль электролитов и покрытий. Л: Машиностроение, 1985. 96 с.
12. Нагаев В.В. Исследование электролитов никелирования, содержащих нанопорошки // *Авиационные материалы и технологии*. 2009. № 1. С. 18-19.
13. Багоцкий В.С. Основы электрохимии. М.: Химия, 1988. 400 с.
14. Бардышев И.И., Ляхов Б.Ф., Полукаров Ю.М., Котенев В.А., Цивадзе А.Ю. Влияние абсорбции водорода на атомно-электронную структуру PDH по данным аннигиляции позитронов // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2011. Т. 47, № 5. С. 550-553.
15. Петухов И.В., Медведева Н.А., Шестакова А.А. О временной зависимости скорости коррозии Ni-P-покрытий в сульфатных средах // *Коррозия: материалы, защита*. 2013. № 5. С. 28-34.

16. Кузнецов Ю.И. Прогресс в ингибировании коррозии металлов и модификация нанослоёв на металлах // Коррозия: материалы, защита. 2011. № 1. С. 1-10.

17. Тюриков Е.В., Семёнычев В.В., Ильин В.А. О роли наноразмерных частиц оксида алюминия в саморегулирующемся электролите хромирования // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т.14, № 4 (3). С. 802-807.

18. Тюриков Е.В. Исследование служебных свойств покрытий, полученных в саморегулирующемся электролите хромирования, содержащем нанопорошок

оксида алюминия с размером частиц 5-50 нм // Авиационные материалы и технологии. 2009. № 1. С. 13-17.

19. Салахова Р.К. Хромирование в электролите, содержащем соли трёхвалентного хрома и нанопорошок оксида алюминия // Авиационные материалы и технологии. 2009. № 2. С. 19-24.

20. Салахова Р.К., Жирнов А.Д., Ильин В.А. Свойства и структура трёхвалентных хромовых покрытий, сформированных в присутствии наноразмерных частиц оксидов металлов // Коррозия: материалы, защита. 2009. № 10. С. 140-141.

Информация об авторах

Салахова Розалия Кабировна, кандидат технических наук, начальник лаборатории, Ульяновский научно-технологический центр Всероссийского института авиационных материалов. E-mail: salahovark@viam.ru. Область научных интересов: электрохимия, коррозия и защита металлов, электроосаждение гальванических покрытий.

Семёнычев Валентин Владимирович, кандидат технических наук, главный научный сотрудник лаборатории, Ульяновский научно-технологический центр

Всероссийского института авиационных материалов. E-mail: untcviam@viam.ru. Область научных интересов: конструкционные сплавы, коррозионная стойкость, защитные и функциональные покрытия, свойства сплавов.

Тихообразов Андрей Борисович, ведущий инженер-технолог, Ульяновский научно-технологический центр Всероссийского института авиационных материалов. E-mail: untcviam@viam.ru. Область научных интересов: кластерные гальванические покрытия, нанотехнологии.

SPECIFIC ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF CHROMIUM PLATING AND NICKEL PLATING ELECTROLYTES

© 2014 R. K. Salakhova, V. V. Semenychev, A. B. Tihobrazov

Ulyanovsk Science and Technology Center
of the All-Russian Institute of Aviation Materials USTC AIAM, Russian Federation

The paper presents the results of measuring specific electrical conductivity (SEC) of chromium and nickel plating electrolytes with the help of a non-contacting conductivity meter of the CRAB-d 064 type in temperature intervals corresponding to the working ranges of electrochemical deposition processes. A schematic diagram of the apparatus for the measurement of electrolyte SEC is presented. Electrolytes based on chromium compounds of varying degrees of valence (Cr^{3+} Cr^{6+}) and a standard nickel electrolyte (Watts electrolyte) were chosen as the objects of study. The dependence of the SEC of electrolytes on their temperature is analyzed, a comparative assessment of the impact of temperature on the electrical conductivity of various chroming electrolytes is given.

The influence of addition of nanoparticles of aluminum oxide and silicon carbide with the dispersion of 40-100 nm and a specific surface area of 23-32 m^2/g on the amount of electrical conductivity of an oxalate-sulfate electrolyte for chromium plating at a specified temperature is investigated. The study of nanosuspensions showed that the addition of nanoparticles of different nature with the concentration of 5-10 g/l to an electrolyte has no significant effect on the value of SEC.

To evaluate the relationship between the electrolyte conductivity and process parameters of electrodeposition of chromium and nickel coatings a qualitative assessment of chromium and nickel current output was performed and bar graphs showing the ratio of the values of the electrolyte electrical conductivity and the metal current output are presented. It has been established that the electrical conductivity of electrolytes and the metal current output are parameters that do not depend on each other.

Electrical conductivity, conductivity meter, chromium electrolyte, nickel electrolyte, current output, nano particles.

References

1. Kablov E.N. Strategic directions for the development of materials and technologies to process them for the period up to the year 2030 // *Aviation materials and technologies*. 2012. No. S. P. 7-17. (In Russ.)
2. Semenychev V.V., Salakhova R.K., Tyurikov E.V., Ilyin V.A. Protective and functional galvanic coatings, obtained with the use of nano-sized particles // *Aviation materials and technologies*. 2012. No. S. P. 335-342. (In Russ.)
3. Antropov L.I. *Teoreticheskaya elektrokimiya [Theoretical electrochemistry]*. Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 1969. 510 p.
4. Shcherbakov V.V., Artemkina Yu.M., Ponomaryova T.N., Kirilov A.D. Electrical conductivity of the ammonia-water system // *Russian journal of inorganic chemistry*. 2009. V. 54, no. 2. P. 277-279.
5. Shcherbakov V.V., Artemkina Yu.M., Pleshkova N.V., Seddon K.R. Electrical conductivity of solutions of some ionic liquids in acetonitrile // *Chemical industry today*. 2011. No. 12. P. 36-41. (In Russ.)
6. Artemkina Yu.M. *Zakonomernosti v elektroprovodnosti nekotorykh rastvorov assotsirovannykh elektrolitov v vode i v atsetonitrile: Avtoref. dis. kand. khim. nauk. [Consistent patterns of electrical conductivity of certain solutions of associated electrolytes in water and acetonitrile. Author's abstract of the Candidate's dissertation in chemistry]*. Moscow, 2008. P. 16.
7. Artemkina Yu.M., Voroshilova Yu.V., Pleshkova N.V. Association of some ionic liquids in acetonitrile according to the data of conductometer measurements // *Advances in chemistry and chemical technology*. 2008. V. 22, no. 3. P. 11-16. (In Russ.)
8. Artemkina Yu.M., Pleshkova N.V., Seddon K.R., Shcherbakov V.V. Electrical conductivity of some ionic liquids // *Cbornik nauchnykh trudov «Fiziko-khimicheskie svoystva rastvorov i neorganicheskikh veshchestv»*. Iss. 182. Moscow: RCTU them. D.I. Mendeleev Publ., 2008. P. 139-144. (In Russ.)
9. Ilyin V.A. Nanotechnology application cluster of galvanic coatings // *Aviation materials and technologies*. 2009. No. 2. P. 3-6. (In Russ.)
10. Nalyotov B.P. Cluster electroplating-nanotechnology electrochemical colloidal systems // *Aviation materials and technologies*. 2009. No. 1. P. 27-32. (In Russ.)
11. Vyacheslavov P.M., Shmelyov N.M. *Kontrol' elektrolitov i pokrytiy [Control of electrolytes and coatings]*. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1985. 96 p.
12. Nagayev V.V. Research of nickel nanopowders containing electrolytes // *Aviation materials and technologies*. 2009. No. 1. P. 18-19. (In Russ.)
13. Bagocky V.S. *Osnovy elektrokimii [Fundamentals of electrochemistry]*. Moscow: Chemistry Publ., 1988. 400 p.
14. Bardyshev I.I., Lyakhov B.F., Polukarov Y.M., Kotenev V.A., Tsivadze A.Y. Effect of hydrogen absorption on atomic-electronic structure of PdH system according to positron annihilation data // *Protection of metals and physical chemistry of surfaces*. 2011. V. 47, no. 5. P. 680-683.
15. Petukhov I.V., Medvedeva I.V., Shestakova A.A. Time dependence of Ni-P coating corrosion rate in sulfate media // *Cor-*

rosion: materials, protection. 2013. No. 5. P. 28-34. (In Russ.)

16. Kuznetsov Y.I. Advances in metal corrosion inhibition and modification of nanolayers on metals // Corrosion: materials, protection. 2011. No.1. P. 1-10. (In Russ.)

17. Tyurikov E.V., Semenychev V.V., Ilyin V.A. About the role of nanosized aluminium oxide particles in the automatically adjusting chrome plating electrolyte // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN. 2012. V.14, no.4 (3). P. 802-807. (In Russ.)

18. Tyurikov E.V. Study of properties of coatings obtained in a self-regulating

chromium electrolyte containing aluminium oxide nanopowder particles with the size of 5-50 nm // Aviation materials and technologies. 2009. No.1. P. 13-17. (In Russ.)

19. Salakhova R.K. Chrome-plating electrolyte containing salt trivalent of chromium and aluminium oxide nanopowder // Aviation materials and technologies. 2009. No. 2. P. 19-24. (In Russ.)

20. Salakhova R.K., Zhirnov A.D., Ilyin V.A. Properties and structure of trivalent chrome plating formed in the presence of nanoscale metal oxide particles // Corrosion: materials, protection. 2009. No. 10. P. 140-141. (In Russ.)

About the authors

Salakhova Rozalia Kabirovna, Candidate of Science (Engineering), Chief of laboratory, USTC AIAM. E-mail: salahovark@viam.ru. Area of Research: electrochemistry, corrosion and protection of metals against corrosion, deposition of electroplated coatings.

Semenychev Valentin Vladimirovich, Candidate of Science (Engineering), Chief Researcher, USTC AIAM. E-mail:

untcviam@viam.ru. Area of Research: structural alloys, corrosion resistance, protective and functional coatings, properties of alloys.

Tihoobrazov Andrey Borisovich, leading production engineer, USTC AIAM, Ulyanovsk, Russian Federation. E-mail: untcviam@viam.ru. Area of Research: clustered electrolyte coatings, nanotechnologies.

УДК 621.357.77+669

О ПРИРОДЕ ОБРАЗОВАНИЯ «ЧЁРНЫХ ТОЧЕК» НА ПОВЕРХНОСТИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В ПРОЦЕССЕ АНОДНОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

© 2014 В. В. Семенычев, Р. К. Салахова

Ульяновский научно-технологический центр Всероссийского института авиационных материалов (УНТЦ ВИАМ)

Исследованы причины возникновения дефектов в виде чёрных точек на поверхности крупногабаритных деталей из алюминиевых сплавов Д16чТ, 1973Т2, В95пчТ2, В95пчТ3, выявляемых после анодного оксидирования. Была сформулирована и проверена гипотеза об образовании таких дефектов при растворении интерметаллидов, выходящих на поверхность детали, в процессе её травления во время операции анодного оксидирования. Для этой цели была разработана методика, заключающаяся в том, что на полированном образце находили интерметаллид и с помощью микровёрдомера обкальвали зону с этим интерметаллидом для облегчения его последующего обнаружения по окончании травления образца. После различной длительности травления образцов в щелочной ванне линии анодного оксидирования путем микроскопических исследований отыскивали помеченную ранее с помощью микровёрдомера зону, содержащую интерметаллид, и фотографировали её. Длительность травления составляла 120 секунд и набиралась за 8 циклов. Металлографическими исследованиями образцов установлено, что в процессе травления алюминиевого сплава происходит растворение (вытравливание) частиц интерметаллидов, выходящих на поверхность детали. Последующее анодное оксидирование приводит к визуализации образовавшихся дефектов, которые и имеют вид чёрных точек.

Алюминиевые сплавы, интерметаллиды, «чёрные точки».

В настоящее время авиационная промышленность остаётся одним из наиболее высокотехнологических секторов экономики, потребляющих наукоёмкую продукцию [1, 2]. Алюминиевые деформируемые сплавы остаются базовыми конструкционными материалами современной и перспективной авиационной техники благодаря лёгкости, удачному комплексу необходимых эксплуатационных характеристик, хорошей технологичности и освоенности в металлургическом и авиационном производствах [3]. Конструкционные алюминиевые деформируемые сплавы нашли широкое применение в самолётостроении, они применяются в виде листов, профилей, плит, панелей, штамповок, поковок и других полуфабрикатов. В производстве современных широкофюзеляжных самолётов особое место занимают крупногабаритные и длинномерные полуфабрикаты из алюминиевых сплавов, применение которых позволяет существенно снизить количество поперечных стыков в конструкции крыла и,

следовательно, снизить его вес. Поэтому крылья изготавливают из плит и профилей длиной 30–40 м без единого поперечного стыка [4].

Одним из основных способов защиты алюминиевых сплавов от атмосферной коррозии является защита анодными плёнками, которые используются также в качестве основы при нанесении лакокрасочных покрытий [5, 6]. После анодного оксидирования деталей из алюминиевых сплавов (особенно крупногабаритных) на их поверхности проявлялись дефекты в виде чёрных точек, которые могут являться следствием растравливания поверхности, наличия коррозионных поражений и вытравливания неоднородностей [7, 8]. Такие дефекты являются браковочным признаком. Поэтому для их устранения требовалась зачистка этих мест детали и её последующее перенаодирование, так как поверхностные дефекты могут инициировать развитие коррозионных поражений, особенно в агрессивных условиях морского климата [9,

10]. Для выработки способов недопущения подобных дефектов необходимо установить природу их образования [11].

В процессе изготовления крупногабаритных полуфабрикатов из алюминиевых деформируемых сплавов (плавка, прокатка, прессование, термообработка и т.д.) в матрице сплава формируются интерметаллиды. В качестве рабочей гипотезы образования дефектов во время операции травления деталей при их анодном окислении была рассмотрена возможность растворения интерметаллидов, имеющих электродный потенциал более электроотрицательный, чем сплав. С це-

лю определения электродных потенциалов интерметаллидов были отлиты интерметаллиды (табл. 1) следующих составов: $Al_2Mg_3Zn_3$, $CuAl_2$, Al_2CuMg .

В табл. 2 приведены сведения о значениях стационарных потенциалов некоторых полуфабрикатов из алюминиевых деформируемых сплавов и специально отлитых интерметаллидов. За стационарные потенциалы принимали потенциал, установившийся через 24 часа в 3%-м растворе хлорида натрия. В качестве электрода сравнения использовали хлорсеребряный электрод.

Таблица 1. Содержание компонентов в интерметаллидах, г

Состав	Cu	Al	Mg	Zn
$CuAl_2$	54	46	-	-
Al_2CuMg	45	38	17	-
$Al_2Mg_3Zn_3$	-	17	22	61

Таблица 2. Значения стационарных потенциалов

Сплав или интерметаллид	Вид полуфабриката	Стационарный потенциал, мВ
Д16чТ	панель	-595
1973Т2	плита	-685
В95пчТ2	прессованная полоса	-675
В95пчТ3	штамповка	-700
$Al_2Mg_3Zn_3$		-1215
$CuAl_2$		-610
Al_2CuMg		-720

Для проверки выдвинутой гипотезы была проведена серия экспериментов, которая заключалась в следующем. С поверхности длинномерной панели вырезали образцы, полировали их лицевую поверхность до зеркального блеска, после чего с помощью микроскопа при увеличении 500 крат отыскивали видимые интерметаллиды. Зоны с обнаруженными, выходящими на поверхность образца интерметаллидами выделяли путём их обкалывания с помощью микротвёрдомера для дальнейшего облегчения поиска найденных интерметаллидов.

Приготовленные таким образом образцы травили в щелочной ванне линии

анодного окисления. Длительность каждого цикла травления образца составляла 10 секунд до набора суммарного времени, равного одной минуте, и 30 секунд до набора времени, равного двум минутам (всего 8 циклов травления). После каждого цикла травления проводилась стандартная промывка в тёплой и холодной воде. На рис. 1 показана выделенная зона поверхности исходного образца с интерметаллидами. На фотографии чётко видны отпечатки пирамиды микротвёрдомера, которые в дальнейшем позволят безошибочно идентифицировать этот участок (видимые интерметаллиды помечены стрелками).

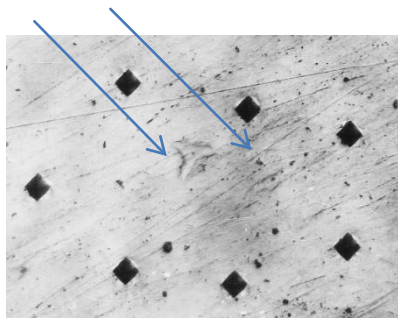


Рис. 1. Исходная поверхность образца из сплава Д16AlTi с выделенной зоной, содержащей интерметаллиды

На рис. 2 приведены фотографии того же образца, прошедшего 8 циклов травления (травление + промывка) с общим набором времени травления, равным 120 секундам.

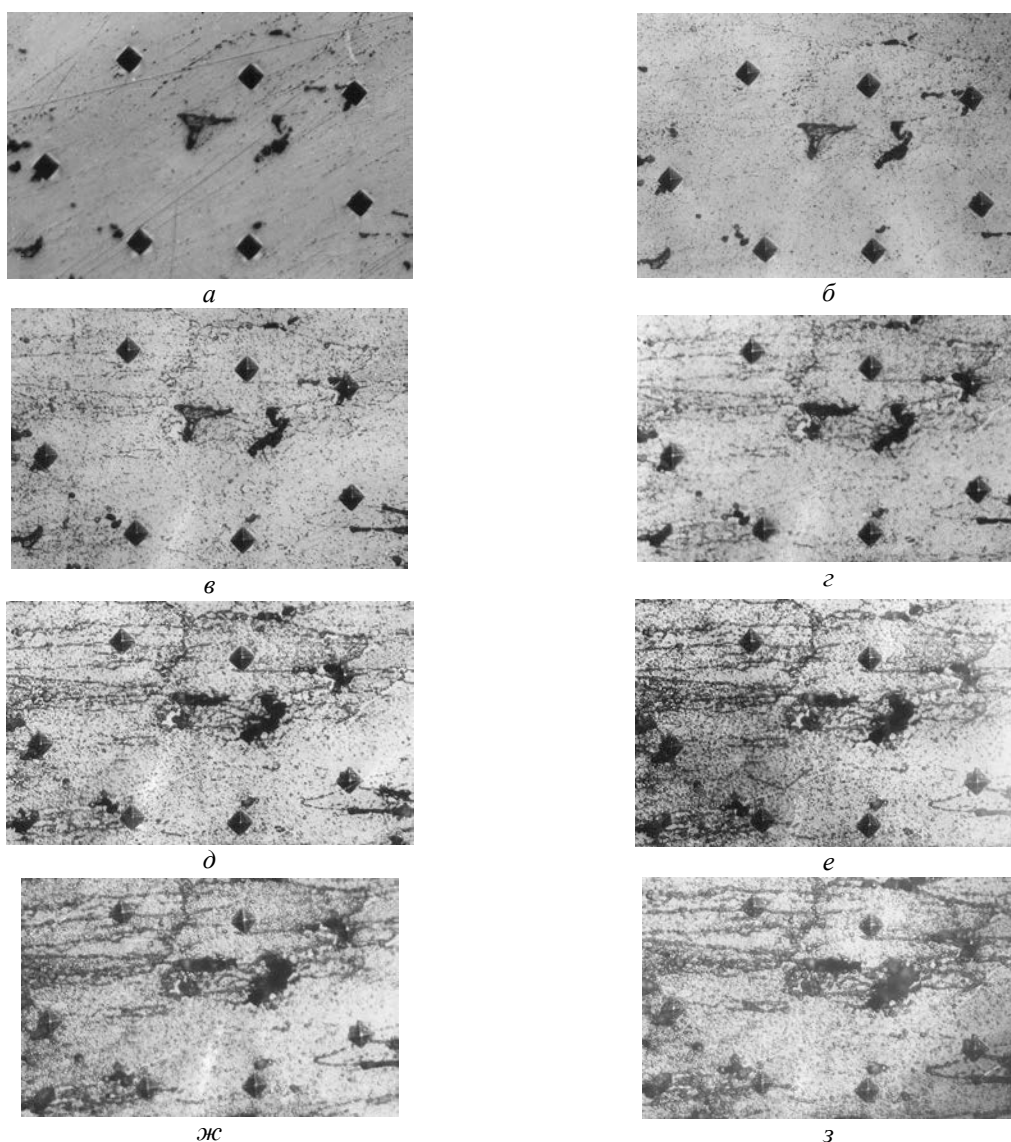


Рис. 2. Образец сплава Д16AlTi, прошедший суммарное травление длительностью: 10 с (а), 20 с (б), 30 с (в), 40 с (г), 50 с (д), 60 с (е), 90 с (ж), 120 с (з), $\times 500$.

Из представленных фотографий видно, как с набором времени травления сначала чётко проявляются границы интерметаллидов, а впоследствии в результате их растворения образуются несплошности в виде глубоких питтингов.

Результаты проведённого эксперимента свидетельствуют о том, что такими интерметаллидами могут быть интерметаллиды состава Al_2CuMg для сплавов типа дуралюмин [12] и $Al_2Mg_3Zn_3$ для высокопрочных алюминиевых сплавов [13], так как их электродный потенциал более электроотрицательный, чем электродный потенциал самого сплава (табл. 2). Следовательно, скорость их растворения во время операции травления будет значительно выше, чем скорость травления граничащих с ними структурных составляющих.

Последующее анодное оксидирование детали приводит к выявлению этих дефектов, так как глубина образовавшихся дефектов значительно превосходит их поверхностные размеры. Анодно-оксидная плёнка не может сформировать-

ся на поверхности питтингов, в результате чего последние и приобретают вид чёрных точек.

На рис. 3 показан внешний вид образца с анодно-оксидным покрытием, на котором видны образовавшиеся в результате вытравливания интерметаллидов характерные чёрные точки.

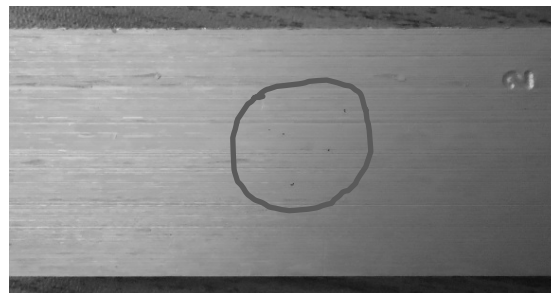


Рис.3. Внешний вид анодированного образца, область с чёрными точками выделена, $\times 2$

Проведённые исследования позволили установить механизм образования описанных дефектов и открыли возможность поиска мер по их недопущению.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. № S. С. 7-17.
2. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. Алюминиевые деформируемые сплавы // Авиационные материалы и технологии. 2012. № S. С. 167-182.
3. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2012. № S. С. 157-167.
4. История авиационного материаловедения. ВИАМ-75 лет поиска, творчества, открытий. Под общей ред. академика Е.Н. Каблова. М.: Наука, 2007. 343 с.
5. Синявский В.С., Комиссарова В.С., Вальков В.Д., Батраков В.П. Промышленные алюминиевые сплавы: справочник. М.: Metallurgy, 1984. С. 507-508.
6. Ивонин В.Н., Чинь Куок Кхань, Динь Ван Дам, Олейник С.В., Кузнецов Ю.А., Кузнецов Ю.И., Карпов В.А. Об эффективности противокоррозионной защиты алюминиевых сплавов конверсионными покрытиями в условиях влажного тропического климата // Коррозия: материалы, защита. 2012. № 10. С. 44-48.
7. Семенычев В.В. Коррозионная стойкость высокопрочных алюминиевых сплавов в условиях морского субтропического климата // Технология легких сплавов. 2007. № 4. С. 138-142.
8. Кононов С.А., Горохов В.П., Перевозов А.С., Иванищева М.Г., Ланцова Л.П., Ткаченко Е.А. Разработка и внедрение технологии производства обшивочных листов из дуралюминов с регламентированным размером зерна // Тезисы докл. междунар. науч.-технич. конф. «Ак-

туальные вопросы авиационного материаловедения». М.: ВИАМ, 2007. С. 37.

9. Жирнов А.Д., Каримова С.А. Коррозия и защита металлических материалов // 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ». Юбилейный науч.-технич. сб. М.: ВИАМ, 2007. С. 202-208.

10. Жиликов В.П., Каримова С.А., Лешко С.С., Чесноков Д.В. Исследование динамики коррозии алюминиевых сплавов при испытании в камере солевого тумана (КСТ) // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 4. С. 18-22.

11. Елинек Т.В., Штайнхайм ан дер Мурр. Успехи гальванотехники. Обзор

мировой специальной литературы за 2010-2011 годы // Гальванотехника и обработка поверхности, 2012. № 4. С. 13-28.

12. Хохлов В.В., Жаринов П.М., Ракоч А.Г. Коррозионная стойкость сплава Д16 с оксидно-керамическими покрытиями, полученными методом микродугового оксидирования в силикатных электролитах // Коррозия: материалы, защита. 2007. № 4. С. 23-27.

13. Шатров А.С. Защитные оксидно-керамические покрытия, формируемые на алюминиевых сплавах методом плазменного электролитического оксидирования // Коррозия: материалы, защита. 2012. № 4. С. 28-37.

Информация об авторах

Семенычев Валентин Владимирович, кандидат технических наук, главный научный сотрудник лаборатории, Ульяновский научно-технологический центр Всероссийского института авиационных материалов. E-mail: untcviam@viam.ru. Область научных интересов: конструкционные сплавы, коррозионная стойкость, защитные и функциональные покрытия, свойства сплавов.

Салахова Розалия Кабировна, кандидат технических наук, начальник лаборатории, Ульяновский научно-технологический центр Всероссийского института авиационных материалов. E-mail: salahovark@viam.ru. Область научных интересов: электрохимия, коррозия и защита металлов, электроосаждение гальванических покрытий.

THE NATURE OF “BLACK SPOTS” FORMATION ON THE SURFACE OF LARGE PARTS MADE OF ALUMINUM ALLOYS IN THE PROCESS OF ANODIC OXIDISING

© 2014 V. V. Semenychev, R. K. Salakhova

Ulyanovsk Science and Technology Center
of the All-Russian Institute of Aviation Materials (USTC AIAM),
Ulyanovsk, Russian Federation

The causes of black spot defects detected on the surface of large parts made of aluminum alloys (D16chT, 1973T2, V95pchT2, V95pchT3) following anodic oxidation are investigated in the paper. A hypothesis of such defects appearing during the dissolution of intermetallics on the surface of a part in the process of etching during anodizing was put forward and tested. A technique was developed for this purpose the essence of which was that an intermetallic was detected on a polished sample and using a microhardness tester the area including the intermetallic was marked to facilitate its subsequent detection at the end of the specimen etching. After the etching of the specimen during periods of different duration in an alkaline bath of the anodizing line the area containing an intermetallic previously labeled using the microhardness tester was detected by microscopic observations and photographed. The duration of the etching process was 120 seconds and consisted of 8 cycles. Metallographic tests of the specimens revealed the fact that in the process of etching of an aluminum alloy dissolution (etching) of intermetallic particles opening out on the surface of the part takes place. Subsequent anodic oxidation leads to the visualization of defects which have the form of black spots.

Aluminum alloys, intermetallic, “black spots”.

References

1. Kablov E.N. Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030 // Aircraft Materials and Technologies. 2012. No. S. P. 7-17. (In Russ.)
2. Antipov V.V., Senatorova O.G., Tkachenko E.A., Vahromov R.O. Aluminum wrought alloys // Aircraft Materials and Technologies. 2012. No. S. P. 167-182. (In Russ.)
3. Antipov V.V. The development strategy of titanium, magnesium, beryllium and aluminum alloys // Aircraft Materials and Technologies. 2012. No. S. P. 157-167. (In Russ.)
4. Istoriya aviatsionnogo materialovedeniya. VIAM-75 let poiska, tvorchestva, otkrytiy [History of aviation materials science. VIAM-75 years of research, creative work, discoveries]. Edited by Academician E.N. Kablov. Moscow: Nauka Publ., 2007. 343 p.
5. Sinjavskij V.S., Komissarova V.S., Val'kov V.D., Batrakov V.P. Promyshlennyye alyuminiyevyye splavy. Spravochnik. [Industrial aluminum alloys. Reference guide]. Moscow: Metallurgy Publ., 1984. P. 507-508.
6. Ivonin V.N., Chin' Kuok Khan', Din' Van Dam, Olejnik S.V., Kuznenkov Ju.A., Kuznecov Ju.I., Karpov V.A. On the effectiveness of anti-corrosion protection of aluminum alloys conversion coatings in a humid tropical climate // Corrosion: Materials, protection. 2012. No. 10. P. 44-48. (In Russ.)
7. Semenychev V.V. Corrosion resistance of high-strength aluminum alloys in marine sub-tropical climate // Technology of light alloys. 2007. No. 4. P. 138-142. (In Russ.)
8. Kononov S.A., Gorohov V.P., Perevozov A.S., Ivanishheva M.G., Lancova L.P., Tkachenko E.A. Development and implementation of production technology skin sheets of duralumin of regulated grain size // Abstracts of the International Scientific and Technical Conference «Topical issues of aviation materials». Moscow: VIAM. 2007. P. 37. (In Russ.)
9. Zhirnov A.D., Karimova S.A. Corrosion and Protection of metallic materials / The collection of 75 years. Aircraft materials. Selected Works «VIAM». Anniversary scientific and technical collection. Moscow: VIAM. 2007. P. 202-208. (In Russ.)
10. Zhilikov V.P., Karimova S.A., Leshko S.S., Chesnokov D.V. Study of the dynamics of corrosion of aluminum alloys when tested in a salt spray (KST) // Aircraft Materials and Technologies. 2012. No. 4. P.18-22. (In Russ.)
11. Elinek T.V., Shtajnhajm an der Murr. Success of electroplating. Review of the world literature in 2010-2011 // Electroplating and Surface Treatment. 2012. No. 4. P.13-28. (In Russ.)
12. Hohlov V.V., Zharinov P.M., Rakoch A.G. Corrosion resistance of the alloy D16 with oxide ceramic coatings produced by micro-arc oxidation in silicate electrolyte // Corrosion: Materials, protection. 2007. No. 4. P. 23-27. (In Russ.)
13. Shatrov A.S. Protective oxide-ceramic coatings formed on aluminum alloys using the method of plasma electrolytic oxidation // Corrosion: Materials, protection. 2012. No. 4. P.28-37. (In Russ.)

About the authors

Semenychev Valentin Vladimirovich, Candidate of Science (Engineering), Chief Researcher, USTC AIAM. E-mail: untcviam@viam.ru. Area of Research: structural alloys, corrosion resistance, protective and functional coatings, properties of alloys.

Salakhova Rozalia Kabirovna, Candidate of Science (Engineering), Chief of laboratory, USTC AIAM. E-mail: salahovark@viam.ru. Area of Research: electrochemistry, corrosion and protection of metals against corrosion, deposition of electroplated coatings.

УДК 621.4-027.21

ИССЛЕДОВАНИЕ ЖАРОСТОЙКОГО ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО ПОДСЛОЯ ДЛЯ ТЕПЛОЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК ГТД

© 2014 Ю. П. Тарасенко, И. Н. Царёва, О. Б. Бердник,
Я. А. Фель, Л. А. Кривина

Институт проблем машиностроения Российской Академии наук,
г. Нижний Новгород

В работе приведены результаты исследований структуры и физико-механических свойств жаростойкого интерметаллидного покрытия системы «Ni-Co-Cr-Al-Y», полученного методом высокоэнергетического плазменного порошкового напыления (с применением плазмотрона оригинальной конструкции) и используемого в качестве подслоя при формировании теплозащитного покрытия диоксида циркония. Получено покрытие с интерметаллидным фазовым составом (β -NiAl + γ' -Ni₃Al) и сфероидальной микроструктурой зёрен. Покрытие имеет плотность $\rho = 8200$ кг/м³, микротвёрдость $H_{\mu} = 7,85$ ГПа и шероховатость по параметру $R_a = 5$ мкм. По результатам испытаний эффективности теплозащиты стенки турбинной лопатки из сплава ЖС6Ф с помощью теплозащитного покрытия ZrO₂ с подслоем «Ni-Co-Cr-Al-Y» снижение температуры металла составило 398 К. Покрытие предназначено для защиты от высокотемпературной газовой коррозии рабочей поверхности лопаток турбин газотурбинных двигателей (ГТД) различного назначения в виде подслоя для теплозащитного покрытия диоксида циркония, а также в качестве самостоятельного жаростойкого покрытия. Разработанное плазменное жаростойкое покрытие системы «Ni-Co-Cr-Al-Y» апробировано в качестве подслоя теплозащитного покрытия диоксида циркония для продления срока службы рабочих лопаток (из жаростойкого никелевого сплава ЖС6Ф) турбины авиационного газотурбинного двигателя серии НК.

Высокоэнергетическое плазменное напыление, интерметаллидные фазы, сфероидальные зерна, пористость, микротвёрдость, жаростойкость, турбинные лопатки.

Введение

Повышение надёжности и ресурса турбинных лопаток газотурбинных двигателей является приоритетным направлением современного двигателестроения. Совершенствование технологического оборудования для плазменного напыления открывает новые возможности для создания теплозащитных покрытий с улучшенными эксплуатационными свойствами, предназначенных для защиты рабочей поверхности турбинных лопаток газотурбинных двигателей, работающих в условиях воздействия рабочих газов при высоких температурах. Тенденция повышения температуры эксплуатации (до 1273 – 1473 К) турбинных лопаток ужесточает требования, предъявляемые к высокотемпературной стойкости теплозащитных покрытий. В свою очередь, служебные свойства теплозащитных покрытий определяются не только совокупностью их физико-механических характеристик, но и каче-

ством подслоя, на котором сформирован рабочий слой на основе диоксида циркония. Керамическое покрытие несёт основную нагрузку по обеспечению эффективной теплозащиты, особенно на стадии запуска двигателя, характеризующейся высоким градиентом температуры. Кроме того, при увеличении срока службы может происходить растрескивание и отслоение теплозащитного покрытия. На этой стадии эксплуатации подслоя начинает выполнять функцию защитного покрытия и должен надёжно сберегать рабочую поверхность лопаток от высокотемпературной газовой коррозии. Поэтому научно-техническая задача по разработке надёжного подслоя является не менее важной по сравнению с задачей формирования теплозащитного покрытия.

Однако эксплуатационная практика свидетельствует о недостаточной жаростойкости покрытий, получаемых методом плазменного напыления на стандарт-

ном оборудовании [1, 2, 3]. Метод плазменного напыления основан на использовании тепловой и кинетической энергии плазменной струи ($T = 1073-3273$ К, $V = 200-350$ м/с) [1], генерируемой плазмотроном. Напыляемый материал в виде порошковой смеси вводится в плазменную струю, где он нагревается, плавится, ускоряется и, попадая на напыляемую поверхность, образует покрытие. В данной работе при разработке жаростойкого подслоя использован метод высокоэнергетического плазменного напыления, осуществляемый на модифицированном оборудовании за счёт использования плазмотрона ПНК-50 оригинальной конструкции, который в своём составе имеет секционированную межэлектродную вставку для стабилизации параметров плазменной струи и отличается от серийно выпускаемых плазмотронов повышенными энергетическими характеристиками (мощность плазмотрона ~ 50 кВт, температура плазменного потока – $5000-12000$ К, средне-массовая скорость истечения плазменной струи $V = 2400$ м/с) [4].

Методика исследований

Объектами исследований являлись:

1. Порошковая смесь марки ПНХ20К20Ю13-1 с дисперсностью частиц 20/60 мкм.

2. Жаростойкий интерметаллидный подслоя системы «Ni-Co-Cr-Al-Y», полученный из порошковой смеси ПНХ20К20Ю13-1 (20/60) на образцах из жаропрочного никелевого сплава ЖС6Ф, используемого в авиационном двигателе-строении, с помощью плазмотрона ПНК-50.

Нанесение жаростойкого покрытия проводилось методом высокоэнергетического плазменного порошкового напыления на модернизированном оборудовании (на базе установки «Киев-7») с использованием плазмотрона ПНК-50 оригинальной конструкции и повышенной мощности (50 кВт) при технологических параметрах напыления: ток дуги $I_d = 180$ А, рабочее напряжение $U = 260$ В, расход

плазмообразующего газа (воздух) = $0,0035$ кг/с, расход транспортирующего газа (аргон) = $0,00027$ кг/с.

Дериватографические исследования порошковой смеси ПНХ20К20Ю13-1 (20/60) и жаростойкого подслоя выполнены на дериватографе NETZSCH STA 449F1.

Фазовый состав порошковой смеси и подслоя исследовали методом рентгено-структурного анализа на дифрактометре «Дрон-3М» с применением $Cu-K_{\alpha}$ -излучения в геометрии по Бреггу–Брентано.

Металлографические исследования проводили на растровом электронном микроскопе «VEGA//TESCAN».

Плотность и пористость подслоя определяли методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 18898-89 с использованием аналитических весов VIBRA.

Измерения микротвёрдости проводили на поперечных шлифах по ГОСТ 9450-76 на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке на индентор 1 Н.

Испытания на жаростойкость проводили на образцах из жаростойкого никелевого сплава ЖС6Ф без покрытия и на аналогичных образцах с жаростойким подслоем системы «Ni-Co-Cr-Al-Y» по методике, разработанной в ВВИА им. Н.Е. Жуковского. Образцы подвергали изотермической выдержке в печи на воздухе при температуре 1123 К в течение 500 часов. Жаростойкость оценивали по относительному изменению массы образцов методом взвешивания на аналитических весах VIBRA через каждые 50 часов. Изменение массы образцов определяли по формуле:

$$\Delta M = (M - M_0) / M_0, \quad (1)$$

где M_0 – масса образца в исходном состоянии; M – масса образца в момент испытания.

По результатам испытаний строили (усреднённые по 4 образцам) графические зависимости относительного изменения массы от времени испытания $\Delta M(t)$.

Испытания на термоусталость проведены в ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» на установке с высокочастотным генератором ВЧГ4-10/0,44 при максимальной температуре в цикле 1323 К на лопатках без покрытия и с теплозащитным покрытием, сформированным на жаростойком подслое. Испытания на термоусталость проводились при высокочастотном разогреве на частоте 0,44 МГц со средней скоростью разогрева 353...373 К/с, близкой к условиям эксплуатации турбинных лопаток. Термоциклическую долговечность определяли по моменту растрескивания покрытия в наиболее термонапряженной зоне. При определении эффективности теплозащиты использовали факел пламени от горения углеводородного топлива. Образец состоял из двух продольных половинок лопатки, на внутреннюю поверхность одной из которых было нанесено теплозащитное покрытие с подслоем. Реальное снижение температуры металла лопатки до и после

нанесения на его поверхность покрытия с подслоем оценивалось с помощью термомпар.

Результаты исследований

С целью улучшения эксплуатационных свойств жаростойкого подслоя для его создания была выбрана порошковая смесь марки ПНХ20К20Ю13-1 с дисперсностью частиц 20/60 мкм (химический состав: Co – 22,3 %; Cr – 18,8 %; Al – 14,0 %; Fe – 0,14 %; Y – 0,09 %; Si – 0,51; Nb – 0,14; C – 0,15 %; Ca – 0,06 %; Mn – 0,01 %; S – 0,006 %; Ni – остальное). На рис. 1 представлены фотографии порошковой смеси. Порошинки неправильной формы состоят из отдельных частиц. Методом рентгеноструктурного анализа установлено, что фазовый состав порошковой смеси представляет собой интерметаллидное соединение NiAl (β -фаза) с небольшим количеством γ' -Ni₃Al фазы (табл. 1).

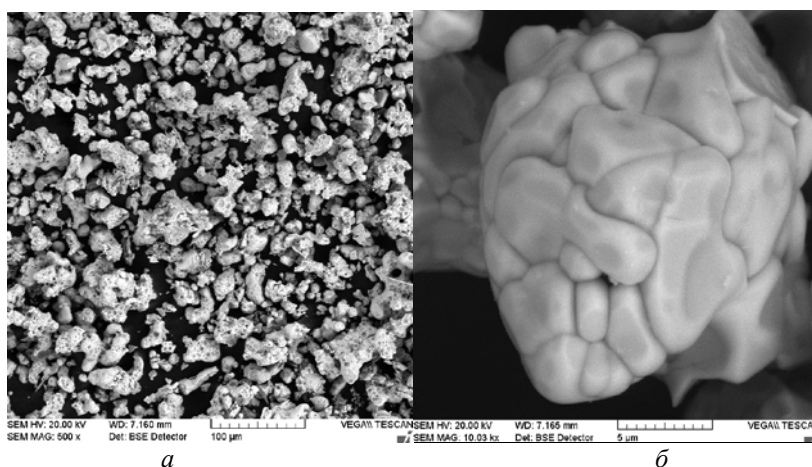


Рис. 1. Вид порошковой смеси ПНХ20К20Ю13 (20/60): а – (X500), б – (X10 000)

При высокоэнергетическом плазменном напылении формируется покрытие интерметаллидного состава ($\beta+\gamma'$). В результате высокотемпературного воздействия плазменного потока в подслое увеличивается количество γ' -фазы (табл. 1). Дериватографические исследования показали, что фазовое превращение происходит при температуре 1113 К (рис. 2, а). Микроструктура покрытия имеет слоистое строение (рис. 3, а). При анализе по-

перечного шлифа подслоя сквозной пористости и микротрещин не обнаружено, имеются отдельные поры размером до ~10 мкм. Открытая пористость составляет 1,6 %. На поверхности покрытия наблюдается сфероидизация зерен (рис. 3, б). При полёте частиц порошка в потоке плазмы в результате высокотемпературного воздействия происходит оплавление их граней и формирование морфологии сфероидального типа. Во внутренних сло-

ях подслоя также видны хаотично распределённые сфероидальные зерна разной дисперсности (от 1 до 5 мкм) (рис. 4, а). Анализ элементного состава сфероидальных включений даёт основание утверждать, что по фазовому составу это ин-

терметаллидное соединение, окаймлённое оксидом хрома (рис. 4, б).

Интерметаллидный подслоя имеет плотность $\rho = 8200 \text{ кг/м}^3$, микротвёрдость $H_{\mu} = 7,85 \text{ ГПа}$ и шероховатость по параметру $R_a = 5 \text{ мкм}$.

Таблица 1. Результаты рентгеноструктурного анализа порошковой смеси ПНХ20К20Ю13 (20/60) и жаростойкого покрытия

Материал	2θ , град	d, нм	I, %	(hkl)	Фаза
Порошковая смесь ПНХ20К20Ю13	30,865	0,2898		(100)	β -NiAl
	43,632	0,2072	9	(111)	γ' -Ni ₃ Al
	44,334	0,2045	100	(110)	β-NiAl
	50,928	0,1793	2	(200)	γ' -Ni ₃ Al
	54,996	0,1669	2	(111)	β -NiAl
	64,817	0,1438	7	(200)	β -NiAl
	82,214	0,1173	16	(211)	β -NiAl
	98,628	0,1017	3	(220)	β -NiAl
Покрытие, полученное из порошковой смеси	30,444	0,2942	8	(100)	β -NiAl
	36,196	0,2487	8	(110)	γ' -Ni ₃ Al
	43,632	0,2072	69	(111)	γ' -Ni ₃ Al
	44,474	0,2039	100	(110)	β-NiAl
	50,787	0,1797	25	(200)	γ' -Ni ₃ Al
	65,097	0,1433	10	(200)	β -NiAl
	74,778	0,1270	14	(210)	β -NiAl
	82,214	0,1173	18	(211)	β -NiAl
90,772	0,1083	11	(311)	γ' -Ni ₃ Al	
Покрытие после испытаний жаростойкости	25,322	0,3520	5	(100)	γ' -Ni ₃ Al
	30,936	0,2887	8	(100)	β -NiAl
	34,802	0,2578	17	(110)	γ' -Ni ₃ Al
	43,534	0,2078	100	(111)	γ'-Ni₃Al
	50,894	0,1793	43	(200)	γ' -Ni ₃ Al
	52,141	0,1756	13	(111)	β -NiAl
	57,256	0,1609	20	(210)	γ' -Ni ₃ Al
	64,615	0,1444	12	(211)	γ' -Ni ₃ Al
	67,859	0,1381	11	(220)	γ' -Ni ₃ Al
	75,094	0,1266	27	(210)	β -NiAl
	91,060	0,1080	24	(311)	γ' -Ni ₃ Al
96,549	0,1083	8	(222)	γ' -Ni ₃ Al	

Результаты испытаний интерметаллидного подслоя на жаростойкость приведены в виде графических зависимостей на рис. 5. Кривая основного материала (сплав ЖС6Ф) находится в положительной области, что свидетельствует об увеличении привеса в процессе изотермической выдержки. На поверхности сплава образуются стабильные оксиды, которые при испытаниях не разрыхляются и не от-

слаиваются. Образцы с интерметаллидным подслоем системы «Ni-Co-Cr-Al-Y» показали стабильное поведение при высокотемпературном окислении (рис. 5). Кривая для подслоя имеет монотонный возрастающий вид, что свидетельствует об отсутствии отслоений покрытия. Окисление, как правило, происходит на защищенных торцах образцов.

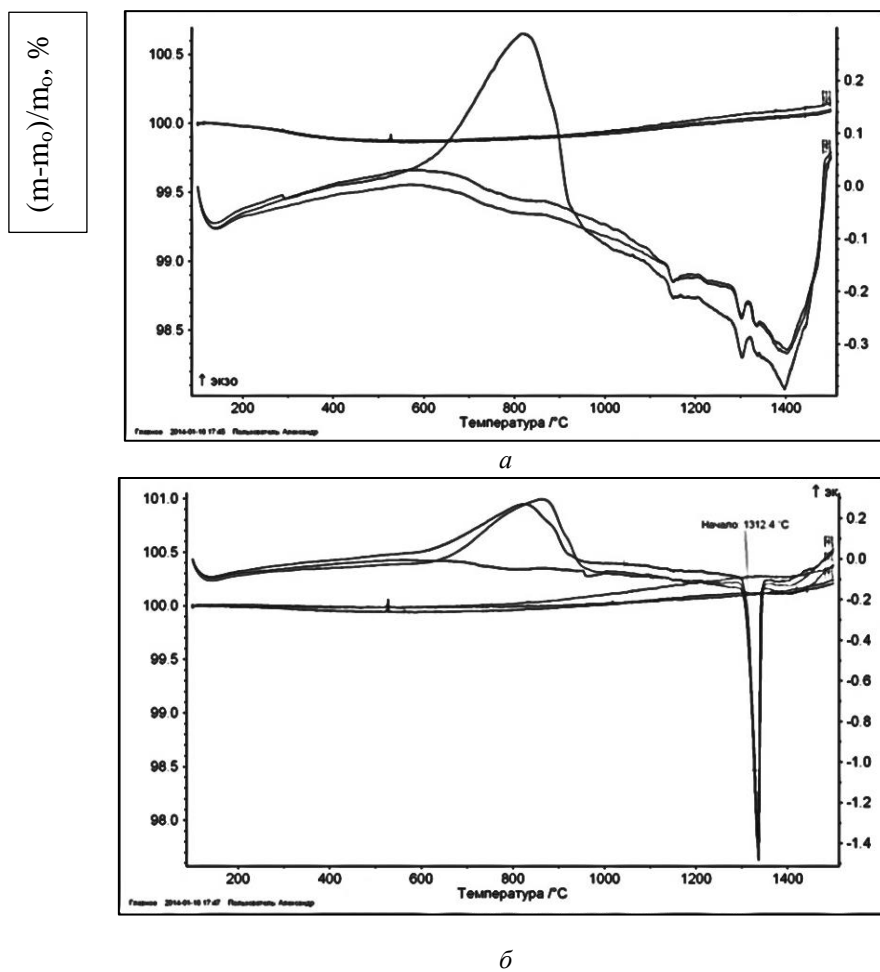


Рис. 2. Дериватограмма порошковой смеси ПНХ20К20Ю13 (20/60) (а) и интерметаллидного подслоя, полученного из неё (б)

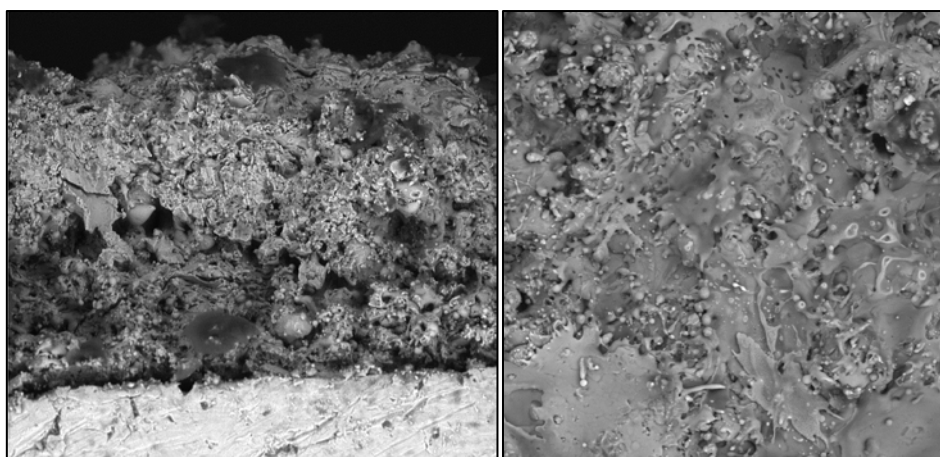
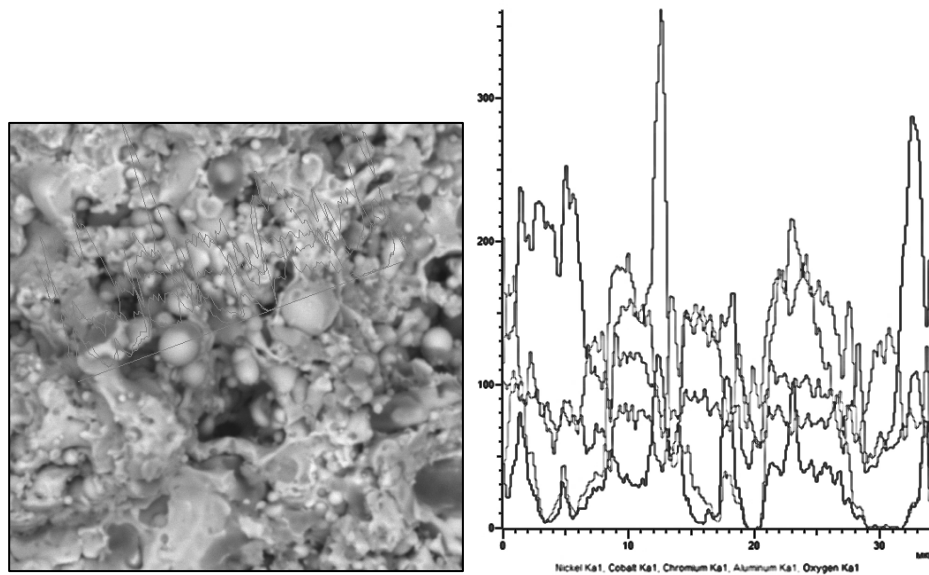


Рис. 3. Микроструктура поперечного шлифа (а) и поверхности (б) интерметаллидного подслоя, полученного из порошковой смеси ПНХ20К20Ю13 (20/60): а – (X1000), б – (X5000)



а б
Рис. 4. Микроструктура поперечного шлифа (а) (X2000) и распределение элементного состава (б) в интерметаллическом подслое



Рис. 5. Относительное изменение массы образцов из сплава ЖС6Ф до и после нанесения интерметаллического подслоя «Ni-Co-Cr-Al-Y» от времени изотермической выдержки

Микроструктура и внешний вид подслоя после испытаний на жаростойкость представлены на рис. 6, а. Трещин, сквозных пор и отслоений в покрытии не обнаружено. Исследование элементного состава (рис. 6, б) показало, что наиболее интенсивные рефлексы кислорода зафиксированы в поверхностных слоях подслоя. Они синхронны рефлексам хрома, что позволяет предположить образование оксидов хрома при нагреве. На границе раздела «покрытие – основа» рефлексов кис-

лорода не обнаружено (рис. 6, б), что говорит об отсутствии оксидных слоев, способствующих отслоению покрытия. Рентгеноструктурный анализ подслоя, проведенный после испытаний жаростойкости, показал, что при изотермической выдержке (при 1123 К в течение 500 часов) происходит фазовое превращение $\beta \rightarrow \gamma'$. После испытаний основной фазой в подслое уже является γ' -Ni₃Al (табл. 1), а количество β -NiAl-фазы уменьшается.

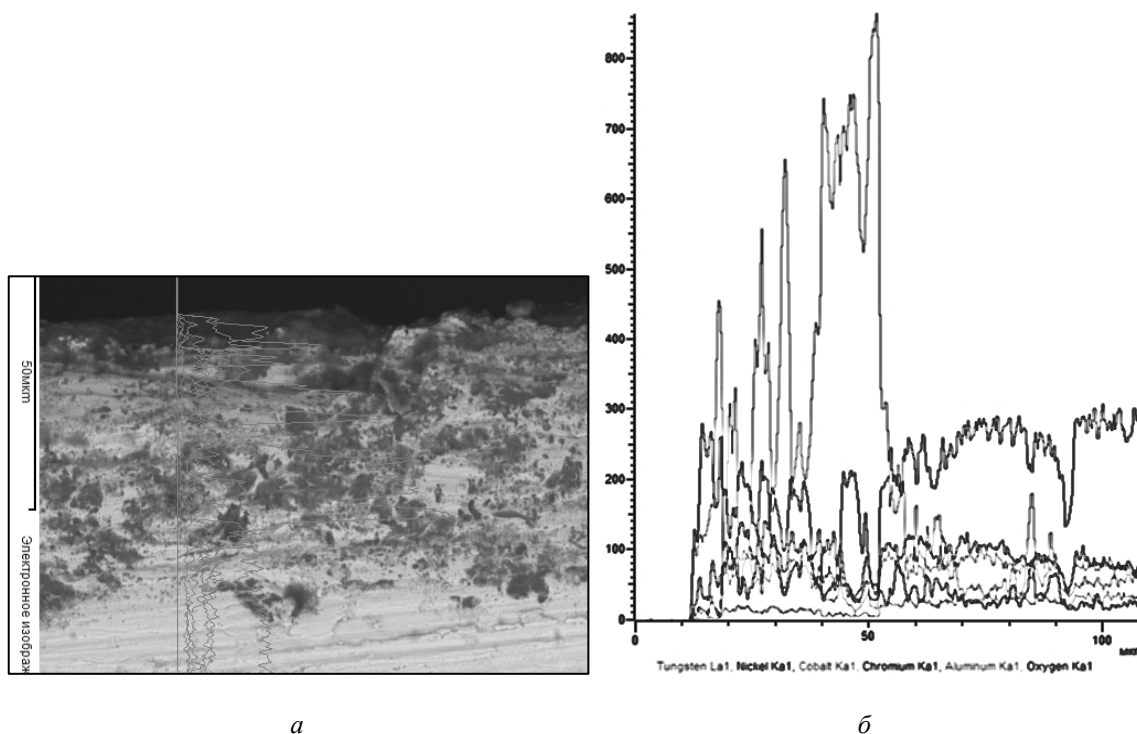


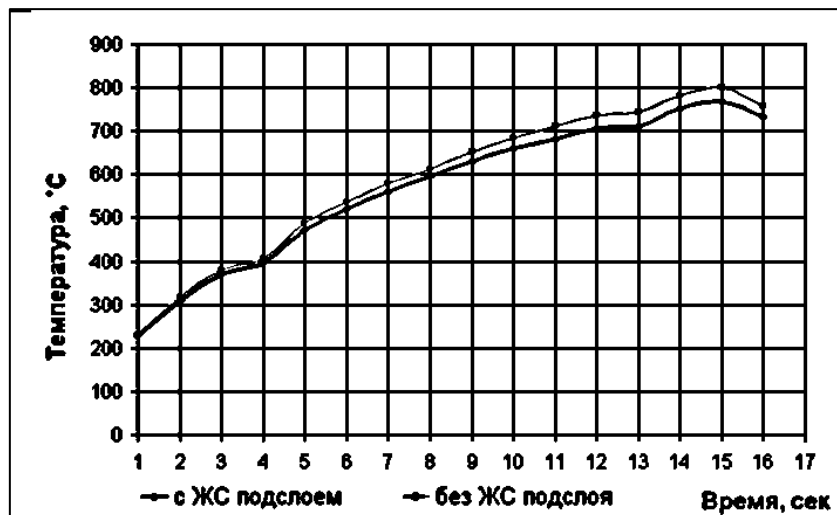
Рис. 6. Микроструктура (а) и распределение элементного состава по толщине (б) интерметаллидного подслоя после испытаний жаростойкости

Известно, что исчерпание защитных свойств жаростойкого покрытия при высоких температурах происходит по цепочке: $\beta \rightarrow \beta + \gamma' \rightarrow \gamma' + \gamma - \text{Ni} \rightarrow \gamma - \text{твёрдый раствор Ni+оксиды}$ [5]. Поэтому увеличение количества γ' -фазы в покрытии при эксплуатации должно постепенно приводить к сокращению его ресурса. Однако до тех пор, пока в составе покрытия будет сохраняться интерметаллидная γ' -фаза, покрытие будет выполнять свои защитные функции.

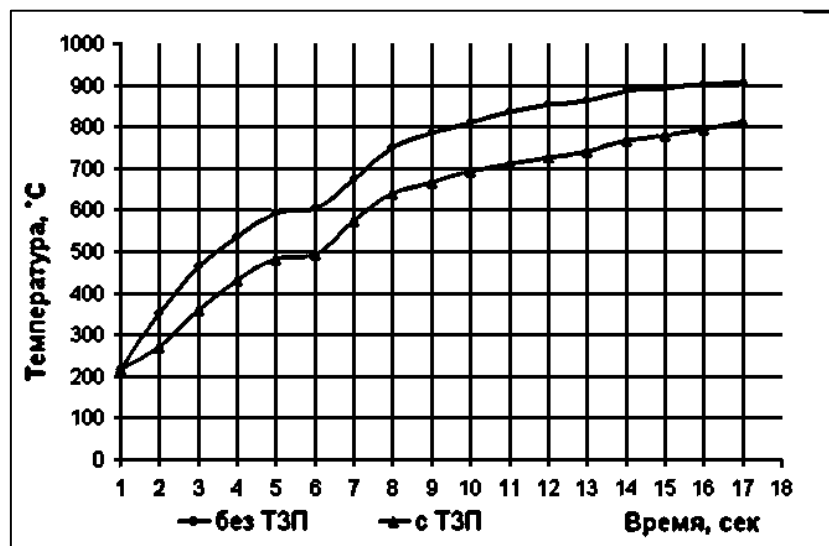
Дериватографические исследования показали, что фазовый переход в интерметаллидном подслое начинается при температуре 1113 К (рис. 2, б). Активный распад интерметаллидных фаз происходит при температуре 1585 К, на следующей стадии будет активно происходить окисление Ni-твёрдого раствора. Испытания эффективности теплозащиты показали

(рис. 7, а), что разработанный жаростойкий подслоя может стабильно защищать от высокотемпературного окисления рабочую поверхность лопаток из жаропрочных никелевых сплавов тех ступеней турбины, которые работают при температурах до 1073 К. Испытания эффективности теплозащиты стенки турбинной лопатки из сплава ЖС6Ф посредством теплозащитного покрытия ZrO_2 с подслоем «Ni-Co-Cr-Al-Y» показали снижение температуры металла на 398 К (рис. 7, б).

Таким образом, исследованное в данной работе интерметаллидное покрытие можно использовать как в качестве подслоя двухслойного теплозащитного покрытия «Ni-Co-Cr-Al-Y + ZrO_2 », так и в качестве самостоятельного жаростойкого покрытия менее теплонагруженных ступеней турбины газотурбинных двигателей (с температурой эксплуатации до 1073 К).



а



б

Рис. 7. Результаты оценки эффективности тепловой защиты жаропрочного никелевого сплава ЖС6Ф с помощью жаростойкого подслоя (а) и теплозащитного покрытия ZrO_2 , сформированного на жаростойком подслое (б)

Разработанное плазменное жаростойкое покрытие системы «Ni-Co-Cr-Al-Y» апробировано в качестве подслоя теплозащитного покрытия диоксида циркония для продления срока службы рабочих лопаток турбины авиационного газотурбинного двигателя. Работа выполнена при финансовой поддержке СГАУ и ОАО «КУЗНЕЦОВ» (г. Самара).

Заключение

Исследования полученного методом плазменного напыления с применением плазмотрона ПНК-50 жаростойкого под-

слоя системы «Ni-Co-Cr-Al-Y» с интерметаллидным фазовым составом ($\beta+\gamma'$) и сфероидальной микроструктурой зерен показали возможность его использования в виде подслоя теплозащитного покрытия диоксида циркония, а также в качестве самостоятельного жаростойкого покрытия для защиты от высокотемпературной газовой коррозии и повышения ресурса турбинных лопаток газотурбинных двигателей разного назначения (при температурах эксплуатации до 1073 К).

Библиографический список

1. Балдаев Л.Х. Реновация и упрочнение деталей машин методами газотермического напыления. М.: КХТ, 2004. 134 с.
2. Тарасенко Ю.П., Бердник О.Б., Царёва И.Н., Фель Я.А. Повышение надёжности и ресурса турбинных лопаток газоперекачивающих агрегатов // Сборник трудов XX юбилейной конференции «Проблемы машиноведения». М.: ИМАШ РАН, 2008. С. 528-531.
3. Тарасенко Ю.П., Царёва И.Н., Фель Я.А., Бердник О.Б. Лопатка турбины газотурбинного двигателя с жаростойким покрытием: патент РФ на полезную модель № 88389; опубл. 06.07.2009.
4. Жуков М.Ф., Аньшаков А.С., Засыпкин И.М. Электродуговые генераторы с межэлектродными вставками. Новосибирск: Наука, 1981. 219 с.
5. Колобов Ю.Р., Каблов Е.Н., Козлов Э.В. и др. Структура и свойства интерметаллидных материалов с нанофазным упрочнением. М.: МИСиС, 2008. 328 с.

Информация об авторах

Тарасенко Юрий Павлович, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт проблем машиностроения Российской академии наук. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Область научных интересов: трибология, физика плазмы, плазменные покрытия, упрочняющие и восстановительные технологии, физическое материаловедение.

Царёва Ирина Николаевна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем машиностроения Российской академии наук. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Область научных интересов: трибология, физика плазмы, плазменные покрытия, упрочняющие и восстановительные технологии, физическое материаловедение.

Бердник Ольга Борисовна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем машиностроения Российской академии наук.

E-mail: npktribonika@yandex.ru. Область научных интересов: трибология, физика плазмы, плазменные покрытия, упрочняющие и восстановительные технологии, физическое материаловедение.

Фель Яков Абрамович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем машиностроения Российской академии наук. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Область научных интересов: трибология, физика плазмы, плазменные покрытия, упрочняющие и восстановительные технологии, физическое материаловедение.

Кривина Людмила Александровна, научный сотрудник, Институт проблем машиностроения Российской академии наук. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Область научных интересов: трибология, физика плазмы, плазменные покрытия, упрочняющие и восстановительные технологии, физическое материаловедение.

RESEARCH OF A HEAT-RESISTANT INTERMETALLIC UNDERLAYER FOR THE HEAT-SHIELDING COATING OF GAS TURBINE ENGINE TURBINE BLADES

© 2014 Yu. P. Tarasenko, I. N. Tsareva, O. B. Berdник,
Ya. A. Fel, L. A. Krivina

Institute of Mechanical Engineering Problems
of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation

The paper presents the results of research of the structure as well as physical and mechanical properties of a heat-resistant intermetallic coating of a “Ni-Co-Cr-Al-Y” system produced by the method of high-energy plasma powder spraying and used as a substrate in forming a heat-shielding zirconium dioxide coating. A coating is produced with an intermetallic phase composition (β -NiAl+ γ' -Ni₃Al) and spheroidal grain microstructure. The density of the coating is $\rho=8200 \text{ kg/m}^3$, the microhardness is $H_{\mu}=7,85 \text{ GPa}$ and the roughness is 5mkm. According to the results of testing the heat shielding of the wall of a turbine blade made of the ЖС6Ф alloy with the help of a heat-shielding ZrO₂ coating with a “Ni-Co-CR-Al-Y” substrate the metal temperature reduction amounted to 398 K. The coating is intended for the protection of the working surface of various-application gas turbine engine turbine blades against high-temperature gas corrosion in the form of a substrate for the heat-shielding zirconium dioxide coating, and also as an independent heat-shielding coating. The plasma heat-shielding coating for the “Ni-Co-CR-Al-Y” system has been tested as a substrate for a heat-shielding coating of zirconium dioxide with a view to extending the service life of turbine blades (made of a heat-resistant ЖС6Ф alloy) of the NK series gas turbine engine turbines.

High-energy plasma spraying, intermetallic phases, spheroidal grains, porosity, microhardness, heat resistance, turbine blades.

References

1. Baldayev L.Kh. Renovatsiya i uprochnenie detaley mashin metodami gazotermicheskogo napyleniya [Renovation and strengthening of machine parts using methods of gas-thermal spraying]. Moscow: KKhT Publ., 2004. 134 p.
2. Tarasenko Yu.P., Berdnik O.B., Tsareva I.N., Fel Ya.A. Increasing reliability and resource of turbine blades of gas-pumping units // Sbornik trudov XX yubileyной konferentsii «Problemy mashinovedeniya». Moscow: IMASH RAN, 2008. P. 528-531. (In Russ.)
3. Tarasenko Yu.P., Tsareva I.N., Fel Ya.A., Berdnik O.B. Lopatka turbiny gazoturbinnogo dvigatelya s zharostoykim pokrytiem [A gas turbine engine turbine blade with heat-resistant coating]. Patent RF, No. 88389, 2009 (Publ. 06.07.2009).
4. Bugs M. F., Anshakov A.S., Zasy-pkin I.M. Elektrodugovye generatory s mezhelektrodnymi vstavkami [Arc generators with interelectrode inserts]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1981. 219 p.
5. Kolobov Yu.R., Kablov E.N., Kozlov E.V. et. all. Struktura i svoystva intermetallidnykh materialov s nanofaznym uprochneniem [Structure and properties of intermetallic materials with nanophase strengthening]. Moscow: MISiS Publ., 2008. 327 p.

About the authors

Tarasenko Yury Pavlovich, Candidate of Science (Physics and Mathematics), Head of laboratory, Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Sciences. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Area of Research: tribology, physics of plasma, plasma coatings, strengthening and recovery technologies, material physics.

Tsareva Irina Nikolaevna, Candidate of Science (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Sciences. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Area of Research: tribology, physics of

plasma, plasma coatings, strengthening and recovery technologies, material physics.

Berdnik Olga Borisovna, Candidate of Science (Engineering), Senior Researcher, Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Sciences. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Area of Research: tribology, physics of plasma, plasma coatings, strengthening and recovery technologies, material physics.

Fel Yakov Abramovich, Candidate of Science (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Sciences. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Area of Research: tribology, physics of

plasma, plasma coatings, strengthening and recovery technologies, material physics.

Krivina Lyudmila Aleksandrovna, research associate, Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Acad-

emy of Sciences. E-mail: npktribonika@yandex.ru. Area of Research: tribology, physics of plasma, plasma coatings, strengthening and recovery technologies, material physics.

УДК 519.876.5+621.5+621.22

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ОПИСАНИЮ ПОЛОСТЕЙ С РАБОЧЕЙ СРЕДОЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРО- И ПНЕВМОСИСТЕМ

© 2014 Ю. М. Тимофеев, Е. М. Халатов

КБ «Арматура» – филиал ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», г. Ковров, Россия

Статья посвящена рассмотрению способов математического описания процессов в междроссельных камерах и ёмкостях с рабочей средой, которое используется при моделировании работы гидро- и пневмосистем.

Рассмотрен общий подход к разработке математических моделей гидро- и пневмосистем, а также приведены этапы составления моделей.

Представлена обобщённая математическая модель теплоизолированной полости переменного объёма. Приведён вывод общепринятых математических моделей указанной полости на основе обобщённой модели. Проанализированы допущения, принимаемые при существующих способах описания процессов в камерах и ёмкостях гидро- и пневмосистем. Показаны недостатки существующих способов описания.

Предложен подход к формированию математического описания, имеющего универсальный характер и более полно отражающего исследуемые процессы. Предлагаемый способ описания базируется на законах сохранения термодинамики тела переменной массы. Специальная запись термического и калорического уравнений в модели состояния делают её универсальной, не зависящей от вида рабочей среды. При составлении цифровых моделей полостей могут использоваться как различные уравнения состояния рабочих сред, так и табличные справочные данные.

В качестве примера представлены расчётные схемы и математические модели теплоизолированных полостей переменного и постоянного объёмов. Представлена цифровая модель и приведены результаты моделирования работы гидро- и пневмопривода, проведённого с использованием предлагаемого способа. Цифровая модель реализована в отечественном программном комплексе «Моделирование в технических устройствах».

Междроссельная камера, ёмкость, моделирование, математическая модель, гидросистема, пневмосистема.

Гидравлические и пневматические системы находят широкое применение в ракетно-космической, авиационной и в других областях техники. К подобным системам можно отнести системы газоснабжения ракетно-космических комплексов, гидро- и пневмосистемы ракет-носителей и самолётов.

При проектировании и отработке гидро- и пневмосистем в большинстве случаев применяется численный эксперимент на основе математической цифровой модели. Разработка математических моделей как гидро-, так и пневмосистем ведётся на основе единого подхода, суть которого можно отразить с помощью блок-схемы, представленной на рис. 1.

На первом этапе после анализа принципа действия системы проводится операция декомпозиции, заключающаяся в условном разбиении системы на взаимо-

связанные подсистемы различной физической природы. Среди указанных подсистем присутствуют:

- механическая, к которой относятся процессы движения рабочих органов системы и связанных с ними деталей;
- тепловая, к которой относятся процессы теплопередачи между рабочей средой, деталями системы и окружающей средой;
- гидродинамическая, к которой относятся процессы течения рабочих сред через каналы системы;
- электромагнитная, к которой относятся процессы преобразования электрической энергии в магнитную;
- гидравлическая или термодинамическая, к которой относятся процессы изменения параметров рабочих сред в междроссельных камерах или ёмкостях.

На втором этапе проводится формализация процессов, происходящих в каждой из подсистем. На заключительном этапе проводится композиция разработанных моделей подсистем с учётом их взаимосвязей. Результатом является математическая модель системы.

Остановимся более подробно на подсистеме, которая обозначена на рис. 1 как «Гидравлическая или термодинамическая». Двойное название подсистемы обусловлено тем, что в литературе оно обычно зависит от вида рабочей среды. Если рабочей средой является жидкость, то подсистема называется гидравлической, а если газ – термодинамической. Междроссельные камеры и ёмкости, процессы в которых описывает рассматриваемая подсистема, будем называть единым термином «полость», под которым будем понимать объём с рабочей средой, для которого характерны следующие особенности: объём образован и ограничен поверхностями деталей системы; объём полностью заполнен рабочей средой; скорость движения рабочей среды в объёме мала по сравнению со скоростью течения в подводящих и отводящих каналах; в каждой точке объёма термические и калорические параметры рабочей среды можно считать одинаковыми.

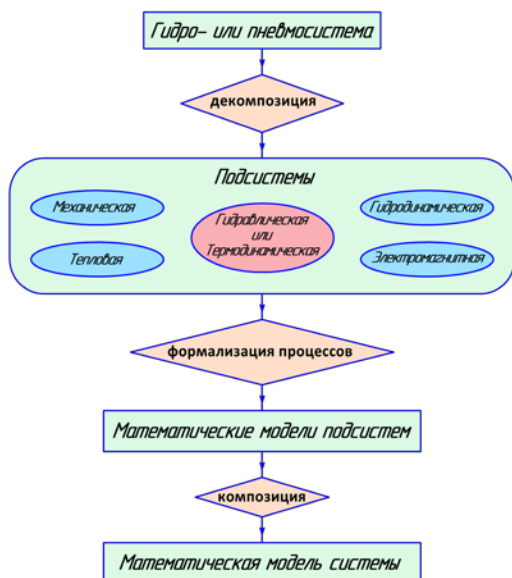


Рис. 1. Принцип построения математической модели гидро- или пневмосистемы

К полостям можно отнести: рабочие полости объёмных гидро- и пневмомашин (например, насосов, моторов, компрессоров); междроссельные камеры регулирующих и распределительных устройств (например, редукторов давления, регуляторов расхода, золотниковых распределителей, клапанов); рабочие полости гидро- и пневмоцилиндров; рабочие полости гидравлических и пневматических аккумуляторов; внутренние полости газовых баллонов.

Рассмотрим способы описания полостей с рабочей средой. В качестве примера возьмём рабочую полость гидро- или пневмопривода одностороннего действия, расчётная схема которого приведена на рис. 2. Для упрощения будем считать, что полость теплоизолирована и не обменивается теплотой с ограничивающими стенками. Управление приводом осуществляется путём изменения давления рабочей среды в полости. Рабочая среда поступает в полость через регулируемый дроссель с массовым расходом $G_{вх}$ от источника с постоянными параметрами. Из полости рабочая среда через нерегулируемый дроссель уходит в дренаж с массовым расходом $G_{вых}$. Полость связана с одной механической подсистемой, представляющей собой поршень с рабочей площадью S , нагруженный позиционной (пружинной) и инерционной нагрузками. Состояние рабочей среды в полости полностью характеризуется тремя параметрами – абсолютным давлением p , термодинамической температурой T и объёмом полости W . Остальные параметры являются их функциями.

Согласно основам термодинамики тела переменной массы [1] для рабочей среды в рассматриваемой полости можно записать следующую систему дифференциально-алгебраических уравнений:

$$\frac{dU}{dt} = h_{ист} \cdot G_{вх} - h \cdot G_{вых} - p \cdot S \cdot V, \quad (1)$$

$$\frac{dM}{dt} = G_{вх} - G_{вых}, \quad (2)$$

$$\Phi_1(p, T, u) = 0, \tag{3}$$

$$\Phi_2(p, T, \rho) = 0, \tag{4}$$

где U, M – внутренняя энергия и масса рабочей среды в полости; t – время; $h_{ист}$, h – удельная энтальпия рабочей среды в источнике и рабочей полости; $G_{вх}$, $G_{вых}$ – массовый расход рабочей среды из источника в рабочую полость и из рабочей полости в дренаж соответственно; p – абсолютное давление рабочей среды в полости; S – эффективная площадь поршня; V – скорость поршня; T – термодинамическая температура рабочей среды в полости; u – удельная внутренняя энергия ра-

бочей среды в полости; ρ – плотность рабочей среды в полости; Φ_1, Φ_2 – функции.

Уравнения (1) и (2) отражают соответственно законы сохранения энергии и массы рабочей среды в полости. Уравнения (3), (4) являются соответственно калорическим и термическим уравнениями состояния.

Система уравнений (1) – (4) является обобщённой моделью рассматриваемой полости вне зависимости от вида рабочей среды. В настоящее время на практике стремятся провести преобразование системы уравнений таким образом, чтобы получить замкнутую систему из двух дифференциальных уравнений, записанных для какой-либо пары термических параметров ($p, T; p, \rho; p, T$).

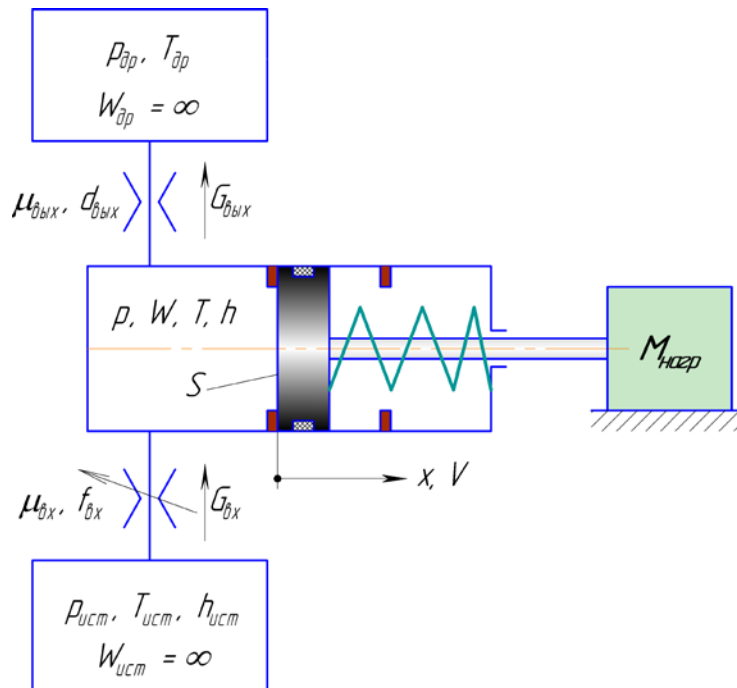


Рис. 2. Расчётная схема привода одностороннего действия:

$p_{ист}, p_{др}, p$ – абсолютное давление рабочей среды в источнике, в дренажной и рабочей полостях соответственно; $T_{ист}, T_{др}, T$ – термодинамическая температура рабочей среды в источнике, в дренажной и рабочей полостях соответственно; $h_{ист}, h$ – удельная энтальпия рабочей среды в источнике и рабочей полости; $W_{ист}, W_{др}, W$ – объём, занимаемый рабочей средой в источнике, в дренажной и рабочей полостях соответственно; $G_{вх}, G_{вых}$ – массовый расход рабочей среды из источника в рабочую полость и из рабочей полости в дренаж соответственно; $\mu_{вх}, f_{вх}$ – коэффициент расхода и площадь проходного сечения регулируемого дросселя; $\mu_{вых}, d_{вых}$ – коэффициент расхода и диаметр проходного сечения нерегулируемого дросселя; S – эффективная площадь поршня; x, V – перемещение и скорость поршня; $M_{инер}$ – масса, характеризующая инерционную нагрузку

Для полости с жидкостью преобразование проводится на основе только двух уравнений – закона сохранения массы (2) и термического уравнения состояния (4), записанного в виде связи давления и плотности через модуль объёмной упругости [2, 3]. Модуль объёмной упругости при этом является функцией давления, температуры и вида процесса. Преобразование проводится в следующей последовательности:

– записывается дифференциальное уравнение для массы как функции объёма полости и плотности, а затем обе части уравнения делятся на приращение времени

$$dM/dt = \rho \cdot dW/dt + W \cdot d\rho/dt ; \quad (5)$$

– записывается уравнение состояния в форме

$$d\rho = \frac{\rho}{E} \cdot dp , \quad (6)$$

где E – модуль объёмной упругости;

– записывается зависимость, связывающая мгновенное изменение объёма с параметрами связанной механической подсистемы

$$dW/dt = S \cdot V ; \quad (7)$$

– зависимости (6), (7) подставляются в (5)

$$dM/dt = \rho \cdot S \cdot V + \rho \cdot \frac{W}{E} \cdot dp/dt ; \quad (8)$$

– приравниваются правые части уравнений (2) и (8), производится деление на плотность (которая в качестве допущения считается одинаковой как в источнике, так и в рабочей полости) и выводится дифференциальное уравнение для давления

$$dp/dt = \frac{E}{W} \cdot (Q_{\text{вх}} - Q_{\text{вых}} - S \cdot V), \quad (9)$$

где $Q_{\text{вх}}$, $Q_{\text{вых}}$ – объёмный расход рабочей среды из источника в рабочую полость и из рабочей полости в дренаж соответственно.

Полученное указанным способом уравнение (9) является математической моделью полости с жидкостью.

Для полости с газом преобразование исходной системы уравнений проводится на основе выбранного термического уравнения состояния. При этом калорическое уравнение состояния выводится на основе термического. Преобразование проводится в следующей последовательности (рассмотрен случай идеального газа):

– записывается уравнение внутренней энергии как функции объёма полости и пары термических параметров, для которых требуется вывести дифференциальные уравнения (в данном случае выбраны давление и плотность)

$$U = u \cdot M = u \cdot \rho \cdot W = \frac{p}{\rho} \cdot \frac{1}{k-1} \cdot \rho \cdot W = \frac{p \cdot W}{k-1}, \quad (10)$$

где k – показатель адиабаты;

– полученное уравнение внутренней энергии переписывается в дифференциальной форме

$$dU = \frac{\partial U}{\partial \rho} \cdot d\rho + \frac{\partial U}{\partial p} \cdot dp + \frac{\partial U}{\partial W} \cdot dW = \frac{W}{k-1} \cdot d\rho + \frac{p}{k-1} \cdot dW ; \quad (11)$$

– правая часть уравнения (11) подставляется в уравнение закона сохранения энергии (1); полученное выражение преобразуется и записывается относительно изменения давления во времени

$$dp/dt = \frac{k-1}{W} \cdot \left[h_{\text{вх}} \cdot G_{\text{вх}} - h \cdot G_{\text{вых}} - \frac{k}{k-1} \cdot p \cdot S \cdot V \right]; \quad (12)$$

– записывается уравнение массы как функции объёма полости и плотности в дифференциальной форме

$$dM = \frac{\partial M}{\partial W} \cdot dW + \frac{\partial M}{\partial \rho} \cdot d\rho = \rho \cdot dW + W \cdot d\rho; \quad (13)$$

– правая часть уравнения (13) подставляется в уравнение закона сохранения массы (2); полученное выражение преобразуется и записывается относительно изменения плотности во времени

$$d\rho/dt = \frac{1}{W} \cdot (G_{\text{вх}} - G_{\text{вых}} - \rho \cdot S \cdot V). \quad (14)$$

Полученная указанным способом система уравнений (12), (14) является математической моделью полости с газом.

Рассмотренные способы математического описания полостей имеют следующие недостатки.

Для гидравлических систем отказ от уравнения сохранения энергии приводит к тому, что становится невозможным учитывать теплообменные процессы, а температуру рабочей среды приходится задавать и считать постоянной в процессе работы системы. Это может привести, например, к некорректному определению расхода рабочей среды через каналы ввиду фактического температурного изменения свойств рабочей среды. Кроме того, невозможность учёта теплообменных процессов и изменения температуры совместно с принятым способом учёта сжимаемости жидкости (через модуль упругости по выражению (6)) позволяет корректно рассчитывать только изотермические процессы в полости. Корректный расчёт адиабатных процессов требует учёта изменения температуры для правильного определения модуля упругости. Для других видов процессов в полости расчёт невозможен ввиду отсутствия в литературе данных о значениях модуля упругости для этих процессов.

Для пневматических систем существующий способ предполагает жёсткую привязку к принятому термическому уравнению состояния, каждое из которых справедливо только в определённом диапазоне давления и температуры. Немало-

важным является и тот факт, что провести требуемое преобразование исходной системы уравнений удаётся только для ограниченного ряда термических уравнений состояния, т.к. наиболее точные из них являются достаточно сложными.

Существующие способы описания полостей с рабочей средой как для гидро-, так и для пневмосистем были разработаны много лет назад и формировались с учётом уровня развития методов расчёта и возможностей вычислительной техники. Современный уровень развития методов расчёта, вычислительной техники и программного обеспечения позволяет не проводить сложных преобразований исходной системы уравнений и отказаться от допущений, ограничивающих область применения существующего подхода к анализу переходных процессов в гидро- и пневмосистемах.

Для описания полостей с рабочей средой предлагается использовать исходную систему уравнений, в которой калорическое и термическое уравнения состояния записываются в следующем виде:

$$u_{\text{расч}} - u(p, T) = 0, \quad (15)$$

$$\rho_{\text{расч}} - \rho(p, T) = 0. \quad (16)$$

Каждое из уравнений состояния (15), (16) записано как разность двух членов. Первый из них представляет собой расчётное значение удельной внутренней энергии $u_{\text{расч}}$ или плотности $\rho_{\text{расч}}$, полученное при решении системы дифференциальных уравнений (1),(2). Второй член представляет собой зависимость, связывающую удельную внутреннюю энергию или плотность с абсолютным давлением и термодинамической температурой. Указанные зависимости могут быть заданы как аналитически, так и таблично, что позволяет использовать при расчёте как различные уравнения состояния, так и табличные справочные данные.

В соответствии с принятым способом разработан ряд математических и цифровых моделей для некоторых типов

полостей. Это полость переменного объёма с теплоизоляцией и без неё, полость постоянного объёма с теплоизоляцией и без неё, полость бесконечного объёма.

На рис. 3 приведена расчётная схема теплоизолированной полости переменного объёма.

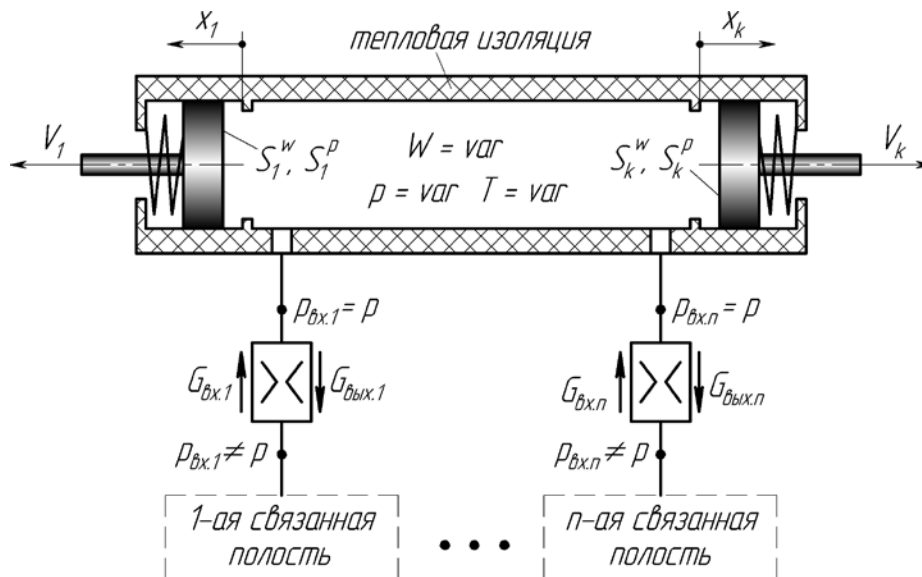


Рис. 3. Расчётная схема теплоизолированной полости переменного объёма

Её математическая модель имеет вид:

$$\frac{dU}{dt} = \Delta H_{\text{вх}} - \frac{U + p \cdot (W_0 + \Delta W)}{M} \cdot G_{\Sigma \text{вых}} - \Delta L, \quad (17)$$

$$\frac{dM}{dt} = G_{\Sigma \text{вх}} - G_{\Sigma \text{вых}}, \quad (18)$$

$$u - f_1(p, T) = 0, \quad (19)$$

$$\rho - f_2(p, T) = 0, \quad (20)$$

$$\Delta H_{\text{вх}} = \sum_n (G_{\text{вх},i} \cdot h_i), \quad \Delta W = \sum_k (S_j^w \cdot x_j),$$

$$\Delta L = p \cdot \sum_k (S_j^p \cdot V_j), \quad G_{\Sigma \text{вх}} = \sum_n G_{\text{вх},i},$$

$$G_{\Sigma \text{вых}} = \sum_n G_{\text{вых},i}, \quad u = U/M,$$

$$\rho = M/(W_0 + \Delta W), \quad h = u + p/\rho,$$

$$G_{\text{вх},i} = \begin{cases} |G_i|, & \text{если } p \neq p_{\text{вх},i} \\ 0, & \text{если } p = p_{\text{вх},i} \end{cases},$$

$$G_{\text{вых},i} = \begin{cases} |G_i|, & \text{если } p = p_{\text{вх},i} \\ 0, & \text{если } p \neq p_{\text{вх},i} \end{cases}.$$

Здесь U – внутренняя энергия рабочей среды в полости; t – время; $\Delta H_{\text{вх}}$ – мгновенный суммарный приход энергии в полость; p – абсолютное давление рабочей среды в полости; W_0 – объём полости при нулевых перемещениях связанных с ней механических подсистем; ΔW – приращение объёма полости, обусловленное перемещением связанных механических подсистем; M – масса рабочей среды в полости; $G_{\Sigma \text{вых}}$ – мгновенный суммарный отток массы рабочей среды из полости; ΔL – мгновенное суммарное приращение работы рабочей среды по перемещению связанных механических подсистем; $G_{\Sigma \text{вх}}$ – мгновенный суммарный приток массы рабочей среды в полость; u – удельная внутренняя энергия рабочей среды в полости; ρ – плотность рабочей среды в полости; f_1 – функция, определяющая зависимость удельной внутренней энергии рабочей среды от его абсолютного давления и термодинамической температуры; f_2 – функция, определяющая зависимость плотности рабочей среды от его абсолютного давления и термодинамической температуры; T – термодинамическая темпе-

ратура рабочей среды в полости; S_j^w – площадь, определяющая изменение объёма полости при перемещении j -й ($j = 1, \dots, k$) связанной механической подсистемы; x_j – перемещение j -й связанной механической системы; S_j^p – площадь, определяющая силовое воздействие рабочей среды в полости на j -ю связанную механическую подсистему; V_j – скорость перемещения j -й механической подсистемы; $G_{вх.i}$ – мгновенный приток массы рабочей среды в полость из i -й связанной полости ($i = 1 \dots n$); h_i – удельная энтальпия рабочей среды в i -й связанной полости; $G_{вых.i}$ – мгновенный отток массы рабочей среды из полости в i -ю связанную полость; h – удельная энтальпия рабочей среды в полости; G_i – массовый расход рабочей среды через канал между рассматриваемой и i -й связанной полостями; $p_{вх.i}$ – абсолютное давление рабочей среды

на входе в канал между рассматриваемой и i -ой связанной полостями (вход канала определяется направлением течения рабочей среды через него).

Уравнения (17) – (20) являются основными, а остальные уравнения – вспомогательными.

На рис. 4 приведена расчётная схема теплоизолированной полости постоянного объёма. В целом математическая модель полости данного типа аналогична математической модели (система (17) – (20) и вспомогательные уравнения) теплоизолированной полости переменного объёма. Однако из правой части уравнения (17) исключается член ΔL , а из второго члена правой части этого же уравнения исключается параметр ΔW . Кроме того, исключаются вспомогательные уравнения для расчёта ΔL и ΔW .

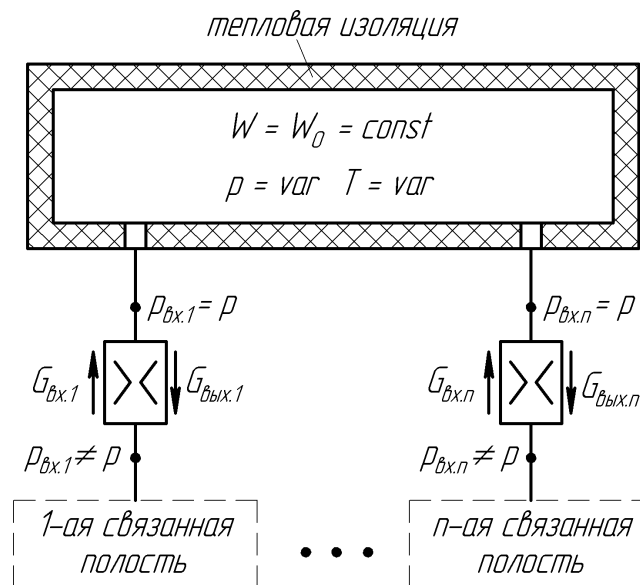


Рис. 4. Расчётная схема теплоизолированной полости постоянного объёма

Процессы в полостях переменного и постоянного объёма без теплоизоляции также описываются системой уравнений (17) – (20) и вспомогательными зависимостями (с учётом указанных выше особенностей), однако в правую часть уравнения (17) добавляется (со знаком «минус») дополнительный член, который представляет собой тепловой поток, передающийся

от рабочей среды к стенкам, ограничивающим полость.

Начальные условия для дифференциальных уравнений (17), (20) удобнее рассчитывать, чем задавать, т.к. обычно известны только начальные значения абсолютного давления и температуры рабочей среды в полости. Для расчёта начальных условий используются выражения:

$$M_n = \begin{cases} W_0 \cdot f_2(p_n, T_n), & \text{для полости постоянного объёма} \\ (W_0 + \Delta W_n) \cdot f_2(p_n, T_n), & \text{для полости переменного объёма} \end{cases}$$

$$U_n = f_1(p_n, T_n) \cdot M_n,$$

где U_n – начальная внутренняя энергия рабочей среды в полости; M_n – начальная масса рабочей среды в полости; p_n , T_n – начальное абсолютное давление и температура рабочей среды в полости; ΔW_n – приращение объёма полости, обусловленное начальным перемещением связанных механических систем.

На рис. 5 приведена расчётная схема полости бесконечного объёма, математическая модель которой состоит из уравнений (19), (20) и вспомогательного уравнения для расчёта удельной энтальпии h рабочей среды в полости. Данная модель предназначена для описания атмосферы, гидравлических баков, дренажных полостей и других объектов, в которых параметры рабочей среды можно считать постоянными во времени.

В качестве проверки работоспособности предлагаемого способа описания полостей при расчётах переходных процессов в гидро- и пневмосистемах была разработана цифровая модель и смоделирована работа привода, представленного на рис. 2, по перемещению инерционной нагрузки.

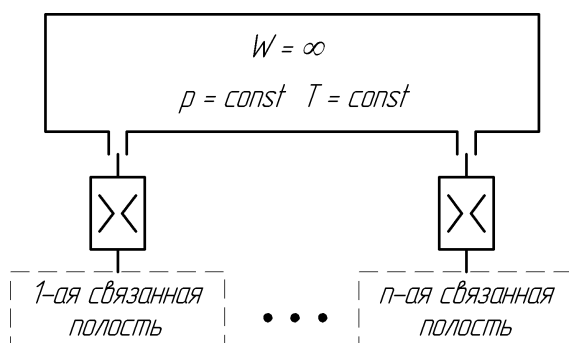


Рис. 5. Расчётная схема полости бесконечного объёма

В связи с тем, что рассматривался отвлеченный привод с неопределёнными геометрическими характеристиками и физическими свойствами деталей корпуса, то в качестве допущения было принято, что полость с рабочей средой теплоизолирована.

Цифровая модель привода, представленная на рис. 6, 7, была реализована в учебной версии отечественного программного комплекса «Моделирование в технических устройствах» (ПК «МВТУ»). Модель состоит из взаимосвязанных блоков: блок «Механика» отражает процессы в механической подсистеме, блоки «Полость» – процессы в гидравлической или термодинамической подсистеме, а блоки «Дроссель» – процессы в гидродинамической подсистеме.

В качестве расчётных вариантов рабочих сред были рассмотрены: газ, подчиняющийся уравнению состояния Редлиха–Квонга; газ, свойства которого описываются табличными зависимостями из стандартных справочных данных; вода; масло АМГ-10.

На рис. 8–10 приведены результаты моделирования в виде графиков переходных процессов в механической, гидравлической/термодинамической и гидродинамической подсистемах.

Таким образом, предлагаемый способ описания полостей с рабочей средой позволяет анализировать процессы в гидро- и пневмосистемах с использованием универсального математического описания, более полно отражающего исследуемые процессы.

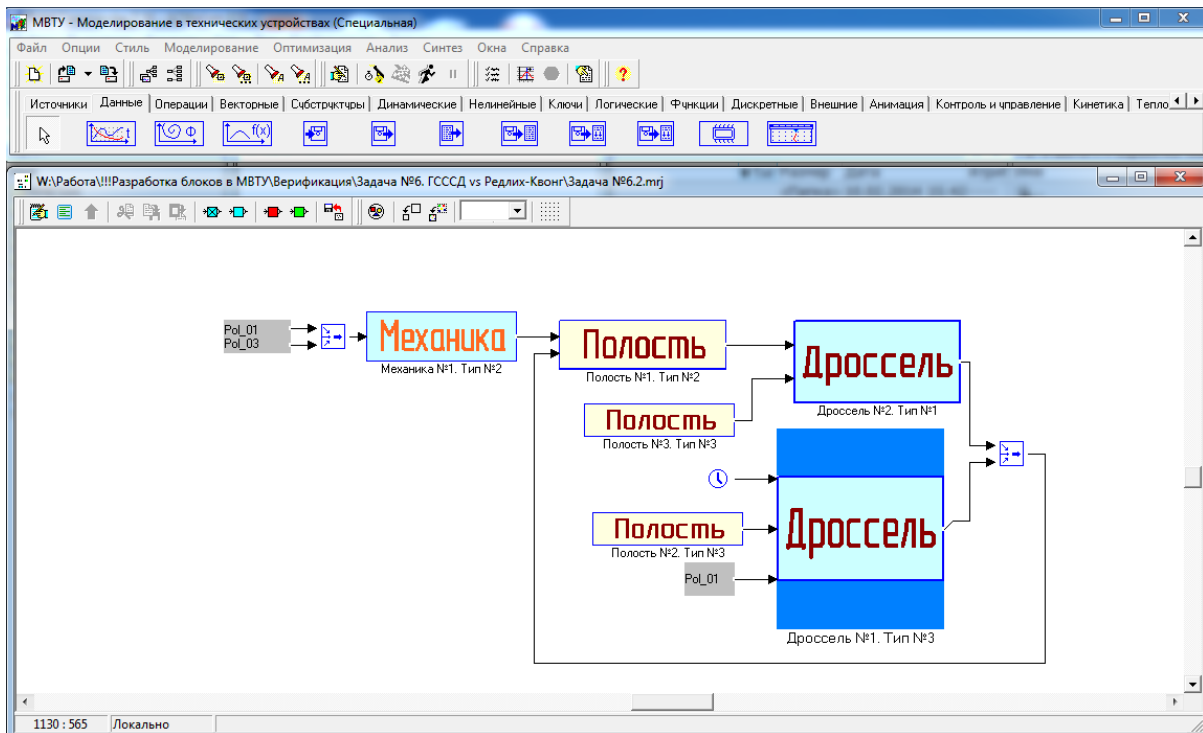
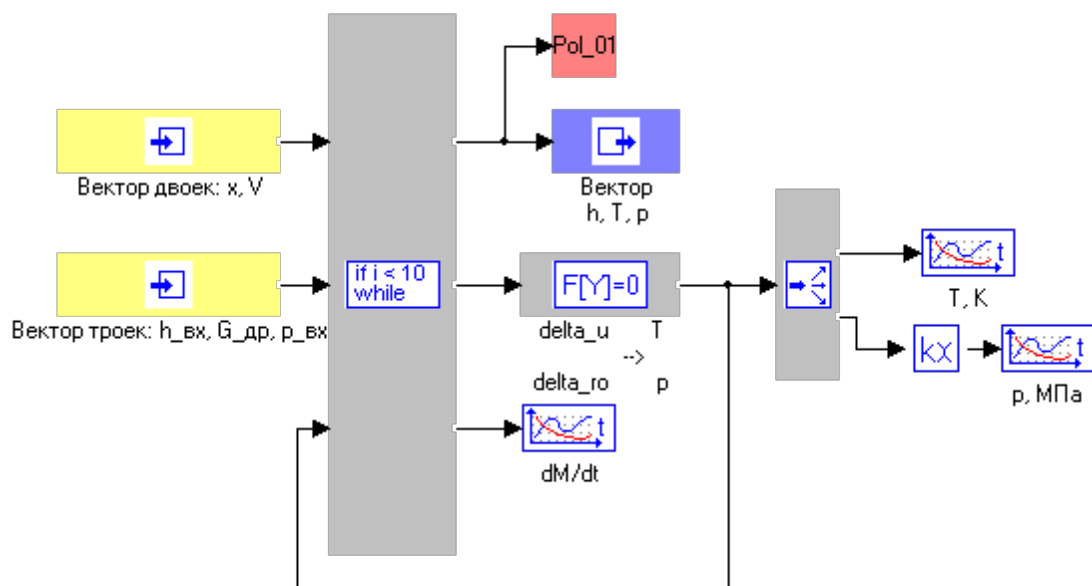


Рис. 6. Цифровая модель привода, реализованная в ПК «МВТУ»



a

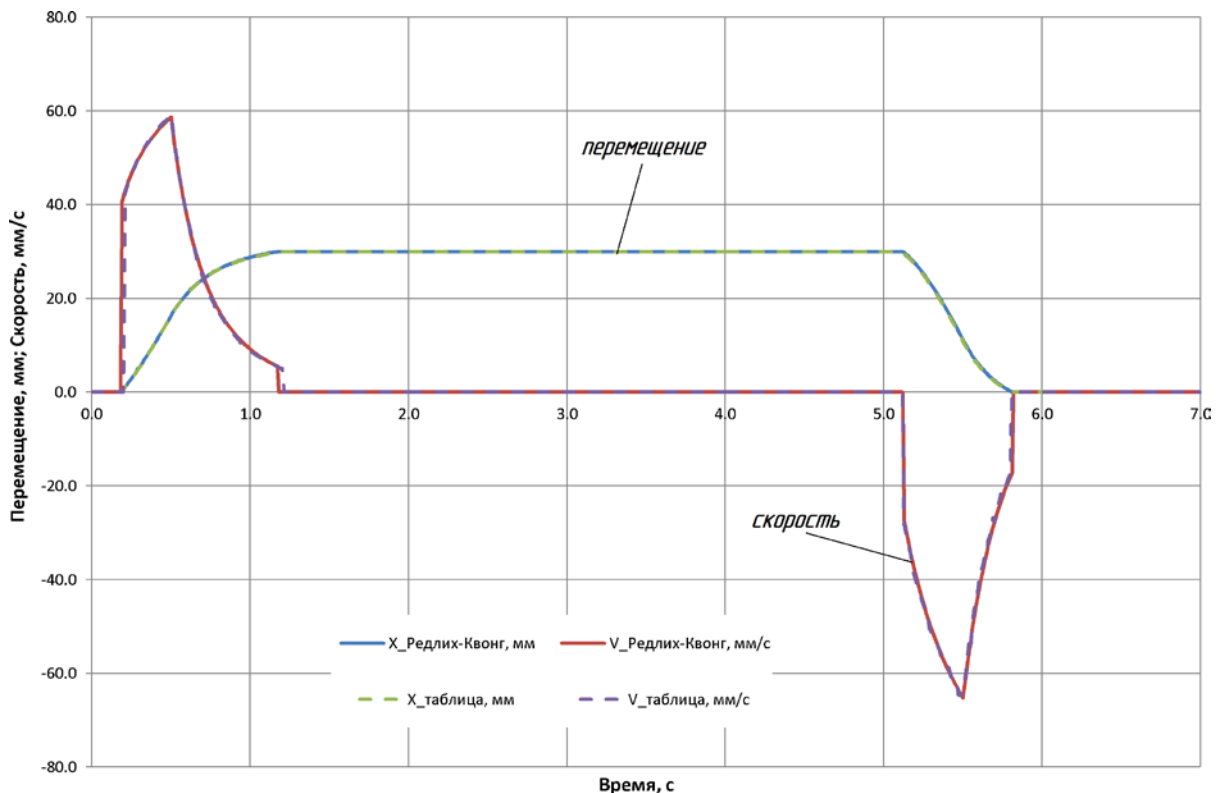
```

Язык программирования
1 | Видеть блок «Полость с газом»
2 | (Полость имеет два входа и один выход.
3 | Таблицами с описаниями среды (температура)
4 | (Вход:
5 | 1. Вектор  $V_{x,1}$ , содержащий двойки значений переменной  $x$  и скорости  $V$ , м/с
6 | механической системы
7 | 2. Вектор  $V_{x,2}$ , содержащий тройки значений угловой скорости
8 | приращенно/уменьшенно газа  $\Delta$ , массового прихода/расхода газа  $G$ , кг/с,
9 | давление на входе и выходе  $P_{вх}$ , Па.
10 | В случае, если газ течет из рассматриваемой полости, то давление  $p_{вх}$  равно
11 | давлению в полости.
12 | Если газ течет в рассматриваемую полость, то давление  $p_{вх}$  равно давлению в
13 | полости, из которой происходит истечение.
14 | 3. Вектор  $V_{x,3}$ , содержащий значения температуры  $T$ ,  $P$  и давления  $p$ , Па газа
15 | в полости
16 | (Выход:
17 | 1. Вектор  $V_{ex,1}$ , содержащий значения плотности уходящей энергии, Дж/кг,
18 | температуры  $T$ ,  $P$  и абсолютного давления  $p$ , Па газа в полости
19 | 2. Вектор  $V_{ex,2}$ , содержащий значения удельной внутренней энергии  $del_{in}$ , Дж/кг
20 | и энергии  $del_{out}$ , кг/м3с, необходимых для итерационного расчета
21 | температуры и давления газа в полости
22 | 3. Изменение массы газа в полости  $dM(t)$ , кг)
23 | (Выход:  $V_{x,1}$  и  $V_{x,2}$ ,  $V_{x,3}$ )
24 | (Объявление динамических переменных и задание их начальных значений.)
25 | Начальные значения рассчитываются в окне «Язык программирования макроблока»
26 |  $del_{in} = 0$ ;  $del_{out} = 0$ 
27 | (Расчет начального вектора)
28 |  $T = T_{x,1}$ 
29 |  $P = P_{x,1}$ 
30 | (Расчет суммарного расхода массы газа из полости  $G_{max}$ , кг/с)
31 |  $G_{max} = 0$ ; // Введение начального значения постоянного расхода газа из полости
32 | // необходимо для обеспечения устойчивости расчета точек или
33 | // перекрытия полости
34 | for (i=1, cols(Bx_1)/3) begin
35 | if (abs(Bx_2[i*3]-p)/p < 0.0005) then  $G_{max} = G_{max} + abs(Bx_2[i*3]-1)$ ;
36 | end;
37 | (Расчет суммарного мгновенного прихода массы  $G_{in}$ , кг/с и энергии  $dE_{in}$ , Вт
38 | газа в полость)
39 |  $dE_{in} = 0$ ;
40 |  $G_{in} = 0$ ;
41 | for (i=1, cols(Bx_2)/3) begin
42 | if (abs(Bx_2[i*3]-p)/p < 0.0005) then begin
43 |  $dE_{in} = dE_{in} + Bx_2[i*3-2] * abs(Bx_2[i*3]-1)$  //Продукт энергии (затрачено)
44 |  $G_{in} = G_{in} + abs(Bx_2[i*3]-1)$  end
45 | end;
46 | (Изменение массы)
47 |  $dM = G_{in} - G_{max}$ 
48 | (Расчет суммарного мгновенного изменения работы газа над механической
49 | системой  $dE$ , Вт)
50 |  $dE = 0$ 
51 | for (i=1, cols(Bx_1)/2) begin
52 |  $dE = dE + p_{вх}[i] * Bx_1[i*2]$ 
53 | end;
54 |  $dE_{out} = dE$ 

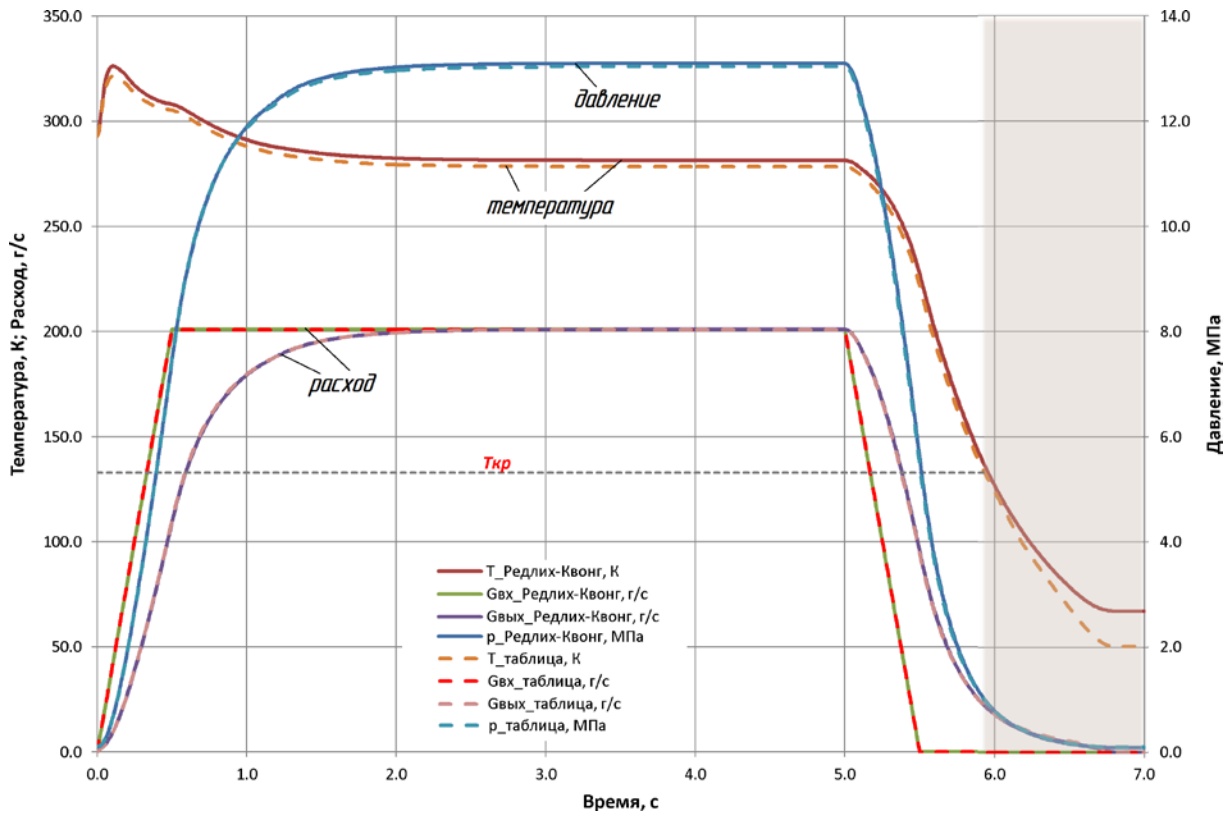
```

б

Рис. 7. Цифровая модель рабочей полости привода, реализованная в ПК «МВТУ»: а – блок-схема; б – текст блока «Язык программирования»

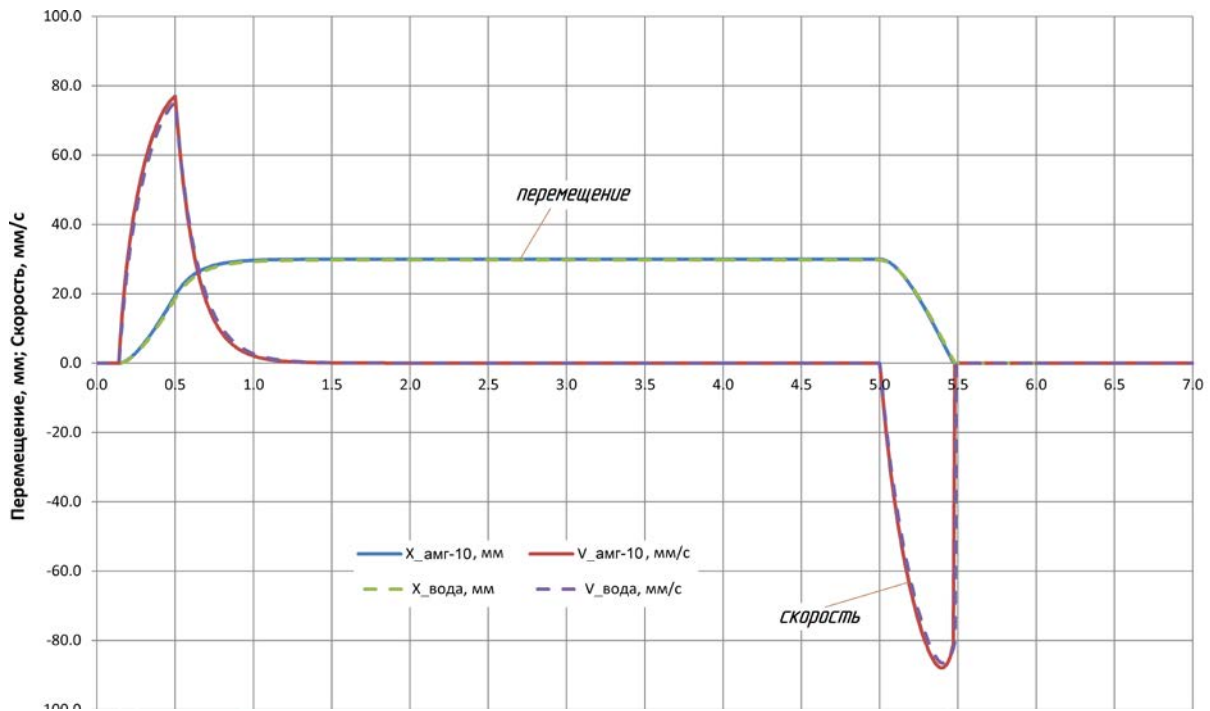


а

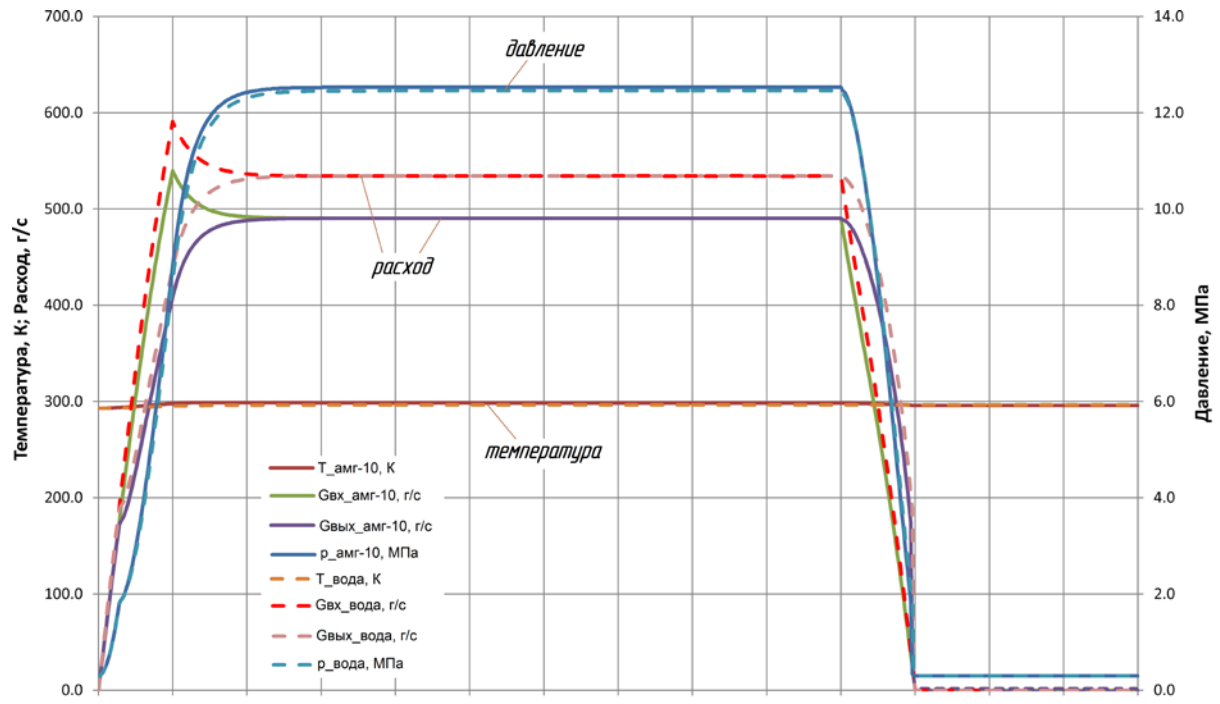


б

Рис. 8. Переходный процесс в механической (а) и термодинамической (б) подсистемах пневмопривода



а



б

Рис. 9. Переходный процесс в механической (а) и гидравлической (б) подсистемах гидропривода

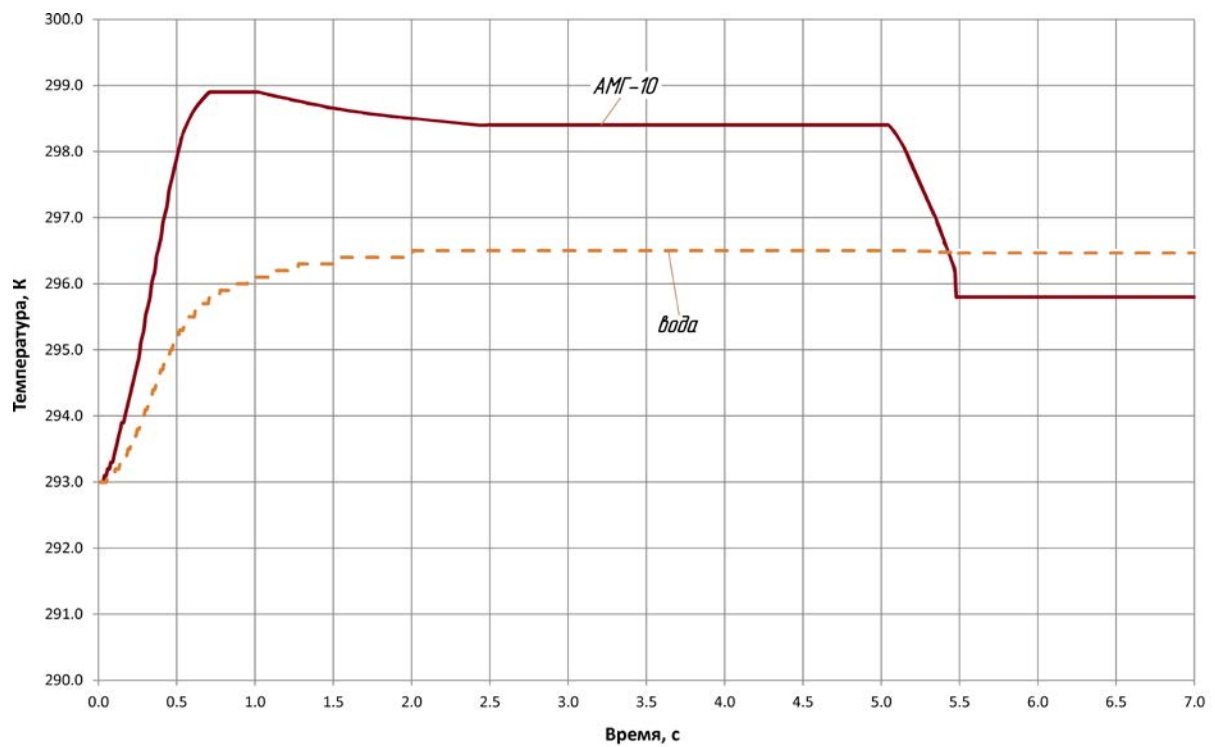


Рис.10. Переходный процесс в гидравлической подсистеме гидропривода

Библиографический список

1. Мамонтов М.А. Основы термодинамики тела переменной массы. Тула: Приокское книжное издательство, 1970. 87 с.
2. Гамынин Н.С. Гидравлический привод систем управления. М.: Машиностроение, 1972. 376 с.
3. Попов Д.Н. Нестационарные гидромеханические процессы. М.: Машиностроение, 1982. 240 с.

Информация об авторах

Тимофеев Юрий Михайлович, инженер первой категории Расчетно-аналитического центра, КБ «Арматура» – филиал ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», г. Ковров. E-mail: timasp@inbox.ru. Область научных интересов: проектирование и расчёт пневмосистем и устройств газавтоматики ракетно-космических комплексов, гидро- и пневмосистем летательных аппаратов.

Халатов Евгений Михайлович, доктор технических наук, профессор, начальник Расчетно-аналитического центра, КБ «Арматура» – филиал ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», г. Ковров. E-mail: kba@kc.ru. Область научных интересов: проектирование и расчёт пневмосистем и агрегатов ракетно-космических комплексов.

UNIVERSAL APPROACH TO THE DESCRIPTION OF WORKING MEDIUM CHAMBERS FOR SIMULATING HYDRAULIC AND PNEUMATIC SYSTEMS

© 2014 Yu. M. Timofeyev, E. M. Khalatov

Design Bureau “Armatura” – branch of Khrunichiev Space Center,
Kovrov, Russian Federation

The article is concerned with the consideration of methods of mathematical formulation of processes in interthrottle chambers and working medium reservoirs used to simulate the operation of hydraulic and pneumatic systems.

Consideration has been given to a general approach to the development of mathematical models of hydraulic and pneumatic systems; the stages of constructing models are also presented.

A generalized mathematical model of a heat-insulated chamber with variable volume is presented. The derivation of standard mathematical modules of the above chamber on the basis of the generalized model is given. The assumptions taken into consideration with the existing methods of describing the processes taking place in chambers and reservoirs of hydraulic and pneumatic systems are analyzed. The shortcomings of the existing methods are shown.

An approach to forming a mathematical formulation is proposed, which is universal in its nature and reflects the processes under consideration in full measure. The proposed description method is based on the laws of conservation of thermodynamics of a variable-mass body. A special record of thermal and caloric equations of the state model makes it universal and independent of the working medium type. When compiling the digital models of chambers, both equations of working medium state and tabulated reference data can be used.

Design diagrams and mathematical models of heat-insulated chambers with variable and constant volumes are presented as an example. A digital model is presented and the results of modeling the operation of hydraulic and pneumatic actuators performed with the use of the proposed method are given. The digital model is implemented in the training version of the Russian software package “Simulation in technical devices”.

Interthrottle chamber, capacity, simulation, mathematical model, hydraulic system, pneumatic system.

References

1. Mamontov M.A. Osnovy termodinamiki tela peremennoy massy [Principles of thermodynamics of a variable-mass body]. Tula: Priokskoye Publ., 1970. 87 p.
2. Gamynin N.S. Gidravlichesky privod sistem upravleniya [Hydraulic drive of control systems]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1972. 376 p.
3. Popov D.N. Nestatsionarnye gidromekhanicheskiye protsessy [Unsteady-state hydromechanical processes]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1982. 240 p.

About the authors

Timofeyev Yury Michailovich, 1 category engineer, Design and Analytic Center, Design Bureau “Armaturo” – branch of Khrunichev Space Center, Kovrov. E-mail: timasp@inbox.ru. Area of Research: design and calculation of pneumatic systems and gas automatic equipment for space-rocket complexes, aircraft hydraulic and pneumatic systems.

Khalatov Evgeny Mikhailovich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of Design and Analytic Center, Design Bureau “Armaturo” – branch of Khrunichev Space Center, Kovrov. E-mail: kba@kc.ru. Area of Research: design and calculation of pneumatic systems and units of space-rocket complexes.

УДК 539.219.1+620.22

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОСАЖДЕНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ПРОДУКТОВ

© 2014 С. В. Цаплин, С. А. Большев

Самарский государственный университет

Работа посвящена исследованию конструкционных неметаллических материалов, применяемых при создании космических аппаратов, на газовыделение и потерю массы при термовакуумном воздействии, а также исследованию динамики осаждения продуктов газовой выделенной на оптические поверхности оптической аппаратуры. Для проведения исследований разработан стенд по изучению динамики осаждения конденсированных продуктов на основе кварцевых микровесов. В соответствии с ГОСТ Р 50109-92 проведены испытания на потерю массы и газовой выделение ряда конструкционных неметаллических материалов, используемых в составе космического аппарата: стеклотекстолит, стеклотекстолитовая панель, пенополиуретан, ленты, ткани, клеи и др. Определено влияние осаждения конденсированных продуктов газовой выделенной от этих материалов на коэффициент пропускания оптического элемента. Дано заключение о возможности использования данных материалов в составе космического аппарата.

Кварц, микровесы, газовой выделение, осаждение, летучие конденсированные вещества.

Введение

При создании оптической спец аппаратуры космического аппарата, предназначенной для дистанционного зондирования Земли и работающей в мультиспектральном, панхроматическом или гиперспектральном режимах, выбор неметаллических конструкционных материалов следует осуществлять в соответствии с требованиями к газовой выделению материалов: общая потеря массы материала не более 1,0 %; содержание летучих конденсирующихся веществ (ЛКВ) не более 0,1 % при вакуумно-тепловом воздействии [1, 2]. Поэтому уже на этапах проектирования космического аппарата проводятся исследования конструкционных неметаллических материалов на газовой выделение, потерю массы и динамику конденсации продуктов газовой выделенной [3].

Существующая методика ускоренных испытаний [1, 2] позволяет определить потерю массы и ЛКВ исследуемого материала путём взвешивания конденсационной пластины на аналитических весах. Недостатком этой методики является то, что аналитические весы серии ВЛ, Precisa Ep, Precisa ES позволяют измерять массу с точностью 0,001 г, а весы серии ВМ – 1 мкг и, кроме того, отсутствует

возможность исследовать динамику роста массы и толщины конденсированной плёнки. Такие недостатки отсутствуют у кварцевых микровесов, в основе работы которых используется явление обратного пьезоэффекта кварцевой пластины [3 – 7]. Суть этого явления заключается в следующем: при осаждении вещества на поверхности кварцевой пластины происходит изменение резонансной частоты пластины, на основании которого рассчитывается масса конденсированных продуктов вещества с помощью уравнения Сауэрбрея [8]

$$\Delta m = - \frac{\Delta f (\rho_k \mu_k)^{\frac{1}{2}}}{2 f_0^2}, \quad (1)$$

где Δf – изменение резонансной частоты; f_0 – резонансная частота пьезокристалла; ρ_k – плотность кварца; μ_k – модуль упругости кварца. Поскольку площадь S адсорбции конденсированных продуктов определяется геометрическими размерами диафрагмы измерительной системы, то можно определить массу и в соответствии с (1) записать [9]

$$\Delta m = - \frac{\Delta f (\rho_k \mu_k)^{\frac{1}{2}}}{2 f_0^2} S, \quad (2)$$

В соответствии с [10] и (2) определим динамику изменения массы конденсированных продуктов следующим образом

$$\Delta m(t) = -\frac{\Delta f (\rho_k \mu_k)^{\frac{1}{2}}}{2f_0^2} S \cdot n(t), \quad (3)$$

где $n(t)$ – степень покрытия поверхности S конденсированными продуктами. Отсюда следует, что масса конденсированных продуктов пропорциональна изменению резонансной частоты. Обычно динамика осаждения конденсированных продуктов измеряется в течение длительного времени (порядка нескольких суток). Поэтому необходимо обеспечить температурную стабилизацию опорного кварца и измерительных кварцевых датчиков, чтобы тепловой дрейф частоты кварцев был минимальным [8, 11, 12]. В связи с этим возникают жесткие требования по стабильности температуры $\pm 1^\circ\text{C}$ и стабильности частоты опорного генератора 10^{-7} Гц. При таких условиях разрешающая способность по массе составляет $1.4 \cdot 10^{-9}$ г. [9].

Исследование осаждения конденсированных продуктов

В лаборатории «Взаимодействие излучения с веществом» Самарского государственного университета создан автоматизированный стенд, позволяющий проводить исследования неметаллических материалов на газовыделение, потерю массы и динамику конденсации продуктов газовой выделенной. Особенностью стенда является то, что в качестве датчиков используются кварцевые пластины с АЕ-срезом, с резонансными частотами от 2 до 8 МГц. Количество осевших на конденсационные пластины летучих конденсируемых веществ контролируется кварцевыми микровесами [9]. Принцип работы кварцевых микровесов [8,11,12] основан на том факте, что кварцевые пластины обладают частотной чувствительностью к изменению массы её электродов. Резонаторы включены в автоколебательную схему, частота колебаний измеряется частотомером Pen-

dulum CNT-66 [9]. Исследования проводятся в вакуумном универсальном poste ВУП-4 с рабочим объёмом 15 литров. Вакуум в рабочем объёме контролируется ионизационно-термопарным вакуумметром ВИТ-2, предназначенным для измерения остаточного давления в диапазоне от 20 до $1 \cdot 10^{-5}$ Па ($2 \cdot 10^{-1} - 10^{-7}$ мм. рт. ст.). Первая ступень откачки осуществляется форвакуумным насосом 2НВР-5Д с азотной ловушкой, вторая ступень — паромасляным насосом Н-0,5. Исследуемые конструкционные материалы помещаются в контейнеры, температура которых поддерживается терморегулятором температуры ТРМ 38-04 с точностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$ в диапазоне от 0 до 250°C . Температура образцов, находящихся в контейнерах, контролируется хромель-копелевой термопарой. Частотомер Pendulum CNT-66 подключён к ЭВМ посредством приборного интерфейса КОП [9, 12], ГОСТ 26003-80 [13]. Управление частотомером, сбор, обработка и хранение результатов измерения осуществляется автоматически программными средствами, что позволяет производить до четырёх замеров частоты (присоединённой массы) в минуту. После проведения исследований динамики осаждения конденсированных продуктов определяется изменение массы образца и конденсационной пластины (кварцевого резонатора). Предельная масса осаждения измеряется с помощью аналитических весов ВЛР-20. Перед исследованием контейнеры с образцами материалов взвешиваются и помещаются в эксикатор с силикагелем для кондиционирования образцов, где выдерживаются двое суток при комнатной температуре.

Автоматизированный стенд позволяет проводить испытания длительностью до 300 часов. Процесс сбора результатов измерений, обработки, контроля температуры, давления, частоты, массы конденсированных продуктов и управление стендом осуществляется с помощью программы в среде LabVIEW (рис. 1). Калибровка датчиков температуры осуществляется в термостате Julabo с точностью

$\pm 0,01^\circ\text{C}$. На рис. 2 изображено устройство исследования динамики конденсированных продуктов, соответствующее ГОСТ Р 50109-92, в рабочем объеме ВУП-4. Устройство состоит из медного блока 1, к геометрическому центру которого прикреплена хромель-копелевая термопара 5, её выводы подключены к терморегулятору через электрические вакуумные вводы. Под медным блоком находится омический нагреватель – галогенная электролампа. В медный блок устанавливаются три изотермических контейнера с образцами. Над контейнерами установлены охлаждаемые держатели 2 пьезорезонансных датчиков массы 4, во внутренние полости охлаждаемых держателей посредством трубок 3 поступает охлаждающая жидкость (дистиллированная вода) из термостата.

В держателях кварцевых резонаторов 4 размещаются измерительные кварцевые резонаторы типа РК374 МД-6НК с резонансными частотами 4000000 Гц, 4194000 Гц, 8000000 Гц, 8388000 Гц. Непосредственно перед началом эксперимента измеряется начальная частота колебаний нового резонатора, затем с него удаляется крышка, и он устанавливается в держатель 4. Во избежание взаимного влияния автогенераторов и помех по цепям питания питание автогенераторов осуществляется от гальванических элементов.

Материалы и геометрические размеры испытательного стенда соответствуют требованиям ОСТ 92-9566-82. Ввиду того, что ОСТ 92-9566-82 требует, чтобы диаметр конденсационной пластины составлял 33 мм, а диаметры кварцевых резонаторов, использованных при испытаниях, составляют от 4,5 до 7,2 мм, то для интерпретации данных кварцевых микровесов необходимо знать зависимость толщины осаждённой плёнки от расстояния до центра стекла. Такие исследования были проведены на микрофотометре МФ-2. При этом снималась зависимость коэффициента поглощения плёнки в зависимости от расстояния до центра стекла. Замеры производились через

0,5 мм с поворотом стекла на 30° после каждого прохода. Нормированный и усреднённый по результатам семи замеров профиль пленки равномерный. Коэффициент поглощения плёнки не меняется.

В результате исследований было установлено: минимальная определяемая масса конденсированных продуктов — $1,4 \cdot 10^{-9}$ г при чувствительности $1 \cdot 10^{-10}$ г/Гц; температура кварцевых резонаторов стабилизировалась ультратермостатом U-10 с точностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$; для расчёта конденсированной массы в соответствии с уравнением Сауэрбрея определялась резонансная частота частотомером Pendulum CNT-66 при доверительной вероятности 2σ (95%) $< 2 \cdot 10^{-7}$ в области температур от 20 до 26°C ; с увеличением массы конденсированных продуктов на пьезорезонансной пластине чувствительность кварца уменьшалась. Была измерена предельная масса конденсированных плёнок. Она составила $3 \cdot 10^{-4}$ г. Увеличение на несколько градусов Цельсия температуры кварцевой пластины приводит к сдвигу частоты от 10 до 100 Гц, что равносильно изменению чувствительности по массе от 10^{-7} до 10^{-8} г/см².

Для устранения изменения чувствительности кварцевой пластины применялась система стабилизации температурного режима с точностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$ с помощью охлаждения проточной водой [5]. Поскольку изменение частоты кварцевой пластины является функцией её температуры [6], то для компенсации температурного ухода частоты измерительного датчика (кварцевой пластины) в рабочем объёме в непосредственной близости помещается эталонный кварц, который защищён от конденсирующихся веществ. При этом измерительный и эталонный кварцы находились в одинаковых температурных условиях, температура которых поддерживалась в течение всего периода измерений конденсированной массы с точностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

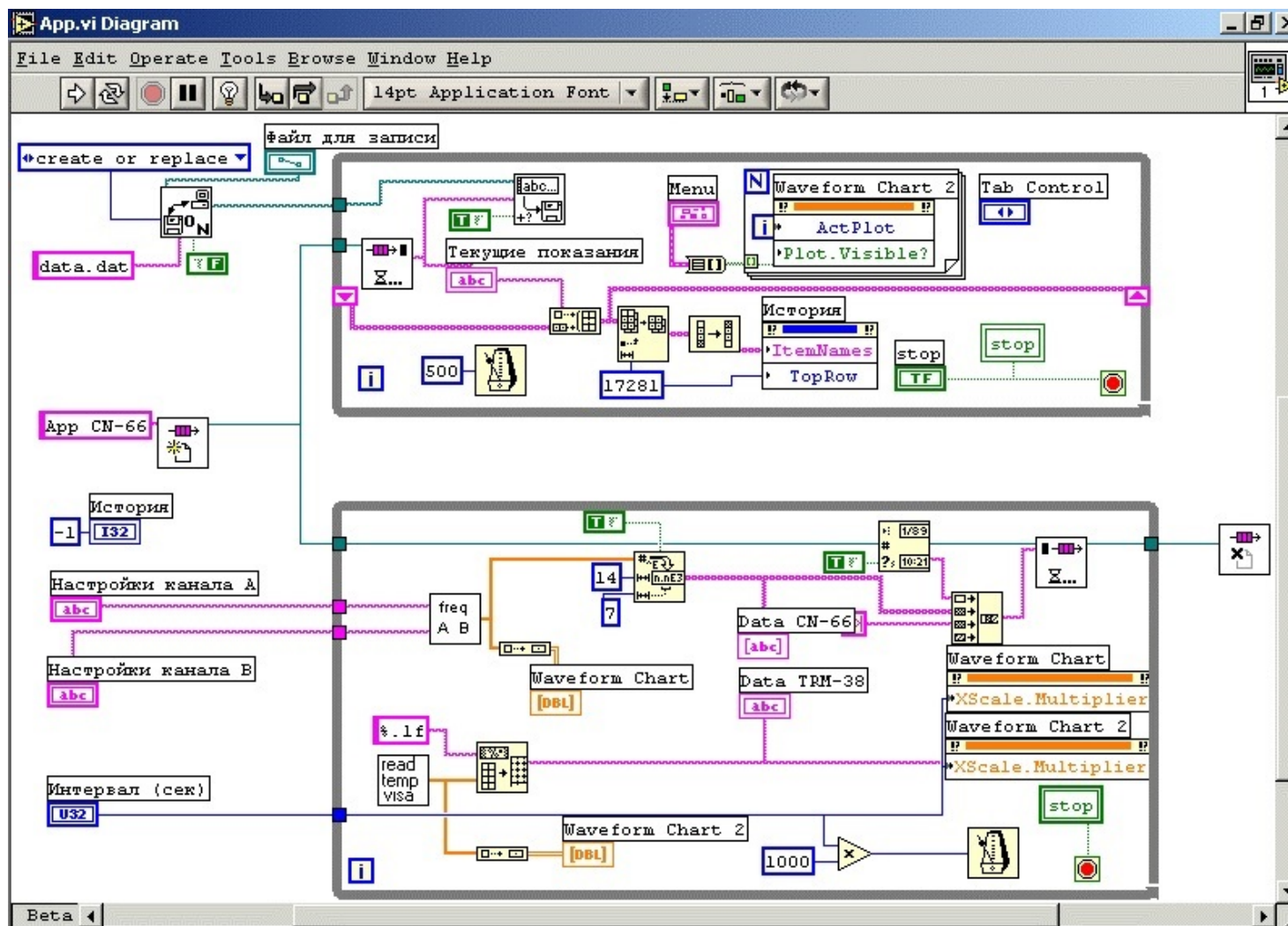


Рис. 1. Программа измерений, обработки и контроля температуры, давления, частоты колебаний, массы конденсированных продуктов



Рис. 2. Устройство исследования динамики конденсированных продуктов:
 1 – блок медный; 2 – охлаждаемые держатели пьезорезонансных датчиков;
 3 – трубки подвода охлаждающей жидкости; 4 – пьезорезонансный датчик массы;
 5 – хромель-копелевая термопара в керамическом изоляторе

Исследования материалов

В соответствии с ГОСТом Р 50109-92 (ОСТ 92-9566-82) были проведены исследования различных материалов:

- нить 3К ОСТ 17-330-84;
- пенополиуретан ППУ-35-0.8 ТУ 6-55-44-90;
- стеклотекстолит АФ10ВП1Ф 624.000.- ОТУ 32;
- стеклопластик АФ10ВО ОСТ 92-0956-74;
- стеклосотовая панель ССП-1Э ТУ6-19-95-78;
- лента склеивающая ЛТ-19 ТУ-17-626-79;
- лента ЛСОН-сотб ТУ5952-001-17547599-94;
- клей 88СА-ТУ38-101760-89;
- ЭВТИ ВВ-30 3539.4641-002;

- ткань ТСОН-СОТ ТУ5952-001-17547599-94;
- ткань ТСОН-ИП-С ТУ5952-001-17547599-94;
- теплозвукоизоляционный материал АТМ-3 ТУ205РСФСР16.751-87;
- ткань плащевая ГОСТ 28486-90;
- лента ЛВ-40 ГОСТ 17617-72;
- смазка ЦИАТИМ-221 ГОСТ 9433-80;
- клей К-300-61.

Результаты исследований стеклотекстолита, стеклосотовой панели на общую потерю массы и содержание ЛКВ приведены в табл. 1–3 и на рис. 3–11. Во всех измерениях температура контейнеров с образцами поддерживалась 125⁰С с точностью ±0,5°С.

Таблица 1. Результаты исследований стеклотекстолита АФ10ВП1Ф 624.000.- ОТУ 32

Контейнер	№4	№5	№6
Масса образца, г	0,48385	0,37175	0,540175
Масса контейнера с образцом до испытания, г	48,749	47,63955	47,3248
Масса контейнера с образцом после испытания, г	48,743	47,6343	47,31905
Потеря массы, г	0,006	0,00525	0,00575
Относительная потеря массы, %	1,24	1,41	1,069
Вакуум, мм. рт. ст.	$<1,5 \cdot 10^{-6}$	$<1,5 \cdot 10^{-6}$	$<1,5 \cdot 10^{-6}$
Температура нагрева образцов, °С	125	125	125
Температура кварцевых резонаторов, °С	25	25	25
Масса ЛКВ, мкг	63,9	55,6	61,4
Продолжительность испытания, мин.	2800	2800	2800
Характер налёта	Слабозаметный глазом	Слабозаметный глазом	Слабозаметный глазом

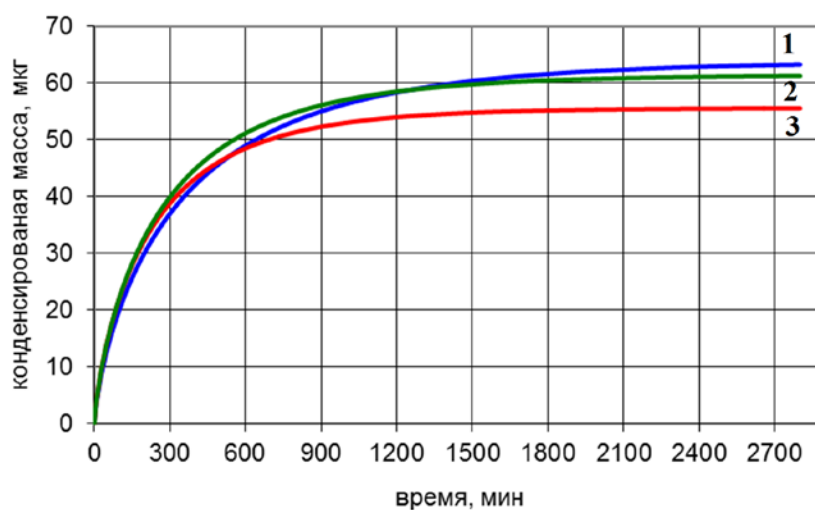


Рис. 3. Динамика осаждения конденсированных продуктов от образца стеклотекстолита АФ10ВП1Ф 624. 000.- ОТУ (1 – образец №1, 2 – образец №2, 3 – образец №3)

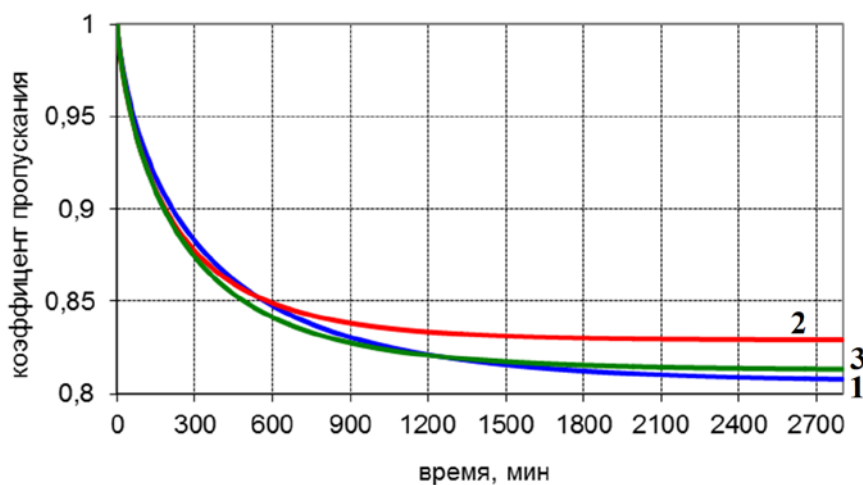


Рис. 4. Зависимость коэффициента пропускания оптического элемента с осаждёнными конденсированными продуктами от образца стеклотекстолита АФ10ВП1Ф 624. 000.- ОТУ 32 во времени на длине волны 500 нм (1 – образец №1, 2 – образец №2, 3 – образец №3)

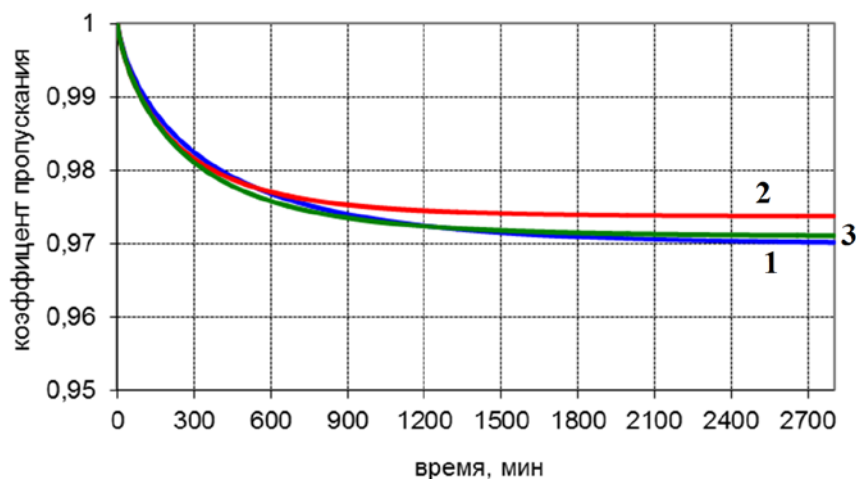


Рис. 5. Зависимость коэффициента пропускания оптического элемента с осажденными конденсированными продуктами от образца стеклотекстолита АФ10ВП1Ф 624. 000.- ОТУ 32 во времени на длине волны 700 нм (1 – образец №1, 2 – образец №2, 3 – образец №3)

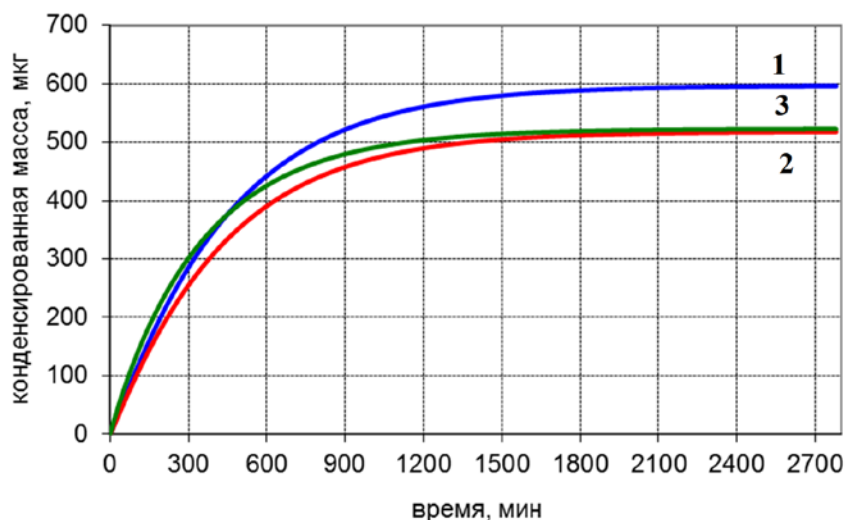


Рис. 6. Динамика осаждения конденсированных продуктов от образца стеклотекстолитовых панелей ССП-1Э Т96-19-95-78 (1 – образец №1, 2 – образец №2, 3 – образец №3)

Таблица 2. Результаты исследований образцов стеклотекстолитовых панелей ССП-1Э Т96-19-95-78

Контейнер	№4	№5	№6
Масса образца, г	0,45825	0,3692	0,4218
Масса контейнера с образцом до испытания, г	48,72245	47,63595	47,2055
Масса контейнера с образцом после испытания, г	48,7194	47,633375	47,2029
Потеря массы, г	0,00305	0,002575	0,0026
Относительная потеря массы, %	0,665	0,697	0,616
Вакуум, мм. рт. ст.	$<1,5 \cdot 10^{-6}$	$<1,5 \cdot 10^{-6}$	$<1,5 \cdot 10^{-6}$
Температура нагрева образцов, °С	125	125	125
Температура кварцевых резонаторов, °С	25	25	25
Масса ЛКВ, мкг	596	518	523
Продолжительность испытания, мин.	2780	2780	2780
Характер налёта	Белёсый	Белёсый	Белёсый

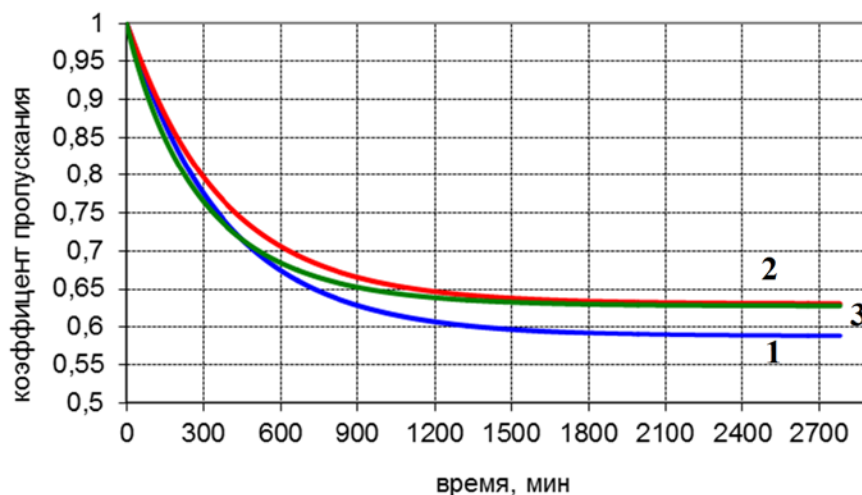


Рис. 7. Зависимость коэффициента пропускания оптического элемента с осаждёнными конденсированными продуктами от образца стеклотовой панели ССП-1Э Т96-19-95-78 во времени на длине волны 500 нм (1 – образец №1, 2 – образец №2, 3 – образец №3)

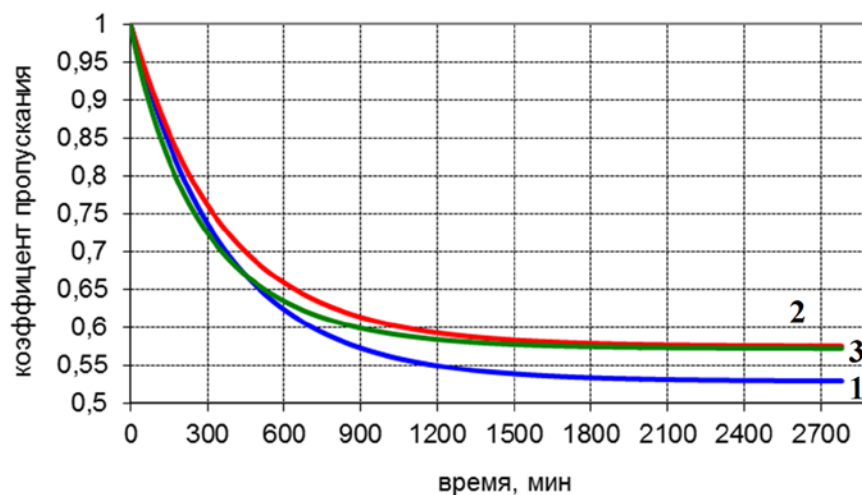


Рис. 8. Зависимость коэффициента пропускания оптического элемента с осаждёнными конденсированными продуктами от образца стеклотовой панели ССП-1Э Т96-19-95-78 во времени на длине волны 700 нм (1 – образец №1, 2 – образец №2, 3 – образец №3)

Таблица 3. Результаты испытаний образцов клея К-300-61

Контейнер	№1	№2
Масса образца, г	0,3241	0,2025
Масса контейнера с образцом до испытания, г	48,3450	46,9057
Масса контейнера с образцом после испытания, г	48,3428	46,9038
Потеря массы, г	0,0022	0,0019
Относительная потеря массы, %	0,672	0,954
Вакуум, мм. рт. ст.	$<1,5 \cdot 10^{-6}$	$<1,5 \cdot 10^{-6}$
Температура нагрева образцов, °С	125	125
Температура кварцевых резонаторов, °С	25	25
Масса ЛКВ, мкг	34,89	31,74
Продолжительность испытания, мин.	2600	2600
Характер налёта	Незаметный глазом	Незаметный глазом

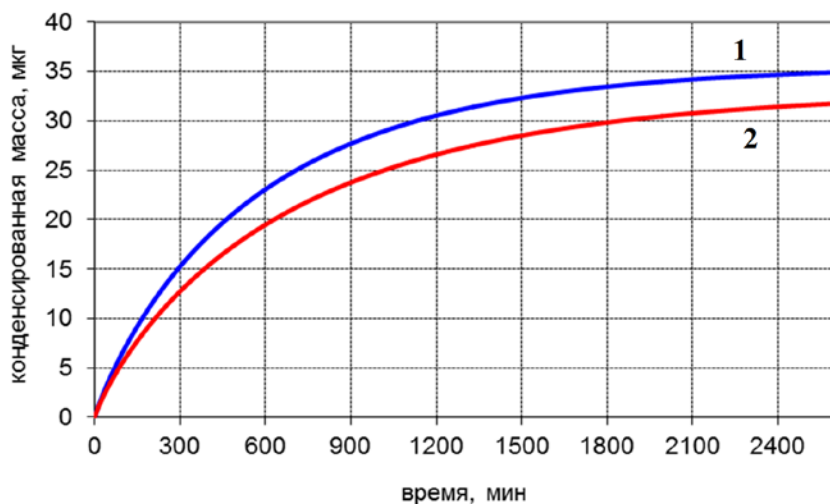


Рис. 9. Динамика конденсированных продуктов от образца клея К-300-61 (1 – образец №1, 2 – образец №2)

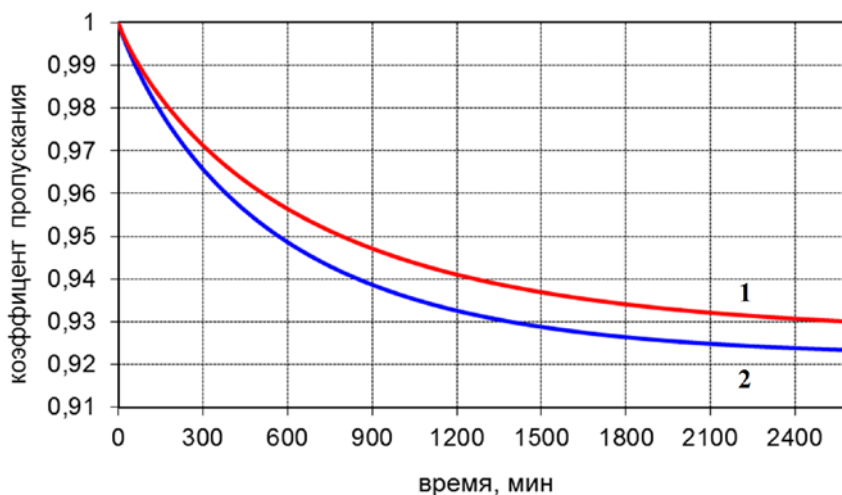


Рис. 10. Зависимость коэффициента пропускания оптического элемента с осажждёнными конденсированными продуктами от образца клея К-300-61 во времени на длине волны 500 нм (1 – образец №1, 2 – образец №2)

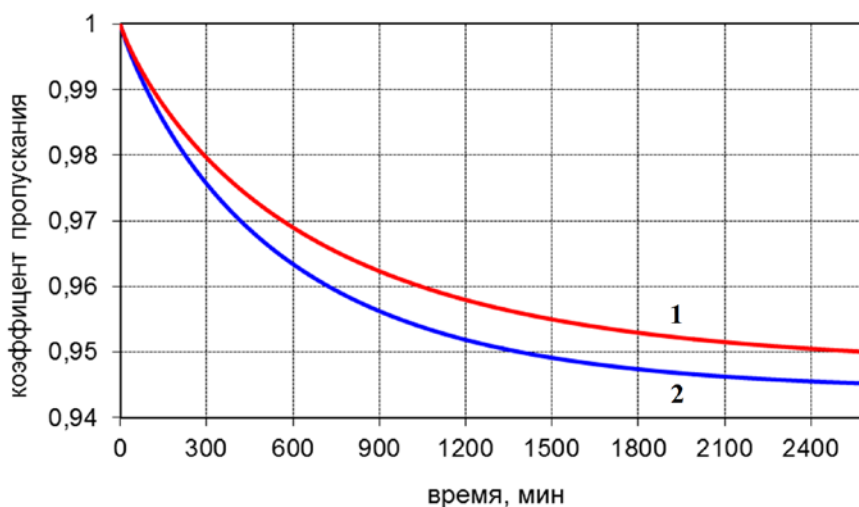


Рис. 11. Зависимость коэффициента пропускания оптического элемента с осажждёнными конденсированными продуктами от образца клея К-300-61 во времени на длине волны 700 нм (1 – образец №1, 2 – образец №2)

Заключение

На основании проведённых испытаний материалов на потерю массы и содержание ЛКВ при термовакуумном воздействии можно сделать следующие выводы.

1. Образцы материалов – стеклотекстолит АФ10 ВП1Ф 624. 000.- ОТУ 32, клей К-300-61 при испытании длительностью 100 часов дают общую потерю массы более 1 %, летучих конденсированных веществ — не более 0,07 %. Эти материалы не могут быть использованы в составе телескопа космического аппарата (КА), поскольку не соответствуют требованиям ГОСТ Р 50109-92 (ОСТ 92-9566-82). Коэффициент пропускания в диапазоне от 500 нм до 700 нм у конденсированных продуктов материала стеклотекстолита изменяется от 0,827 до 0,974, у клея К-300-61 – от 0,93 до 0,95 соответственно.

2. Для образцов стеклосотовой панели ССП-1Э Т96-19-95-78 при длительности испытаний 100 часов общая потеря массы составляет менее 1 %, однако содержание летучих конденсирующихся веществ в среднем составило 0,13 %, что превышает требования, определённые в ГОСТ Р 50109-92 (ОСТ 92-9566-82). Ко-

эффициент пропускания в диапазоне от 500 нм до 700 нм у конденсированных продуктов материала стеклосотовых панелей стеклотекстолита изменяется от 0,590 до 0,532 соответственно.

3. Конструкционные материалы стеклотекстолит, стеклосотовая панель, соединения клеем К-300-61 могут быть использованы в составе телескопа космического аппарата, если предварительно их выдержать в вакуумной камере при разряжении $1 \cdot 10^{-6}$ Па в течение двух-трёх суток (время, достаточное для уноса с поверхности ЛКВ) при температуре (не приводящей к деструкции материала) порядка 125 °С.

Таким образом, для заключения о возможности использования материалов в составе конструкции телескопа КА необходима комплексная проверка материала на соответствие требованиям ГОСТ Р 50109-92 (ОСТ 92-9566-82) с учётом изменения спектральных характеристик оптических элементов. Измерение динамики конденсированных продуктов (массы осаждения, толщины осаждённой пленки) важно для расчёта справочного параметра показателя поглощения.

Библиографический список

1. ОСТ 92-9566-82. Материалы неметаллические наружных поверхностей изделий. Метод испытания на потерю массы и общее содержание летучих конденсирующихся веществ при вакуумно-тепловом воздействии. М.: Стандартинформ, 1982.

2. ГОСТ Р 50109-92. Материалы неметаллические. Метод испытания на потерю массы и содержание летучих конденсирующихся веществ при вакуумно-тепловом воздействии. М.: Издательство стандартов, 1992.

3. http://www.aac-research.at/products/products_AAC_SpaceTelescope_Outgassing_en.html.

4. ГОСТ 27124-86. Резонаторы пьезоэлектрические производственно-технического назначения и для бытовой радиоэлектронной аппаратуры. Основные параметры. М., 1986.

5. Акишин А.И., Зазулин В.С. Контроль толщины пленок, получаемых в вакууме, кварцевым резонатором // Приборы и техника эксперимента. 1963. №1. С. 152-154.

6. Scurat V.E., Tansyrev G.D., Beriozkina N.G., Volkov A.V., Jigatch A.N., Leipuksky I.O., Pshenichnikov P.A., Samsonov P.V., Toropov V.P., Demigod S.A., Naumov S.F., Sokolova S.P. Surface Contamination of Some Materials of the Space

Station "MIR" // High Performance Polymers, 2001. V.13, no. 4. P. 337-353.

7. Акишин А.И. Работоспособность космического оборудования при воздействии собственной внешней атмосферы аппарата // Труды VIII Межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». М.: НИИЯФ МГУ, 2007. С. 15-19.

8. Малов В.В. Пьезорезонансные датчики. М.: Энергоатомиздат, 1989. 272 с.

9. Давыденко С.В., Цаплин С.В. Исследование динамики конденсированных продуктов конструкционных матери-

алов // Сборник трудов XXVIII Российской школы по проблемам науки и технологий. Миасс. С. 71-77.

10. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. М.: Высшая школа, 1990. 320 с.

11. Майссел Л., Глэнг Р. Технология тонких плёнок. Справочник Т. 1. М.: Советское радио. 1977. 664 с.

12. Майссел Л., Глэнг Р. Технология тонких плёнок. Справочник Т. 2. М.: Советское радио, 1977. 768 с.

13. ГОСТ 26.003-80. Система интерфейса для измерительных устройств с байт-последовательным, бит-параллельным обменом информацией. Требования к совместимости. М.: Стандартиформ, 1980.

Информация об авторах

Цаплин Сергей Васильевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики твердого тела и неравновесных систем, Самарский государственный университет. E-mail: tsaplin@samsu.ru. Область научных интересов: теплообмен, космическое машиностроение.

Большев Станислав Александрович, ведущий инженер-программист, Самарский государственный университет. Область научных интересов: теплообмен, математическое моделирование, космическое машиностроение.

RESEARCH OF THE DYNAMICS OF CONDENSED PRODUCT DEPOSITION

© 2014 S.V. Tsaplin, S. A. Bolychev

Samara State University, Samara, Russian Federation

The paper is devoted to the research of structural nonmetallic materials used in the construction of spacecraft for mass loss and gas release in a vacuum-thermal environment, as well as the research of the dynamics of deposition of gas release condensed products on the optical surfaces of optical equipment. A test bench has been developed for carrying out research of the dynamics of deposition of condensed products based on quartz crystal microbalance. In accordance with the State Standards GOST R 50109-92 mass loss and gas release tests of structural non-metallic materials (fiberglass, fiberglass honeycomb panel, polyurethane foam, tapes, textiles, adhesives, etc.) used in spacecraft construction have been carried out. The effect of the deposition of condensed products of gas release from these materials on the transmission coefficient of the optical element is determined. A conclusion about the possibility of using these materials in constructing spacecraft is made.

Quartz sensor, microbalance, gas release, deposition, volatile condensed substances.

References

1. OST 92-9566-82. Nonmetallic materials of outer surfaces. Method of testing mass loss and content of volatile condensable materials in a vacuum-thermal environment. Moscow: Standartinform Publ., 1982. (In Russ.)

2. GOST R 50109-92. Nonmetallic materials. Test method for mass loss and content of volatile condensable materials in a vacuum-thermal environment. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 1992. (in Russ.)
3. http://www.aaceseearch.at/product/s/products_AAC_SpaceTesthouse_Outgassing_en.html.
4. GOST 27124-86. Piezoelectric resonators for industrial and domestic radioelectronic equipment. Basic parameters. Moscow: 1986. (In Russ.)
5. Akishin A.I., Zazulin V.S. Thickness control of films produced in vacuum by a quartz crystal resonator // Pribory i tehnika eksperimenta. 1963. No. 1. P. 152-154. (In Russ.)
6. Scurat V.E., Tansyrev G.D., Beriozkina N.G., Volkov A.V., Jigatch A.N., Leipuksky I.O., Pshenichnikov P.A., Samsonov P.V., Toropov V.P., Demigod S.A., Naumov S.F., Sokolova S.P. Surface Contamination of Some Materials of the Space Station "MIR" // High Performance Polymers. 2001. V.13, no. 4. P. 337-353.
7. Akishin A.I. Space equipment operability under the influence of own atmosphere of spacecraft // Trudy VIII Mezhvuzovskoy nauchnoy shkoly molodykh spetsialistov "Kontsentrirrovannye potoki energii v kosmicheskoy tekhnike, elektronike, ekologii i meditsine" Moscow: NIYAF MGU Publ., 2007. P. 15-19. (In Russ.)
8. Malov V.V. P'ezorezonansnye datchiki [Piezoresonance sensors]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1989. 272 p. (In Russ.)
9. Davydenko S.V., Tsaplin S.V. Deposition dynamics research of condensed products of structural materials // Sbornik trudov XXVIII Rossiyskoy shkoly po problemam nauki i tehnology. Miass, 2008. P. 71-77. (In Russ.)
10. Rosanov L.N. Vakuumnaya tekhnika [Vacuum engineering]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1990. 320 p.
11. Maisell L.I., Glang R. Tekhnologiya tonkikh plenok [Handbook of thin film technology]. V. 1. Moscow: Sovetskoe radio Publ., 1977. 664 p.
12. Maisell L.I., Glang R. Tekhnologiya tonkikh plenok [Handbook of thin film technology]. V. 2. Moscow: Sovetskoe radio Publ., 1977. 768 p.
13. GOST 26.003-80. Interface system for measuring devices with byte-serial, bit-parallel exchange of information. Moscow: Standartinform Publ., 1980. (In Russ.)

About the authors

Tsaplin Sergey Vasilevich, Candidate of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of Solid State Physics and Non-Equilibrium Systems, Samara State University. E-mail: tsaplin@samsu.ru. Area of Research: heat and mass transfer, space engineering.

Bolychev Stanislav Alexandrovich, Principal Software Engineer, Samara State University. Area of Research: heat and mass transfer, mathematical modeling, space engineering.

УДК 535.42

НЕПАРАКСИАЛЬНЫЙ ИТЕРАЦИОННЫЙ РАСЧЁТ ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ, ФОКУСИРУЮЩИХ В СУБВОЛНОВОЕ СВЕТОВОЕ ПЯТНО

© 2014 Е. Ю. Богданова, С. Н. Хонина

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Основное направление усилий в преодолении дифракционного предела в последнее время сосредоточено на использовании затухающих волн. Однако при реализации возникает существенный недостаток: сверхразрешение достигается лишь в непосредственной близости от устройства, а именно на расстоянии менее длины волны. Следовательно, использовать имеющиеся результаты, в частности, в уплотнении информации на оптических носителях, невозможно. Целью настоящей работы является расчёт оптических элементов для субволновой фокусировки монохроматической волны на расстоянии нескольких десятков длин волн. В статье нашла отражение проблема преодоления предела дифракции, выраженного в соответствии с теорией Эбби и критерием Рэлея, которая является темой множества фундаментальных и прикладных исследований в современной оптике. Большое место в работе занимает рассмотрение субволновой локализации излучения, основанной на эффекте интерференции, которая позволяет уменьшать размеры светового пятна за счёт перераспределения энергии в периферийную область. Расчёты выполнены с использованием итерационного алгоритма, который основан на методе разложения по плоским волнам и минимизации функционала методом главных направлений Брента. В работе задача рассмотрена в цилиндрическом и радиальном случаях. Особое внимание уделяется исследованию по поиску решения, более удобного для практической реализации. Демонстрируется актуальность работы и перспективность разработки решения данного вопроса для хранения данных, бесконтактного зондирования изображений и нанолитографии.

Суперосциллирующие волны, субволновая фокусировка, дифракционный предел, метод разложения по плоским волнам.

Введение

Преодоление предела дифракции, выраженного в соответствии с теорией Эбби и критерием Рэлея, является темой множества фундаментальных и прикладных исследований в современной оптике. Этот интерес связан с тем, что область применения сверхразрешения не ограничивается улучшением качества изображений, но уже показана эффективность в уплотнении записи на оптических носителях информации, в литографии и наноструктурировании, оптическом манипулировании вплоть до атомных размеров и во многих других областях.

Основное направление усилий в преодолении дифракционного предела в последнее время сосредоточено на использовании затухающих волн. В результате были разработаны такие эффективные концепции, как сканирующая ближ-

непольная микроскопия [1, 2], STED-микроскопия [3, 4], концентраторы полей [5–7] и суперлинзы [8–12].

Однако для реализации оптической суперлинзы требуется метаматериал с отрицательным показателем преломления, который ещё необходимо научиться производить. Другие разработки при всех своих достоинствах обладают существенным недостатком: сверхразрешение достигается лишь в непосредственной близости от устройства, а именно на расстоянии менее длины волны.

Таким образом, использовать имеющиеся результаты, в частности, в уплотнении информации на оптических носителях, невозможно.

В работе [13] было показано, что для формирования поля с субволновыми областями концентрации излучения может быть использована интерференция затухающих волн [14, 15], создаваемая специ-

ально разработанной амплитудно-фазовой оптической маской. Причём фокусировка в субволновую область возможна на расстояниях, значительно превышающих пределы зоны затухающих (неоднородных) волн.

Объяснение природы такого явления показано на рис. 1 – формирование светового пятна субволнового размера происходит на дне световой ямы, окружённой высоким световым барьером (боковыми лепестками). Т. е. уменьшение размеров светового пятна достигается за счёт ухода энергии в периферийную область, что полностью согласуется с теорией сверхразрешения Торалдо [16].

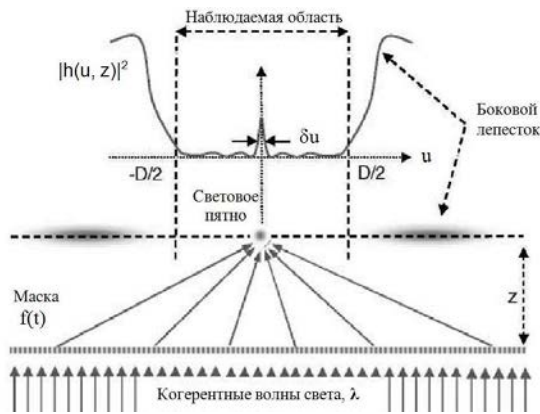


Рис.1. Схема формирования субволнового светового пятна, окружённого мощными боковыми лепестками

Заметим, что в статье [13] было получено решение, для реализации которого потребуется не менее сверхразрешающая технология.

В данной работе проводится аналогичное исследование с целью найти решение, более удобное для практической реализации. Поиск такого решения строится на итерационном алгоритме [17, 18], основанном на методе разложения по плоским волнам и минимизации функционала методом главных направлений Брента [19]. Задача рассмотрена в цилиндрическом и радиальном случаях.

1. Дифракционный предел

В оптике операция преобразования Фурье реализуется собирающей линзой. При помещении в её переднюю фокальную плоскость транспаранта с изображением, освещаемого плоским волновым фронтом, в задней фокальной плоскости формируется Фурье-образ входного поля (пространственно-частотный спектр):

$$G(v, \mu) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y) \exp \left[-i \frac{k}{f} (vx + \mu y) \right] dx dy, \tag{1}$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число; λ – длина волны излучения; f – фокусное расстояние линзы.

1.1. Цилиндрический случай

Если входное поле факторизуется и может быть представлено как произведение двух одномерных функций от независимых переменных, то в этом случае действие преобразования Фурье рассматривается как цилиндрическое по каждой переменной:

$$G(v, \mu) = \int_{-\infty}^{\infty} g_1(x) \exp \left[-i \frac{k}{f} vx \right] dx \times \int_{-\infty}^{\infty} g_2(y) \exp \left[-i \frac{k}{f} \mu y \right] dy. \tag{2}$$

В оптике прямоугольная функция от двух координат может рассматриваться как прямоугольная апертура. Таким образом, в данном случае преобразование Фурье описывает дифракцию Фраунгофера плоской волны на прямоугольной апертуре. Такая апертура является функцией с разделяющимися в декартовых координатах переменными:

$$g(x, y) = \begin{cases} A, & |x| \leq L_x, |y| \leq L_y \\ 0, & |x| > L_x, |y| > L_y \end{cases} \tag{3}$$

и её Фурье-образ равен:

$$G(v, \mu) = 4AL_x L_y \operatorname{sinc} \left[\frac{kL_x v}{f} \right] \operatorname{sinc} \left[\frac{kL_y \mu}{f} \right], \quad (4)$$

где $\operatorname{sinc}(x) = \sin(x)/x$.

При полуширине апертуры, равной фокусу, получается предельная для неиммерсионного объектива числовая апертура. Рассмотрим график интенсивности, соответствующий функции $\operatorname{sinc}^2(kx)$ (рис. 2).

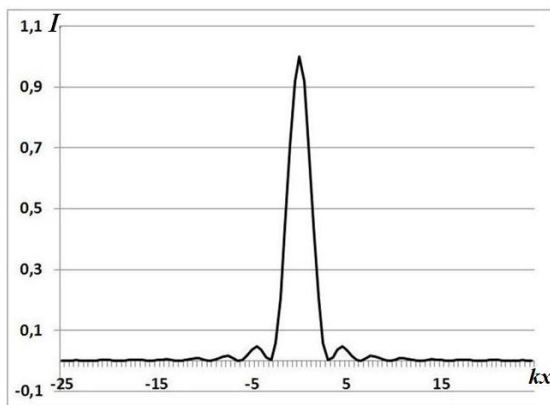


Рис.2. График интенсивности, соответствующий функции $\operatorname{sinc}^2(kx)$

Первый ноль функции $\operatorname{sinc}^2(kx)$ находится в точке $kx_0 = \pi$. Отсюда следует, что минимальный радиус светового пятна в цилиндрическом случае равен:

$$x_0 = \lambda / 2. \quad (5)$$

Ширина центрального лепестка на половине высоты интенсивности (full width at half maximum, *FWHM*) равна $FWHM = 2,798$, т. е. $kx_1 = 2,798$. Отсюда следует, что минимальный размер (дифракционный предел) в цилиндрическом случае равен:

$$x_1 = 0,442\lambda. \quad (6)$$

1.2. Радиальный случай

В данном случае имеется функция, обладающая осевой симметрией, т. е. $g(r, \varphi) = g(r)$. Тогда преобразование Фурье (1) в полярных координатах имеет следующий вид:

$$G(\rho, \theta) = \int_0^\infty g(r) r dr \times \int_0^{2\pi} \exp \left(-i \frac{k}{f} r \rho \cos(\varphi - \theta) \right) d\varphi. \quad (7)$$

Поскольку внутренний интеграл в выражении (7) есть функция Бесселя нулевого порядка, то Фурье-образ в данном случае не зависит от полярного угла θ :

$$G(\rho) = 2\pi \int_0^\infty g(r) J_0 \left(\frac{k}{f} r \rho \right) r dr. \quad (8)$$

Этот вид двумерного преобразования Фурье для осесимметричных функций известен также как преобразование Фурье–Бесселя или преобразование Ханкеля нулевого порядка.

Если рассматривается фокусировка плоской волны, ограниченной круглой апертурой:

$$g(r) = \begin{cases} A, & |r| \leq R \\ 0, & |r| > R \end{cases}, \quad (9)$$

то Фурье-образ имеет следующий вид:

$$G(\rho) = 2\pi AR^2 \operatorname{besc} \left(\frac{kR\rho}{f} \right), \quad (10)$$

где $\operatorname{besc}(r) = J_1(r)/r$.

При радиусе апертуры, равной фокусу, получается предельная для воздуха числовая апертура. Рассмотрим график интенсивности, соответствующий функции $\operatorname{besc}^2(k\rho)$ (рис. 3).

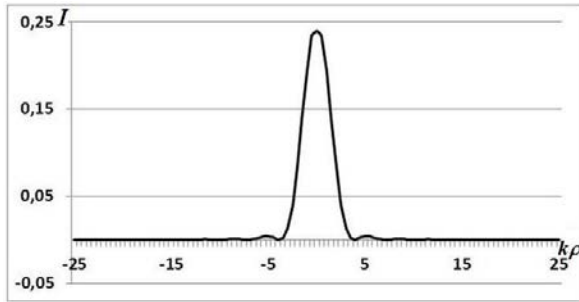


Рис.3. График интенсивности, соответствующий функции $\text{besc}^2(k\rho)$

Первый ноль функции $\text{besc}^2(k\rho)$ равен первому нулю функции $J_1(k\rho)$ и соответствует $k\rho_0 = 3,81$. Отсюда следует, что минимальный радиус светового пятна в радиальном случае равен:

$$\rho_0 = 0,61\lambda. \tag{11}$$

Определив, что $FWHM = 3,26$, т. е. $k\rho_1 = 3,26$, получаем минимальный размер (дифракционный предел) в радиальном случае:

$$\rho_1 = 0,51\lambda. \tag{12}$$

2. Оптимизационный расчёт для цилиндрического случая

Как было показано, дифракционный предел в цилиндрическом случае равен $x_1 = 0,44\lambda$ для прямоугольной апертуры и $\rho_1 = 0,51\lambda$ для круглой апертуры. Далее попытаемся преодолеть этот предел в области распространяющихся волн (т. е. на расстоянии более длины волны). Модель распространения основана на разложении по плоским волнам:

$$F(u, z) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)H(u-x, z)dx, \tag{13}$$

где

$$H(x, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(ikz\sqrt{1-\alpha^2})\exp(ik\alpha x) d\alpha \tag{14}$$

оператор распространения в свободном пространстве.

В расчётах используются следующие параметры: входное поле задаётся в области $x \in [-10\lambda, 10\lambda]$, выходное поле рассчитывается на расстоянии $z = 20\lambda$ в области $u \in [-1\lambda, 1\lambda]$.

При оптимизации накладываются условия на наблюдаемую область такие, чтобы преодолеть дифракционный предел. В частности, в интервале $[-1\lambda, 1\lambda]$ концентрация энергии задаётся в области $[-0,2\lambda, 0,2\lambda]$, то есть $\delta u = 0,4\lambda$, а в области $[-1\lambda, -0,2\lambda]$ и $(0,2\lambda, 1\lambda]$ энергия не должна превышать 0,1, то есть боковые лепестки отодвигаются как можно дальше.

2.1. Оптимизация для бинарного распределения

Функция $f(x)$ принимает следующие значения:

- {0,1} – для амплитудного элемента;
- {-1, 1} – для фазового элемента;
- {-1,1, -i, i, 0} – для амплитудно-фазового элемента.

Эти элементы легко изготовить на практике. Полученные результаты с использованием данных вариантов оптических элементов оказались наилучшими для фазового элемента. Входное распределение в данном случае было задано в области $x \in [-50\lambda, 50\lambda]$. На него приходится 100 ячеек, каждая размером λ (рис. 4, а). Соответствующее распределение интенсивности на расстоянии 20λ показано на рис. 4, б. Размер светового пятна в этом случае $FWHM = 0,493\lambda$, что больше дифракционного предела, т. е. в данном случае не удаётся решить поставленную задачу.

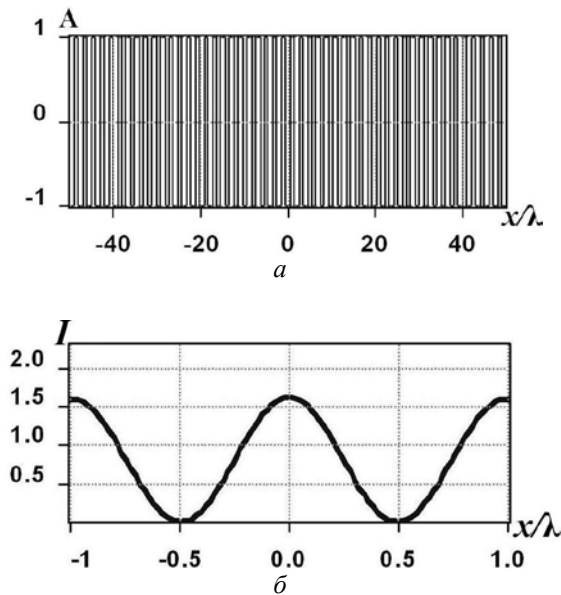


Рис.4. Входное распределение для фазового элемента (а) и соответствующее распределение интенсивности (б) после оптимизации

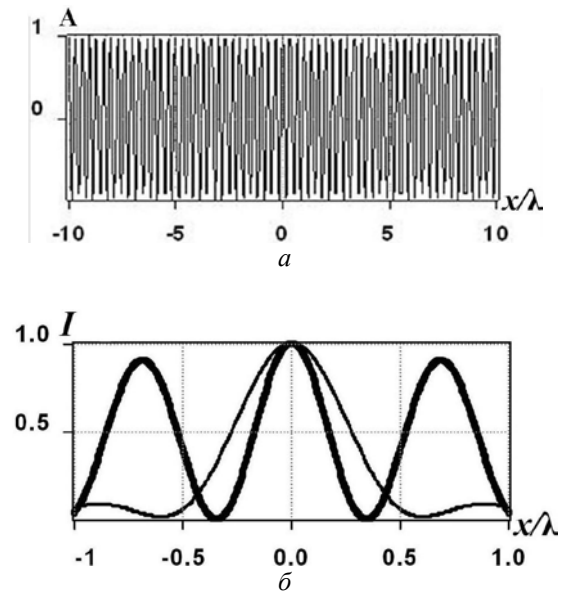


Рис.5. Входное распределение для элемента вида (15) (а) и соответствующее распределение интенсивности (б) для изолированного центрального пятна (тонкая линия) и светового пятна минимального размера (толстая линия)

2.2. Оптимизация

для косинусоидального распределения

Рассмотрим ситуацию, когда на вход подаётся распределение следующего вида:

$$f(x) = \cos[a\pi(bx)^c]. \tag{15}$$

После выполнения оптимизации по каждому параметру в выражении (15) выяснилось, что не удаётся одновременно удовлетворить двум условиям: преодолеть дифракционный предел и отодвинуть боковые лепестки от центрального пика.

При оптимизации удалось получить размер светового пятна меньше дифракционного предела $FWHM = 0,341\lambda$, но пятно окружено боковыми лепестками соизмеримой величины. На рис. 5 показаны соответствующие результаты расчёта.

Рассмотрим случай, когда на вход подаётся суперпозиция косинусов, т. е. функция следующего вида:

$$f(x) = \sum_n d_n \cos[a_n \pi (b_n x)^{c_n}]. \tag{16}$$

Функция (16) при параметрах:

$$f(x) = \cos(6\pi x) + \cos(3\pi\sqrt{5}x) \tag{17}$$

показана на рис. 6, а.

Для оптимизации используем следующие условия: концентрация энергии задаётся на $[-0,2\lambda, 0,2\lambda]$ и не превышает значение 0,1 на остальной части интервала $[-1\lambda, 1\lambda]$.

Результаты расчёта при различной величине апертуры входного поля показаны на рис. 6, б.

Дифракционный предел преодолен во всех случаях, но наилучший результат получен в случае элемента длиной $[-50\lambda, 50\lambda]$, когда $FWHM = 0,378\lambda$, при этом происходит уменьшение отсчётов на один шаг элемента. При оптимизации элемента длиной 20λ $FWHM = 0,431\lambda$, длиной 60λ $FWHM = 0,417\lambda$.

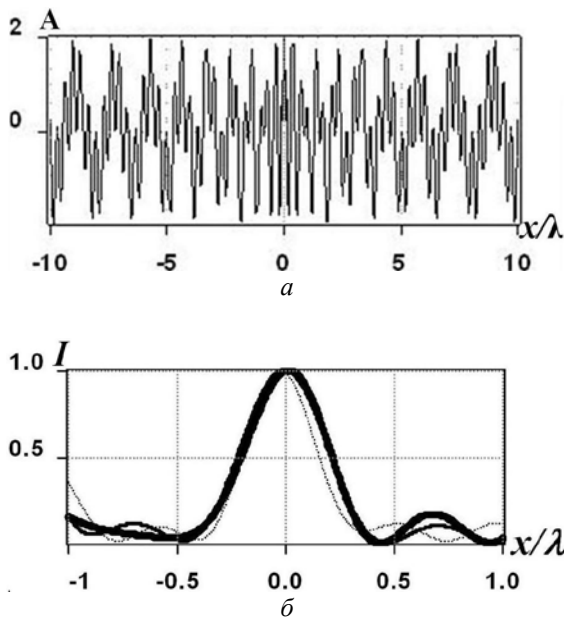


Рис.6. Входное распределение для суперпозиции (17) (а) и интенсивности после оптимизации для элемента размером 20λ (толстая линия); 60λ (тонкая линия); 100λ (пунктирная линия)

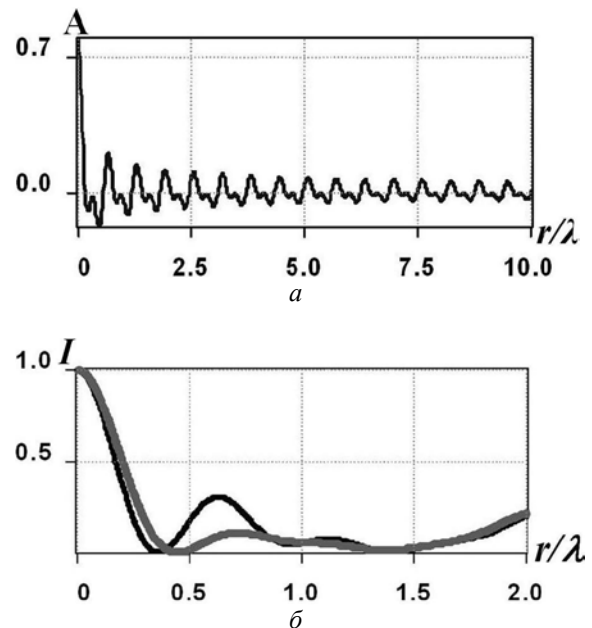


Рис.7. Входное распределение для суперпозиции вида (18) (а) и распределение интенсивности после оптимизации (б): при высоте боковых лепестков 0,1 (серая линия) и 0,3 (чёрная линия)

3. Оптимизация расчётов для радиального случая

Рассмотрим радиальный случай с наложением на целевую область тех же ограничений, что и в предыдущем разделе.

Будем использовать на входе суперпозицию функций Бесселя нулевого порядка следующего вида:

$$g(r) = \sum_n c_n J_0(\alpha_n r). \quad (18)$$

На рис. 7, а показана суперпозиция (18) для параметров, имеющих следующие значения: $c_1 = c_2 = 1, \alpha_1 = 10, \alpha_2 = 20$.

Наилучшие результаты при оптимизации входного поля (18), состоящего из двух слагаемых, были получены при вариации как α_n , так и c_n .

В случае наложения на боковые лепестки условия, что они не должны превышать по высоте треть интенсивности центрального пика, преодолеть дифракционный предел удавалось только при использовании комплексных коэффициентов c_n .

В частности, при условии, что боковые лепестки не должны быть выше 0,1 высоты центрального пика, формируется круглое световое пятно с $FWHM = 0,413\lambda$ (рис. 7, б, серая линия), а при условии высоты боковых лепестков вплоть до 0,3 высоты центрального пика возможно уменьшение светового пятна до $FWHM = 0,339\lambda$ (рис. 7, б, чёрная линия).

Заключение

Цель работы заключалась в расчёте оптического элемента, обеспечивающего субволновую фокусировку за пределами области ближнего поля (затухающих волн). При этом исследовалась возможность удовлетворения технологическим требованиям изготовления такого элемента.

Бинарный амплитудный или фазовый элемент является самым простым в изготовлении. Однако исследования показали, что если детали этого элемента имеют размер больше длины волны, то дифракционный предел не преодолевается. Задачу возможно решить при исполь-

зовании амплитудно-фазового элемента, например, описываемого суперпозицией косинусных функций.

Лучший результат удалось получить в радиальном случае при использовании амплитудно-фазового элемента, описываемого суперпозицией функций Бесселя нулевого порядка.

Таким образом, показана возможность формирования субволнового изолированного светового пятна на расстояниях нескольких длин волн от оптического элемента, согласованного с суперпозицией аналитических функций.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 13-07-00266.

Библиографический список (References)

1. Betzig E., Trautman J.K., Harris T.D., Weiner J.S., Kostelak R.L. Breaking the Diffraction Barrier: Optical Microscopy on a Nanometer Scale // *Science*. 1991. Vol. 251. P. 1468–1470.
2. Hartschuh A., Sanchez E.J., Xie X.S., Novotny L. High-Resolution Near-Field Raman Microscopy of Single-Walled Carbon Nanotubes // *Physical Review Letters*. 2003. Vol. 90. P. 701-704.
3. Hell S.W., Wichmann J. Breaking the diffraction resolution limit by stimulated-emission-depletion fluorescence microscopy // *Optics Letters*. 1994. No. 19. P. 780–782.
4. Khonina S.N., Golub I. How low can STED go Comparison of different write-erase beam combinations for stimulated emission depletion microscopy // *Journal of the Optical Society of America A*. 2012. V. 29, no. 10. P. 2242-2246.
5. Li K., Stockman M. I., Bergman D.J. Self-Similar Chain of Metal Nanospheres as an Efficient Nanolens // *Physical Review Letters*. 2003. No. 91. P. 599-603.
6. Stockman M.I. Nanofocusing of optical energy in tapered plasmonic waveguides // *Physical Review Letters*. 2004. No. 93. P. 137404.
7. Merlin R. Near-field plates: sub-wavelength focusing and radiationless interference // *Science*. 2008. V. 320. P. 511-513.
8. Pendry J.B. Negative refraction makes a perfect lens // *Physical Review Letters*. 2000. No. 85. P. 3966–3969.
9. Salandrino A., Engheta N. Far-field subdiffraction optical microscopy using metamaterial crystals: Theory and simulations // *Physical Review B*. 2006. No. 74. P. 205436.
10. Jacob Z., Alekseyev L.V., Narimanov E. Optical hyperlens: far-field imaging beyond the diffraction limit // *Optics Express*. 2006. No. 14. P. 8247–8256.
11. Fang N., Lee H., Sun C., Zhang X., Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens // *Science*. 2005. V. 308. P. 534–537.
12. Liu Z., Lee H., Xiong Y., Sun C., Zhang X. Far-field optical hyperlens magnifying sub-diffraction-limited objects // *Science*. 2007. V. 315. P. 1686.
13. Huang Fu Min. Super-Resolution without Evanescent Waves // *Nano Letters*. 2009. V. 9, no. 3. P. 1249-1254.
14. Merlin R. Radiationless Electromagnetic Interference: Evanescent-Field Lenses and Perfect Focusing // *Science*. 2007. V. 317. P. 927-929.
15. Fang N. Sub-Diffraction-Limited Optical Imaging with a Silver Superlens // *Science*. 2005. V. 308. P. 534-537.
16. Toraldo di Francia G. Super-gain antennas and optical resolving power // *Nuovo Cimento Suppl*. 1952. V. 9. P. 426–427.
17. Khonina S.N., Golub I. Enlightening darkness to diffraction limit and beyond: comparison and optimization of different polarizations for dark spot generation // *Journal of the Optical Society of America A*. 2012. V. 29, no. 7. P. 1470-1474.
18. Khonina S.N., Volotovskiy S.G. Minimizing the bright/shadow focal spot size with controlled side-lobe increase in high-numerical-aperture focusing systems // *Advances in Optical Technologies*. 2013. Article number 267684.
19. Brent R.P. Algorithms for minimization without derivatives // *Prentice-Hall*. 1973. P. 195.

Информация об авторах

Богданова Екатерина Юрьевна, магистрант кафедры технической кибернетики, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: fwinter@yandex.ru. Область научных интересов: оптический анализ изображений.

Хонина Светлана Николаевна, доктор физико-математических наук, профессор кафедры технической кибернетики, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: khonina@smr.ru. Область научных интересов: сингулярная оптика, дифракционная оптика, оптический анализ изображений.

NONPARAXIAL ITERATIVE CALCULATION OF DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS FOCUSING IN A SUBWAVE LIGHT SPOT

© 2014 E. Y. Bogdanova, S. N. Khonina

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The main efforts in overcoming the diffraction limit have been recently concentrated on the use of damped waves. The implementation, however, is connected with a serious drawback: superresolution is attained only in the immediate vicinity of the device, namely, at a distance of less than the wavelength. It is, therefore, impossible to use the available results, in particular, to reduce information on optical media. The aim of the paper is calculation of optical elements for subwave focusing of a monochromatic wave at a distance of several dozens of wave lengths. The problem of overcoming the diffraction limit expressed in accordance with the Abby theory and the Raleigh criterion dealt with in multiple fundamental and applied investigations is discussed in the paper. The analysis of subwavelength localization of radiation based on the interference effect that makes it possible to reduce the sizes of a light spot due to redistribution of energy in the peripheral area holds a prominent place in the paper. Calculations are performed using the iterative algorithm based on the method of plane wave expansion and the method of main directions. The problem is considered for the cylindrical and radial cases. Special attention is given to the search of solutions that would be more convenient for practical implementation. Prospective viability of developing the solution of the problem for data storage, contactless probing and nanolithography is demonstrated.

Super-oscillating waves, subwavelength focusing, diffraction limit, method of plane wave expansion.

About the authors

Bogdanova Ekaterina Yurievna, student in the Master's programme, Department of Engineering Cybernetics, Samara State Aerospace University. E-mail: fwinter@yandex.ru. Area of Research: optical image processing.

Khonina Svetlana Nikolaevna, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Engineering Cybernetics, Samara State Aerospace University. E-mail: khonina@smr.ru. Area of Research: singular optics, diffractive optics, optical image processing.

УДК 519.6

ИДЕНТИФИКАЦИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ РЕШЁТОК НА ОСНОВЕ ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЯЧЕЕК

© 2014 Д. В. Кирш

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

В статье рассматривается задача идентификации кристаллических решёток, представленных набором узлов в трёхмерном пространстве. Для решения задачи разработаны два инвариантных к расположению решётки в пространстве метода идентификации на основе оценивания параметров элементарных ячеек. Первый метод основан на вычислении и сравнении шести основных параметров элементарной ячейки Браве: трёх длин сторон ячейки и трёх величин углов между сторонами. Второй метод основан на вычислении и сравнении объёмов ячеек Вигнера–Зейтца с помощью метода Монте–Карло. В обоих методах введены нормированные меры схожести для вычисленных параметров: меры схожести сторон и углов для элементарных ячеек Браве и мера схожести объёмов для ячеек Вигнера–Зейтца. С использованием разработанных методов был проведён ряд вычислительных экспериментов по идентификации кристаллических решёток. В ходе экспериментов были определены, во-первых, зависимость точности определения объёма ячейки Вигнера–Зейтца от количества вбрасываемых точек, и во-вторых, вероятности точной идентификации решёток основных систем решёток Браве при сравнении различных наборов оценённых параметров. Основным результатом проведённых экспериментов стало преодоление рубежа в 95 % точности идентификации сразу для четырёх систем решёток Браве.

Параметры элементарной ячейки, вычисление объёма ячейки Вигнера–Зейтца, метод Монте–Карло, мера схожести.

Введение

С развитием сканирующей электронной микроскопии появилась возможность непосредственно наблюдать кристаллическую решётку – присущее кристаллам правильное расположение частиц. Она индивидуальна для каждого вещества и определяет его основные физико-химические свойства.

Существует ряд способов, позволяющих описать кристаллическую решётку. Наиболее распространённым является способ, предложенный Огюстом Браве [1]. Однако у такого описания есть ряд недостатков. Во-первых, элементарная ячейка Браве не всегда представляет симметрию кристалла. Во-вторых, возникает проблема неоднозначности выбора элементарной ячейки. Способ описания кристаллической решётки, лишённый описанных недостатков, был предложен Юджином Вигнером и Фредериком Зейтцем [2].

Одной из основных задач рентгенодифракционного анализа является иден-

тификация кристаллической решётки. Как правило, решение данной задачи осуществляется путём сравнения оценённых параметров исследуемой решётки с эталонными параметрами. В качестве эталонных могут выступать параметры решёток, либо исследованных ранее, либо полученных в результате моделирования. Поэтому для точной идентификации решётки требуется большая база заранее заданных эталонных параметров.

Среди основных методов идентификации кристаллических решёток можно выделить следующие: компаратор Национального Института стандартов и технологий, идентификация на основе сравнения эффективности упаковки решётки и идентификация на основе сравнения расстояний между изоповерхностями [3].

Основными недостатками перечисленных методов являются либо высокая погрешность (для компаратора НИСТ порядка 100Å при измерении межплоскостных расстояний), либо низкая эффективность при сравнении решёток, схожих по

форме (для двух других методов идентификации).

Предлагаемые алгоритмы свободны от перечисленных недостатков. Они позволяют вычислять меру схожести для двух произвольных решёток. Особо следует отметить, что введённые меры схожести являются инвариантными к повороту, смещению в пространстве и размеру решёток (количеству трансляций по всем направлениям), так как обеспечить равенство этих параметров у исследуемых кристаллических решёток невозможно.

Модели кристаллических решёток

Элементарная ячейка Браве характеризуется набором из шести параметров: длинами трёх сторон l_1, l_2, l_3 и величинами трёх углов между сторонами $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ (рис. 1).

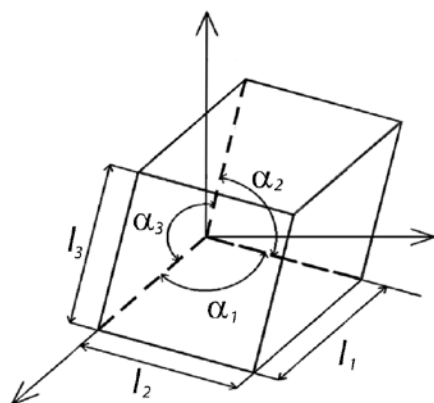


Рис. 1. Основные параметры элементарной ячейки Браве

Все решётки Браве делятся на семь основных систем. Характеристики их элементарных ячеек представлены в табл. 1.

Ячейка Вигнера–Зейтца характеризуется набором векторов-нормалей, проведённых к ограничивающим плоскостям.

Для построения ячейки Вигнера–Зейтца выбирается произвольный узел решётки и соединяется со всеми ближайшими соседними узлами. Через середины этих отрезков проводятся перпендикулярные отрезкам плоскости. Ограниченная область будет являться ячейкой Вигнера–Зейтца.

Ячейка Вигнера–Зейтца для трёхмерной кристаллической решётки представляет собой многогранник, содержащий внутри себя один узел решётки (рис. 2).

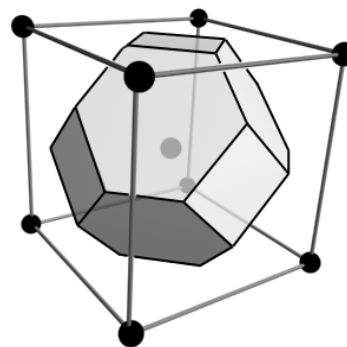


Рис. 2. Вид ячейки Вигнера–Зейтца для кубической объёмно-центрированной решётки

Таблица 1. Характеристики элементарных ячеек основных систем решёток Браве

Название	Символ	Длины сторон	Углы
Триклинная	aP	$l_1 \neq l_2 \neq l_3$	$\alpha_1 \neq \alpha_2 \neq \alpha_3$
Моноклинная	mP	$l_1 \neq l_2 \neq l_3$	$\alpha_1 = \alpha_2 = 90^\circ \neq \alpha_3$
Ромбическая	oP	$l_1 \neq l_2 \neq l_3$	$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 90^\circ$
Тетрагональная	tP	$l_1 = l_2 \neq l_3$	$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 90^\circ$
Кубическая	cP	$l_1 = l_2 = l_3$	$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 90^\circ$
Тригональная	hR	$l_1 = l_2 = l_3$	$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 \neq 90^\circ$
Гексагональная	hP	$l_1 = l_2 \neq l_3$	$\alpha_1 = 120^\circ; \alpha_2 = \alpha_3 = 90^\circ$

Ячейка Вигнера–Зейтца обладает следующими особенностями:

1. Она полностью повторяет симметрию решётки.

2. Ограниченная ею область содержит все точки, лежащие ближе к центральному узлу ячейки, чем к какому-либо другому узлу решётки.

Метод идентификации решёток на основе сравнения параметров элементарной ячейки Браве

Исходными данными метода идентификации является массив радиус-векторов узлов:

$$A = \{\bar{a}_k\}_{k=1}^N, \bar{a}_k = (a_{k1}, a_{k2}, a_{k3})^T.$$

Для нахождения шести основных параметров элементарной ячейки Браве был разработан следующий алгоритм:

1. Центрируем всю решётку.
2. Совмещаем радиус-вектор минимальной длины \bar{g}_1 с осью OX .
3. Переводим радиус-вектор минимальной длины \bar{g}_2 ($\bar{g}_2 \times \bar{X} \neq 0$) в плоскость XOY .
4. Находим узел с радиус-вектором \bar{g}_3 ($g_{33} \neq 0$) минимальной длины.
5. Вычисляем параметры элементарной ячейки Браве:

$$\bar{l} = (l_1, l_2, l_3) = (|\bar{g}_1|, |\bar{g}_2|, |\bar{g}_3|);$$

$$\bar{\alpha} = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = (\bar{g}_1 \wedge \bar{g}_2, \bar{g}_1 \wedge \bar{g}_3, \bar{g}_2 \wedge \bar{g}_3).$$

Для определения степени схожести сторон и углов двух элементарных ячеек Браве были введены следующие нормированные меры (принимают максимальное значение, равное 1, когда сравниваемые параметры полностью совпадают):

Мера схожести сторон:

$$\|\bar{l}_1 - \bar{l}_2\| = 1 - \frac{|\bar{l}_1 - \bar{l}_2|}{\max\{|\bar{l}_1|, |\bar{l}_2|\}}. \quad (1)$$

Мера схожести углов:

$$\|\bar{\alpha}_1 - \bar{\alpha}_2\| = 1 - \max \left\{ \begin{array}{l} \sin(|\alpha_{11} - \alpha_{21}|), \\ \sin(|\alpha_{12} - \alpha_{22}|), \\ \sin(|\alpha_{13} - \alpha_{23}|). \end{array} \right\}. \quad (2)$$

Метод идентификации решёток на основе сравнения объёмов ячеек Вигнера–Зейтца

Исходными данными метода идентификации являются число вбрасываемых точек L и массив радиус-векторов узлов:

$$A = \{\bar{a}_k\}_{k=1}^N, \bar{a}_k = (a_{k1}, a_{k2}, a_{k3})^T.$$

Для нахождения объёма ячейки Вигнера–Зейтца был разработан следующий алгоритм, основанный на методе Монте-Карло:

1. Центрируем всю решётку.
2. Определяем нормали от центрального узла к плоскостям, ограничивающим ячейку Вигнера–Зейтца.
3. Вычисляем объём ячейки, ограниченной плоскостями. Для этого используем метод Монте-Карло.

3.1. Производим L испытаний, в результате которых получаем L возможных значений трёхмерного случайного вектора, равномерно распределённого в объёме решётки.

3.2. Подсчитываем количество точек, попавших внутрь области, ограниченной плоскостями, и вычисляем объём ячейки, исходя из того, что вероятность попадания точки в область ячейки Вигнера–Зейтца пропорциональна её мере (объёму).

Для определения степени схожести объёмов двух ячеек Вигнера–Зейтца была введена следующая нормированная мера (принимает максимальное значение, равное 1, когда объёмы ячеек Вигнера–Зейтца у сравниваемых решёток полностью совпадают):

$$\|V_1 - V_2\| = 1 - \frac{\sqrt{(V_1 - V_2)^2}}{\max\{V_1, V_2\}}. \quad (3)$$

Для анализа эффективности введённых мер схожести был проведён ряд вы-

числительных экспериментов по идентификации кристаллических решёток.

Результаты экспериментальных исследований

Исходными данными для экспериментов были 1400 решёток (по 200 решёток каждой из систем, представленных в табл. 1), полученных методом имитационного моделирования. Длины сторон и величины углов определялись значениями равномерно распределённой случайной величины.

Каждая решётка попарно сравнивалась со всеми остальными: две решётки считались похожими по сторонам или углам, если значение соответствующей меры схожести было не меньше 0,95. Выбор

данного порогового значения связан с тем, что в настоящее время ошибка определения параметров решётки составляет не менее 5%.

Особый интерес представляют решётки, элементарные ячейки которых различаются только по сторонам или только по углам. Такие решётки должны определяться как похожие при вычислении той меры схожести, которая соответствует совпадающим параметрам.

В первом эксперименте сравнение двух решёток велось только по значению меры схожести сторон (1). Во втором эксперименте сравнение двух решёток велось только по значению меры схожести углов (2). Результаты экспериментов представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2. Вероятность точной идентификации решёток основных систем решёток Браве при сравнении сторон

Сравниваемая ячейка	Эталонная ячейка						
	<i>aP</i>	<i>mP</i>	<i>oP</i>	<i>tP</i>	<i>cP</i>	<i>hR</i>	<i>hP</i>
<i>aP</i>	26	23	22	12	3	3	11
<i>mP</i>	23	26	23	12	2	2	12
<i>oP</i>	22	23	24	13	3	3	12
<i>tP</i>	14	13	15	22	8	8	20
<i>cP</i>	4	2	3	8	38	35	10
<i>hR</i>	3	2	3	7	35	40	10
<i>hP</i>	13	13	14	19	10	9	22

Таблица 3. Вероятность точной идентификации решёток основных систем решёток Браве при сравнении углов

Сравниваемая ячейка	Эталонная ячейка						
	<i>aP</i>	<i>mP</i>	<i>oP</i>	<i>tP</i>	<i>cP</i>	<i>hR</i>	<i>hP</i>
<i>aP</i>	80	9	0	0	0	11	0
<i>mP</i>	9	79	3	3	3	2	1
<i>oP</i>	0	3	32	31	31	3	0
<i>tP</i>	0	3	31	32	31	3	0
<i>cP</i>	0	3	31	31	32	3	0
<i>hR</i>	7	1	3	3	3	83	0
<i>hP</i>	0	1	0	0	0	0	99

Данные в таблицах показывают, какой в среднем процент из всех *сравниваемых ячеек* (тип указан в левой части таблицы) имеет схожесть более 95 % с выбранной *эталонной ячейкой* (тип указан в верхней части таблицы). Таким образом, сумма значений в каждой строке равна 100 %. В результате, большее число в ячейке таблицы (выделено более тёмной заливкой ячейки) означает большую вероятность совпадения типов сравниваемой и эталонной решёток. Например, для первого эксперимента множество решёток, совпавших с одной из триклинных, состоит, в среднем, из триклинных на 26 %, моноклинных на 23 %, ромбических на 22 %, тетрагональных на 12 %, кубических на 3 %, тригональных на 3 % и гексагональных на 11 %.

По данным табл. 2 из всего множества систем решёток Браве действительно можно выделить три следующие обособленные группы: (триклинная, моноклинная, ромбическая), (кубическая, тригональная) и (тетрагональная, гексагональ-

ная). Полученный результат объясняется тем, что длины сторон элементарных ячеек Браве в каждой из выделенных групп связаны общим соотношением.

По данным табл. 3 также можно выделить обособленную группу (ромбическая, тетрагональная, кубическая). Такой результат может быть объяснён тем, что углы трёх данных систем одинаковы и равны 90 градусам. Отметим, что ввиду своей характерной особенности для угла, равного 120 градусам, принадлежность к гексагональной системе решёток определяется практически точно.

В результате для более точного определения типа решётки с использованием методов идентификации возникает необходимость одновременного применения обеих мер схожести. Для этого был проведён третий эксперимент, в котором две решётки считались похожими, если значения мер схожести сторон и углов были не меньше 0,95. Его результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4. Вероятность точной идентификации решёток основных систем решёток Браве при сравнении сторон и углов

Сравниваемая ячейка	Эталонная ячейка						
	<i>aP</i>	<i>mP</i>	<i>oP</i>	<i>tP</i>	<i>cP</i>	<i>hR</i>	<i>hP</i>
<i>aP</i>	94	5	0	0	0	1	0
<i>mP</i>	5	86	5	3	0	0	1
<i>oP</i>	0	4	60	30	6	0	0
<i>tP</i>	0	3	33	48	15	1	0
<i>cP</i>	0	0	6	15	75	4	0
<i>hR</i>	1	0	0	1	4	94	0
<i>hP</i>	0	1	0	0	0	0	99

Для кубических решёток было получено максимальное увеличение точности определения: с 32–38% до 75% (т.е. в два раза). Однако и в этом случае сохраняется обособленная группа (ромбическая, тетрагональная, кубическая), которая значительно затрудняет определение типа ре-

шётки при использовании какого бы то ни было классификатора.

На основании данных табл. 2, 3 и 4 можно сделать вывод о том, что разбиение всех кристаллических решёток Браве на семь систем не является однородным и

разделимым при использовании введённых мер схожести сторон и углов.

Последним шагом для увеличения точности идентификации решёток стало применение третьей меры схожести – схожести объёмов ячеек Вигнера–Зейтца.

Для начала было определено минимальное количество вбрасываемых точек, позволяющее вычислить объём ячейки Вигнера–Зейтца с достаточной точностью.

В четвёртом эксперименте вычислялась зависимость изменения меры схожести объёмов (3) от количества вброшенных точек. Исследование проводилось на случайно сгенерированной решётке. За эталонное значение объёма было принято значение, полученное в результате вбрасывания 1 000 000 точек. Результаты эксперимента представлены на рис. 3.



Рис. 3. Зависимость точности определения объёма ячейки Вигнера-Зейтца от количества вбрасываемых точек

Таблица 5. Вероятность точной идентификации решёток основных систем решёток Браве при сравнении сторон, углов и объёмов

Сравниваемая ячейка	Эталонная ячейка						
	<i>aP</i>	<i>mP</i>	<i>oP</i>	<i>tP</i>	<i>cP</i>	<i>hR</i>	<i>hP</i>
<i>aP</i>	99	1	0	0	0	0	0
<i>mP</i>	0	96	2	1	0	0	1
<i>oP</i>	0	1	68	26	5	0	0
<i>tP</i>	0	2	29	54	15	0	0
<i>cP</i>	0	0	5	15	78	2	0
<i>hR</i>	0	0	0	1	2	97	0
<i>hP</i>	0	1	0	0	0	0	99

Точность определения объёма ячейки Вигнера–Зейтца почти перестаёт изменяться (составляя более 99 %) при вбрасывании более 40 000 точек. Дальнейшие

эксперименты было решено проводить, осуществляя вбрасывание 40 000 точек.

Равенство объёмов, выбранное в качестве меры схожести, не является доста-

точным условием равенства ячеек Вигнера–Зейтца. Поэтому очевидно, что сравнение решёток с использованием только метода идентификации на основании объёмов ячеек Вигнера–Зейтца не позволит точно определить тип решётки.

В заключительном, пятом, эксперименте сравнение двух решёток велось одновременно по значениям всех трёх мер схожести: сторон и углов элементарных ячеек Браве и объёмов ячеек Вигнера–Зейтца. Результаты эксперимента представлены в табл. 5.

По данным табл. 4 и 5, можно сделать вывод, что точность определения типа решётки возросла в среднем на 5 %. Максимальное увеличение точности было достигнуто для моноклинных решёток – 10 %.

Однако обособленная группа (ромбическая, тетрагональная, кубическая) всё равно сохранилась, а значит, задача разграничения этих трёх типов решёток Браве остаётся открытой.

Заключение

Основным результатом одновременного использования всех трёх мер схожести стало преодоление рубежа в 95 % точ-

ности идентификации сразу для четырёх типов решёток (триклинных, моноклинных, тригональных и гексагональных).

На основании проведённого исследования можно сделать следующий вывод: для сгенерированного набора из 1400 решёток одновременное применение всех трёх описанных мер схожести является наилучшим способом идентификации кристаллической решётки.

Точность определения оставшихся трёх типов решёток (ромбических, тетрагональных и кубических) всё ещё не достаточно высока. Поэтому для них необходимо проведение дальнейших исследований с целью выявления дополнительных мер схожести (например, сравнение изоповерхностей, тензорного представления элементарной ячейки и т.п.).

Работа выполнялась при поддержке грантов РФФИ: 12-01-00237-а, 14-01-00369-а, 14-07-97040-р_поволжье_а, гранта Президента РФ поддержки ведущей научной школы НШ-4128.2012.9, программы фундаментальных исследований РАН-ОНИТ6, в рамках выполнения государственного задания № 8.3195.2011 Минобрнауки РФ.

Библиографический список

1. Куприянов А.В. Анализ текстур и определение типа кристаллической решётки на наномасштабных изображениях // Компьютерная оптика. 2011. Т. 35, № 2. С. 157-157.

2. Tilley R.J.D. Crystals and crystal structures. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2006. P. 17-32.

3. Куприянов А.В. Оценка меры схожести кристаллических решёток по координатам их узлов в трёхмерном пространстве // Компьютерная оптика. 2012. Т. 36, № 4. С. 590-595.

Информация об авторе

Кириш Дмитрий Викторович, магистрант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: limitk@mail.ru. Область научных интере-

сов: цифровая обработка изображений, способы математического описания и идентификации кристаллических решёток, классификация кристаллических решёток.

CRYSTAL LATTICE IDENTIFICATION ON THE BASIS OF ASSESSING UNIT CELL PARAMETERS

© 2014 D. V. Kirsh

Samara State Aerospace University, Russian Federation

The paper is devoted to the problem of crystal lattice identification in three-dimensional space. Two identification methods based on assessing the parameters of unit cells have been developed to solve this problem. The first method is based on the calculation and comparison of the six basic cell parameters: the three lengths of the cell sides and the three magnitudes of angles between the sides. The second method is based on the calculation and comparison of Wigner-Seitz cell volumes using the Monte-Carlo method. Both methods include normalized similarity measures for the parameters calculated: the edge similarity and the angle similarity measure for Bravais unit cells and the volume similarity measure for Wigner-Seitz cells. A number of computational experiments for crystal lattice identification were carried out using these methods. In the course of the experiments, first, the dependence of the accuracy of defining the volume of a Wigner-Seitz cell on the number of the points included and, second, the probability of accurate Bravais lattice identification when comparing different sets of the parameters assessed have been specified. As a result of the experiments carried out, the accuracy of identification for four systems of Bravais lattices exceeded 95 per cent.

Basic parameters of a unit cell, estimation of Wigner-Seitz cell volume, Monte-Carlo method, similarity measure.

References

1. Kupriyanov A.V. Texture analysis and identification of the crystal lattice type on nanoscale images // *Computer Optics*. 2011. V. 35, no.2. P. 151-157. (In Russ.)
2. Tilley R.J.D. Crystals and crystal structures. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2006. P. 17-32.
3. Kupriyanov A.V. Estimating the similarity measure of crystal lattices by coordinates of their nodes in three dimensional space // *Computer Optics*. 2012. V. 36, no.4. P. 590-595. (In Russ.)

About the author

Kirsh Dmitriy Victorovich, student in the Master's programme, Samara State Aerospace University, Russian Federation. E-mail: limitk@mail.ru. Area of Research: digital image processing, methods of mathematical formulation and comparison of crystal lattices, classification of crystal lattices.

УДК 535.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕДАЧИ УЛЬТРАКОРОТКОГО ИМПУЛЬСА ПО ЦЕПОЧКЕ КВАРЦЕВЫХ МИКРОСФЕР

© 2014 Е. С. Козлова

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Работа посвящена моделированию распространения ультракороткого импульса в волноводах двух типов. Первый тип (I тип) представляет собой обычный волновод из кварцевого стекла цилиндрической формы (без оболочки). Второй тип (II тип) представляет собой упорядоченные друг за другом микросферы, изготовленные также из кварцевого стекла. Для учёта зависимости диэлектрической проницаемости от частоты излучения применялась трёхпараметрическая модель Селлмейера. Были рассчитаны коэффициенты временного уширения и усиления импульса, а также коэффициент сужения спектра импульса. Численное моделирование FDTD-методом, учитывающим частотную зависимость диэлектрической проницаемости и реализованным в программном пакете FullWAVE, показало, что при распространении ультракороткого линейно-поляризованного Гауссова импульса длительностью 3,55 фс и центральной длиной волны 532 нм в волноводе, состоящем из упорядоченных друг за другом кварцевых микросфер радиусом 1 мкм, не наблюдается временного уширения импульса по полуспаду интенсивности на расстоянии 8 мкм, в то время как в случае распространения такого импульса в обычном цилиндрическом волноводе из кварца наблюдается временное уширение импульса в два раза.

Ультракороткий импульс, диэлектрическая проницаемость, модель Селлмейера, передача информации.

Введение

Развитие Интернета и сетевых коммуникаций приводит к повышенному спросу на широкополосные системы связи. Такие системы связи основаны на оптических волокнах, которые способны передавать оптические сигналы на большие расстояния. Современные оптические волокна способны передавать последовательности импульсов, длительностью порядка 2-8 пс на расстояния от 100 до 1000 км со скоростью от 10 до 12 Гб/с [1]. Однако объёмы передаваемой информации растут, и это требует разработки новых методик уплотнения канала связи. Ультракороткие импульсы – это многообещающая технология для достижения повышения объёмов передаваемой по оптическим волокнам информации. Однако чем короче импульс, тем сильнее он видоизменяется в процессе передачи по каналу связи. Основными факторами видоизменения импульса являются наложение импульсов друг на друга, наложение шума, влияние дисперсии и различных нелинейных эффектов [2].

В настоящее время разработаны и продемонстрированы методы генерации импульсов с длительностью менее 5 фс [3-5]. Уникальные характеристики таких импульсов обуславливают их широкое применение в фундаментальной науке, технике и медицине [6], в том числе и в технологиях передачи данных [7]. Большое количество работ посвящено экспериментальному исследованию распространения таких импульсов в различных оптических волокнах [8] и моделированию распространения фемтосекундных импульсов в различных волноводах [9, 10]. Однако из-за явления уширения спектра традиционные подходы, описывающие распространение импульсов как в линейных, так и в нелинейных средах, неприменимы. При моделировании процесса распространения фемтосекундных импульсов необходимо использовать методы, учитывающие не только пространственную, но и частотную дисперсию материала [11].

Рассматривается моделирование распространения ультракороткого импульса в волноводах двух типов. Первый тип (I тип)

представляет собой обычный волновод из кварцевого стекла цилиндрической формы (без оболочки). Второй тип (II тип) представляет собой упорядоченные друг за другом микросферы, изготовленные также из кварцевого стекла. Для учёта зависимости диэлектрической проницаемости от частоты излучения применялась модель Селлмейера. Были рассчитаны коэффициенты временного уширения и усиления импульса и коэффициент сужения спектра импульса. Расчёты проводились FDTD-

методом, реализованным в программе FullWAVE (RSoft).

Численное моделирование

Рассмотрим несколько волноводов, одни из которых представляют из себя цилиндры из кварцевого стекла следующих длин: 2 и 8 мкм (I тип), а другие – упорядоченные друг за другом кварцевые микросферы радиусом в 1 мкм (II тип). На рис.1 схематично представлены волноводы типа I (рис.1, а) и II (рис.1, б).

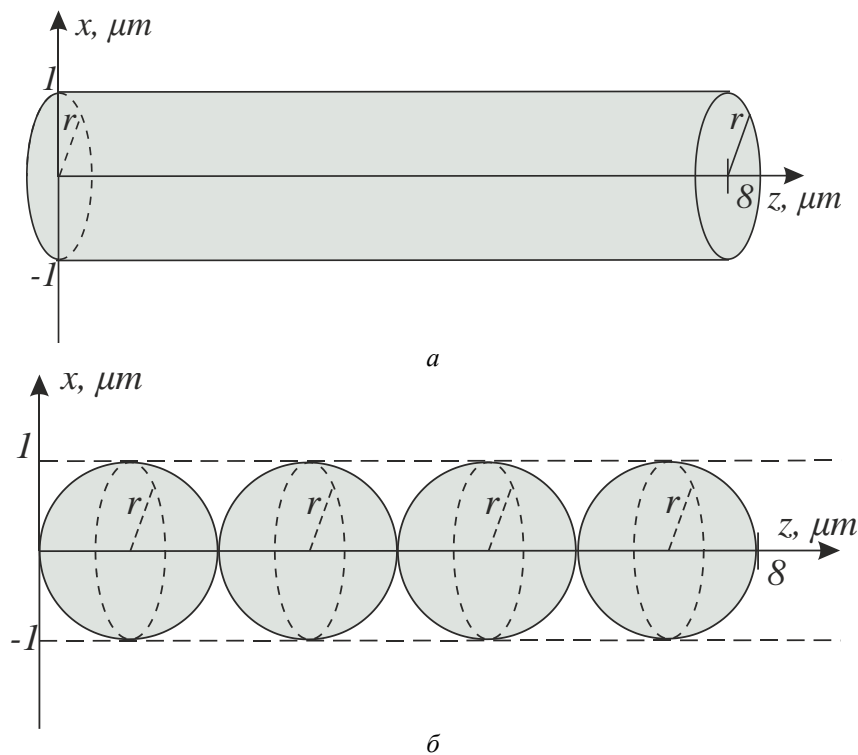


Рис. 1. Волноводы длиной 8 мкм: а – тип I, б – тип II

Для учёта зависимости диэлектрической проницаемости от частоты излучения воспользуемся моделью Селлмейера [12]:

$$\varepsilon(\lambda) = \varepsilon_{\infty} + \sum_m \frac{A_m \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_m^2 + i\lambda \delta_{Sm}}, \quad (1)$$

где ε_{∞} – диэлектрическая проницаемость на высоких частотах; λ – длина волны, мкм; λ_m – резонансная длина волны, мкм; A_m – величина резонанса; δ_{Sm} – коэффициент демпфирования, мкм. Параметры модели для кварцевого стекла представлены в табл. 1 [12].

Таблица 1. Параметры модели Селлмейера для кварцевого стекла

m	A_m	λ_m	δ_{Sm}
1	0,69616630	0,068404300	0
2	0,40794260	0,11624140	0
3	0,89747940	9,8961610	0
$\varepsilon_{\infty} = 1$			

На вход волновода подаётся короткий модулированный Гауссов импульс с плоским фронтом и равномерной интенсивностью вида:

$$\psi(x, y, \tau) = \text{rect}\left(\frac{x}{\alpha}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{\beta}\right) \times \exp\left\{-\left(\frac{\tau - 0,5ct_s}{t_d}\right)^2\right\} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}\tau\right), \quad (2)$$

где $\alpha = \beta = 1,6$ мкм – размер стороны квадрата, ограничивающего плоскую волну в начальной плоскости; $\tau = ct$, мкм; c – скорость света, мкм/с; t – время, с; t_s – длительность импульса, с; t_d – ширина импульса, мкм. Длина волны импульса равна 0,532 мкм. Плоскость поляризации импульса совпадает с плоскостью XZ (отличен от нуля только компонент E_x).

С помощью FDTD-метода моделируется прохождение через различные волноводы фемтосекундного импульса (2) длительностью 3,55 фс. Моделирование производилось при следующих расстояниях между узлами сетки отсчётов: $h_x = 0,02$ мкм, $h_y = 0,02$ мкм, $h_z = 0,015$ мкм, $h_t = 0,008$ мкм. На рис. 2 показано временное распределение интенсивности входящего импульса и соответствующий ему спектр.

На рис. 3 показано временное распределение интенсивности выходящих импульсов из волноводов I и II типов длиной 8 мкм, а на рис. 4 представлены соответствующие им спектры.

Рассчитаем коэффициент усиления импульса по формуле:

$$k_f = \frac{I_f}{I_{in}}, \quad (3)$$

где k_f – коэффициент фокусировки; I_f – величина максимальной интенсивности выходного излучения, а.е.; I_{in} – величина максимальной интенсивности падающего излучения, а.е. (а.е. – произвольные единицы).

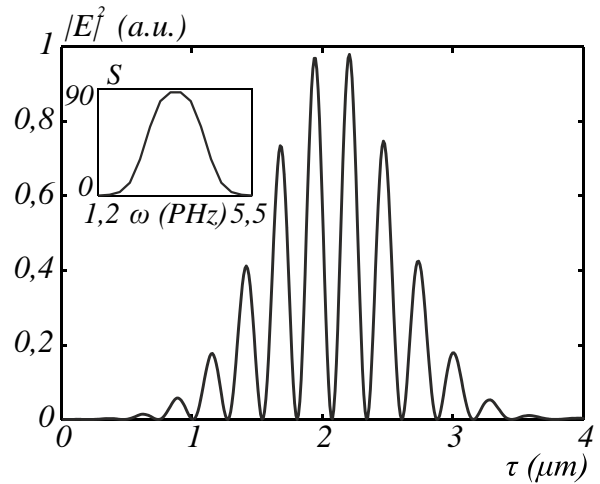


Рис. 2. Временное распределение интенсивности в точке (0, 0, 0) и спектр входящего импульса

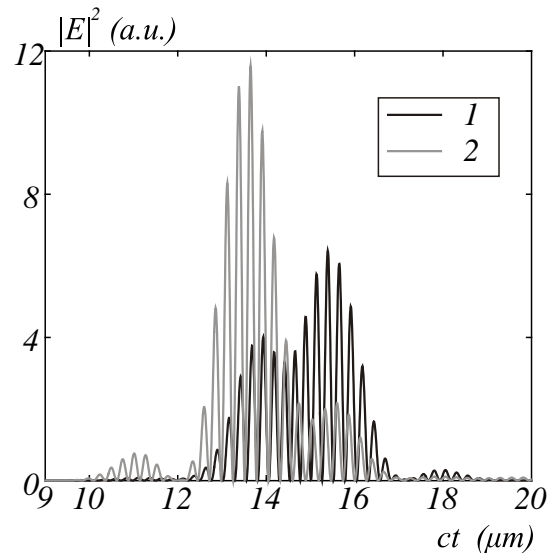


Рис. 3. Временное распределение интенсивности на выходе из волновода I типа – линия 1 и II типа – линия 2

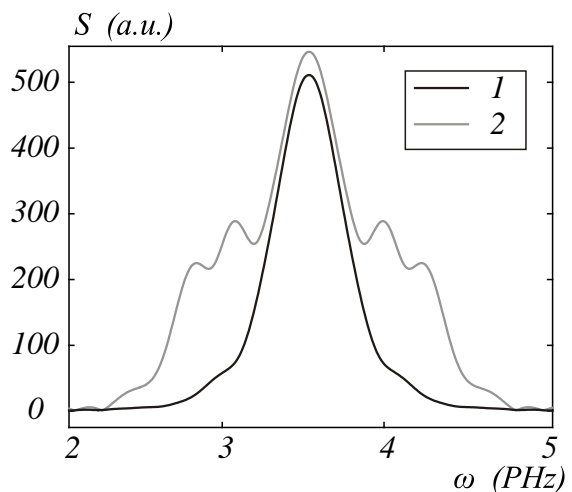


Рис. 4. Спектр импульса на выходе из волновода I типа – линия 1 и II типа – линия 2

Рассчитаем коэффициент временно-го уширения импульса по формуле:

$$k_t = \frac{t_{out}}{t_{in}}, \quad (4)$$

где k_t – коэффициент временного уширения; t_{in} – длительность входящего импульса по полуспаду интенсивности, фс; t_{out} – длительность выходящего импульса по полуспаду интенсивности, фс.

Рассчитаем коэффициент сужения спектра по формуле:

$$k_\omega = \frac{\Delta\omega_{in}}{\Delta\omega_{out}}, \quad (5)$$

где k_ω – коэффициент сужения спектра; $\Delta\omega_{in}$ – ширина спектра входящего излучения, ПГц; $\Delta\omega_{out}$ – ширина спектра выходящего излучения, ПГц.

Результаты расчётов представлены в табл. 2 – 4.

Таблица 2. Коэффициенты усиления импульса

Длина, мкм \ Тип	I	II
2	21,62	42,02
8	5,31	10,77

Таблица 3. Коэффициенты временного уширения импульса

Длина, мкм \ Тип	I	II
2	1,03	1,02
8	2,41	1,07

Таблица 4. Коэффициенты сужения спектра импульса

Длина, мкм \ Тип	I	II
2	0,99	0,99
8	1,96	1,21

Из табл. 2 видно, что интенсивность на выходе из волноводов II типа в два раза больше интенсивности на выходе из волноводов I типа. Отметим, что импульс, распространяющийся в волноводе II типа, практически не испытывает временного уширения по полуспаду интенсивности (табл. 3), и при этом его спектр терпит незначительное сужение (табл. 4).

Полученные результаты объясняются фокусирующими свойствами микросфер, которые с помощью фокусировки позволяют уменьшить уширение распространяющегося импульса и повысить интенсивность на выходе из волновода. В случае же обыкновенного цилиндра на выходе формируется интерференционная картина нескольких мод, распространяющихся в этом волноводе.

Заключение

Показано, что фемтосекундный импульс не уширяется по времени по полуспаду интенсивности при прохождении через четыре упорядоченные друг за другом и выполненные из кварцевого стекла микросферы. При распространении через цилиндрический волновод фемтосекундный импульс уширяется более чем в два раза. Волновод, состоящий из набора нескольких микросфер, можно рассматривать как аналог градиентных волноводов, в которых электромагнитные импульсы могут распространяться на существенные расстояния вследствие периодической фокусировки излучения, которую обуславливает параболическая зависимость коэффициента преломления волновода. Полученные результаты могут быть применены в области передачи информации по оптическим волокнам.

Библиографический список (References)

1. Weise F., Pawlowska M., Achazi G. and Lindinger A. Full control of polarization and temporal shape of ultrashort laser pulses transmitted through an optical fiber // *J. Opt.* 2011. V. 13. P. 1-8.
2. Lin Q., Agrawal G.P. Pulse broadening induced by dispersion fluctuations in optical fibers // *Optics Communications.* 2002. V. 206. P. 313-317.
3. Hecht J. Spectral Broadening Advances Quest for Single-Cycle Pulses // *Laser Focus World.* 2011. V. 47, no. 8. P. 65-70.
4. Krauss G., Lohss S., Hanke T, Sell A., Eggert S., Huber R., and Leitenstorfer A. Synthesis of a single cycle of light with compact erbium-doped fiber technology // *Nature Photonics.* 2010. V. 4. P. 33-35.
5. Fourmaux S., Payeur S., Lassonde Ph., Kieffer J.C. and Martin F. Laser Pulse Contrast Ratio Cleaning in 100 TW Scale Ti: Sapphire Laser Systems // *Laser Systems for Applications.* 2011. P. 139-154.
6. Cheng, Ya., Sugioka K., Midorikawa K. Microfabrication of 3D hollow structures embedded in glass by femtosecond laser for Lab-on-a-chip applications // *Applied Surface Science.* 2005. V. 248. P. 172-176.
7. Block M., Jahns J., Grunwald R. Few-cycle high-contrast vortex pulses // *Optics Letters.* 2012. V. 37, no.18. P. 3804-3806.
8. El_Mashade M.B., Nady M. Analysis of Ultra-Short Pulse Propagation in Non-linear Optical Fiber // *Progress In Electromagnetics Research B.* 2009. V. 12. P. 219-241.
9. Liu B., Lu X., Liu Q., Sun S., Li L., Liu X., Ding B., Hu B. Ultraviolet conical emission produced by high-power femtosecond laser pulse in transparent media // *Applied Physics B.* 2012. V. 108. P. 493-500.
10. Piglosiewicz B., Sadiq D., Mascheck M., Schmidt S., Silies M., Vasa P., Lienau C. Ultrasmall bullets of light - focusing few-cycle light pulses to the diffraction limit // *Optics Express.* 2011. V. 19, no. 15. P. 14451-14463.
11. Lee J., Kim H., Kang N., Jung H. Effective medium approach of left-handed material using a dispersive FDTD method // *IEEE Transaction of Magnetics.* 2005. V. 41, no. 5. P. 1484-1487.
12. Couairon A., Sudrie L., Franco M., Prade B., Mysyrowicz A. Filamentation and damage in fused silica induced by tightly focused femtosecond laser pulses // *Physical Review B.* 2005. V. 71. P. 125435-125441.

Информация об авторе

Козлова Елена Сергеевна, аспирант кафедры технической кибернетики, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва

(национальный исследовательский университет). E-mail: kozlova.elena.s@gmail.com. Область научных интересов: дифракционная оптика, численные методы.

**SIMULATION OF ULTRASHORT PULSE TRANSMISSION
IN A CHAIN OF FUSED SILICA MICROSPHERES**

© 2014 E. S. Kozlova

Samara State Aerospace University, Russian Federation

The paper is devoted to the simulation of ultrashort pulse propagation in waveguides of two types. The first type (type 1) represents an ordinary waveguide made of cylindrically shaped fused silica without coating. The second type (type 2) consists of microspheres made of the same fused silica following one another. A three-parameter Sellmeyer model is used to take into account the dependence of electrical permittivity on the frequen-

cy of radiation. The coefficients of pulse broadening and amplification as well as the coefficient of the pulse spectrum narrowing have been calculated. The numerical simulation using the FDTD method which takes into account the frequency dependence of the permittivity and implemented in the FullWAVE software package showed that there is no temporal broadening in the case of propagation of linearly polarized ultrashort pulse 3.55 fs long with a central wavelength of 532 nm in a waveguide consisting of a sequence of fused silica microspheres with the radius of 1 mkm, while there is a two-fold temporal broadening of the pulse in the case of transmission of this pulse in a conventional silica cylindrical waveguide.

Ultrashort pulse, permittivity, Sellmeyer model, information transmission.

About the author

Kozlova Elena Sergeevna, postgraduate student of the Department of Mathematics and Computer Science, Samara State Aerospace University, Russian Federation. E-mail:

kozlova.elena.s@gmail.com. Area of Research: diffractive optics and numerical methods.

УДК 004.896

ЯЗЫКИ ОПИСАНИЯ ОНТОЛОГИЙ ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ПРЕДМЕТНЫХ ОБЛАСТЕЙ

© 2014 Е. Е. Буракова, Н. М. Боргест, М. Д. Коровин

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Основной задачей языков описания онтологий является описание семантики данных предметной области. В настоящее время наиболее распространённой формой представления семантически связанных данных является онтология, состоящая из набора концептов предметной области и связей между ними. В настоящей статье рассмотрены проблемы существующих инструментариев для создания хранилищ семантически связанных технических данных и предлагаемые пути их решения с помощью онтологий. Описан современный подход к классификации средств и подходов онтологического инжиниринга. Выделены сильные и слабые стороны описанных подходов. Приведён краткий обзор языков описания онтологий и примеры их применения в аэрокосмической отрасли. Рассмотрены проблемы применения формализованных языков при описании технических предметных областей. Выделены XML и HTML как наиболее широко распространённые языки описания предметных областей в современных информационных системах. Подробно описан OWL как наиболее перспективный язык описания онтологий, рекомендованный консорциумом W3C. Описаны разновидности языка OWL и их применимость к решению различных задач описания технических предметных областей с учётом ограничений описательной способности и сложности синтаксиса каждой версии. Приведены примеры использования языка OWL в технических предметных областях.

Онтология, Semantic web, формальные языки, жизненный цикл, инженерия, предметная область, базы данных, языки описания онтологий.

Введение

Для формализации и структурирования информации с целью её последующего использования в рамках единого информационного пространства предметной области (ПрО) необходимо создание единых баз данных (БД), что осложняется гетерогенностью источников и хранилищ данных, наличием неструктурированной информации, содержанием в хранилищах данных противоречивой либо дублирующей информации, необходимостью обеспечения совместного использования данных несколькими пользователями. Проблема создания единых БД может быть решена при помощи онтологического подхода.

Онтологический инжиниринг является подобластью инженерных знаний, изучающей методы и методологии построения онтологий, процесс разработки и жизненный цикл (ЖЦ) онтологий [1], комплекты инструментов и языки, которые поддерживают эти методы. Язык опи-

сания онтологии – это формальный язык, предназначенный для создания информационных моделей в рамках некоторой ПрО.

В разнообразии средств и подходов к созданию информационных систем выделяются три основные концепции создания языков описания онтологий: формализованные технические языки на базе естественных, машинно-ориентированные языки, универсальные языки.

Формализованные технические языки

Глобализация современных промышленных комплексов, характерная для производства высокотехнологичной продукции, зачастую приводит к возникновению коммуникативных проблем у персонала, говорящего на разных языках. В настоящее время английский язык претендует на роль универсального средства деловой коммуникации, однако он обладает рядом недостатков, присущих есте-

ственным языкам. Наиболее серьёзным его недостатком является возможность неоднозначной трактовки текста, что недопустимо в сфере профессиональной коммуникации. В настоящий момент существует несколько успешных проектов создания формализованных языков на базе естественных. Для всех этих языков характерен набор правил формализации, используемых для обеспечения полноты и однозначности семантики текста. Для большинства формализованных технических языков характерен следующий набор правил [2–5]:

- использование слова только в одном заранее оговоренном значении;
- использование исключительно простых предложений;
- запрет на постановку подлежащего в конец предложения;
- запрет на изменение инвертированного порядка частей составного сказуемого;
- запрет постановки прямого дополнения перед сказуемым;
- запрет на использование причастных оборотов в качестве синтаксических оборотов.

Формализация языка значительно облегчает автоматическую обработку текста. В качестве примера рассмотрим регламентированные языки, созданные под эгидой ассоциации АЕСМА (Европейская ассоциация аэрокосмической промышленности), а также язык Gellish [2, 3]:

STE (Simplified Technical English) [4] – это формализованные спецификации написания текстов для повышения их семантической прозрачности. В STE ограничивается набор используемых времён, форм глаголов, определён разрешённый и запрещённый список слов для использования. Спецификация в первую очередь предназначена для написания инструкций. ASD (AeroSpace and Defence Industries Association of Europe) STE100 (ранее известный как АЕСМА Simplified English) был создан как регламентированный язык при участии АЕСМА и АИА (Американская ассоциация аэрокосмической промыш-

ленности) для написания эксплуатационной документации в аэрокосмической и оборонной промышленности. ASD STE100 имеет строгую грамматику и синтаксические правила, а также ограниченный лексический состав. Сегодня этому стандарту следуют члены АЕСМА и АИА, среди которых такие компании, как British Aerospace, Airbus, The Boeing Company, Lockheed Martin, Rolls Royce, Dassault и Saab Aerosystems и другие [5]. Ниже приведены примеры сравнения текстов с одинаковым семантическим смыслом, написанных на естественном языке и с использованием стандарта STE.

STE: «*Stop the power supply*» (Остановите источник питания).

Non-STE: «*Turn off the power*» (Выключите энергию).

Объяснение: «Turn» используется также для обозначения действия, выражающего поворот чего-то вокруг своей оси. Если не требуется повернуться вокруг своей оси для отключения питания, то не используется слово «Turn».

STE: «*Set the rotary switch to INPUT*» (Установите поворотный переключатель в ВВОД).

Non-STE: «*Rotary switch to INPUT*» (Поворотный переключатель в ВВОД).

Объяснение: нельзя пропускать глаголы (для сокращения длины предложения), читатель не будет знать, что происходит действие над выключателем.

STE: «*Make sure that the oxygen tubes are fully clean. This will help to prevent contamination and explosion*» (убедитесь в том, что кислородные трубки полностью чисты. Это может помочь предотвратить загрязнение и взрыв).

Non-STE: «*Extreme cleanliness of oxygen tubes is imperative*» (экстремально необходима чистота кислородных труб).

Объяснение: необходима конкретная информация о предупреждении или предостережении. Важно донести до пользователя точную и чёткую информацию о том, что может случиться, чтобы привлечь немедленно его внимание.

STR (Simplified Technical Russian) - упрощённый технический русский язык. При экспорте российской аэрокосмической промышленности необходима документация на английском языке, что создало проблему с переводом документов. После успешной реализации STE в российской компании BETA AIR в партнёрстве с компанией Tedopres был разработан язык STR, который широко используется в аэрокосмической отрасли в России [6].

Gellish – язык для полной и однозначной спецификации бизнес- и физических процессов, продуктов и услуг; для представления информации о приобретении, изготовлении, монтаже, эксплуатации и хранении продукции; для обмена информацией между компьютерными системами. Gellish используется при разработке информационных систем на всех этапах ЖЦ.

Машинно-ориентированные языки

Для решения проблемы создания машиночитаемых баз знаний необходимы специализированные языки описания се-

мантики. Работы в этом направлении ведутся с начала 70-х годов [7]. Инструментами первых попыток создания онтологий были специализированные машинные языки онтологического описания. По типу применяемой логики их классифицируют на языки: фреймово-продукционные, дискриптивной логики и логики первого порядка [8].

Широко распространёнными представителями машинных языков являются KIF (Knowledge Interchange Format) [9] и CycL (Cycorp Language) [10].

KIF – универсальный машинно-ориентированный язык для обмена данными в рамках выбранной Про. KIF имеет декларативную семантику и логическую всесторонность (т.е. предусматривает выражение произвольных предложений в исчислении предикатов первого порядка). Язык обеспечивает представление знаний, используется для описания объектов, функций и отношений. KIF – это язык продукционного типа, где каждая продукция записывается в виде импликации, например:

```
(subclass ServiceModel ContentBearingObject)
(documentation ServiceModel "The service model tells how the service works; ")
(=>
  (instance ?Model ServiceModel)
  (exists (?Service)
    (implements AModel ?Model ?Service)))
(=>
  (and
    (instance ?Model ServiceModel)
    (implements AModel ?Model ?Service)
    (instance ?Using ?UsingAService)
    (patient ?Using ?Service))
  (represents ?Model ?Using))
```

Первые две строки определяют класс *ServiceModel*. Первая продукция указывает, что каждой модели соответствует некоторый сервис. Вторая продукция говорит о том, что модель описывает взаимодействие пользователя с сервисом [11].

CycL – формальный язык, синтаксис которого базируется на логике первого

порядка. Объекты, составляющие словарь CycL, объединяются в выражения, которые используются для создания утверждений в Сус БД. Исходный код CycL находится в свободном доступе по лицензии OpenCyc. Однако для работы большинства приложений CycL необходимо дополнительно лицензировать сервер Apache.

Общим недостатком этой группы языков является сложность их синтаксиса и необходимость в специальных инструментах для интерпретации. Этому недостатку лишены универсальные языки, которые, сохраняя описательную полноту для компьютерных систем, обеспечивают семантическую прозрачность для человека.

Универсальные языки

XML (Extensible Markup Language) [12] – рекомендованный W3C (World Wide Web Consortium – консорциум Всемирной паутины) язык разметки данных. Спецификация XML описывает XML-документы и частично описывает поведение XML-процессоров (программ, читающих XML-документы и обеспечивающих доступ к их содержимому). XML разрабатывался как язык создания машиночитаемых документов с простым формальным синтаксисом, обладающим семантической прозрачностью для комфортного восприятия человеком. Основ-

ной сферой применения языка XML является Интернет.

HTML (HyperText Markup Language) [13] – стандартный язык разметки документов во Всемирной паутине. Большинство веб-страниц содержат описание разметки на языке HTML. Язык HTML интерпретируется браузерами и отображается в виде документа в удобной для человека форме. Язык XHTML (Extensible Hypertext Markup Language) [14] является более строгим вариантом HTML, он следует всем ограничениям XML, и фактически XHTML можно воспринимать как приложение языка XML к области разметки гипертекста.

В качестве примера рассматривается ПрО-справочник по моделям самолётов, который представлен набором HTML-страниц (по одной на каждую модель). В примере выделяются пассажирские и транспортные самолёты. Объединение этих сведений показано ниже на странице `aircrafts.html` [15]:

Страница `aircrafts.html`

```
<SCRIPT language = ONTODEF>
CATEGORY Firm
{
  SCALAR name;
  SCALAR country;
}
CONCEPT Ilushin IMPLEMENTS Firm;
SET Ilushin .name = 'И';
SET Ilushin .country = 'Russia';
CONCEPT Tupolev IMPLEMENTS Firm;
SET Tupolev .name = 'Ту';
SET Tupolev.country = 'Russia';
CATEGORY Plane
{
  SCALAR name DEF 'Plane'; // Название самолёта
  LIST modifications DEF []; // Список возможных модификаций
  SCALAR type; // Тип самолёта (сверхзвуковой/дозвуковой)
  SCALAR speed; //Скорость самолёта
}
IF Plane.speed<=1250 THEN Plane.type = 'subsonic';
IF Plane.speed>1250 THEN Plane.type = 'supersonic';
SET Plane.type = 'speed is unknown';
CATEGORY PassengerPlane EXTENDS Plane
```

```

{
  SCALAR passengers; // Число пассажиров
}
CATEGORY TransportPlane EXTENDS Plane
{
  SCALAR mass; // Масса полезной нагрузки
}
</SCRIPT>

```

На странице aircrafts.html указаны: наименование, страна производитель, список возможных модификаций, тип самолёта, скорость самолёта, число пассажиров, масса полезной нагрузки. Любая

страница, содержащая информацию о конкретном самолёте, может быть дополнена онтологическим описанием, например, следующим образом:

Страница tu154.html

```

<USE 'aircrafts.html' AS aircraft >
<CONCEPT tu154 IMPLEMENTS @ aircraft ~PassengerPlane>
<ASSIGN tu154.name> Tu-154 </ASSIGN>
<SET tu154.firm = @Tupolev>
<SET tu154.speed = 900>
<SET tu154.modifications = $['Tu-154A', 'Tu-154M']>
<SET tu154.passengers = 150>

```

Таким образом, создаётся возможность для организации предметной онтологии, состоящей из некоторого числа HTML-страниц. Например, страница самолёта Ту-154 находится по названию самолёта:

```

SEARCH
USE 'aircrafts.html' AS aircrafts
WHERE (@aircrafts~Plane.name == 'Tu-154')
      AND (IMPLEMENTS(PassengerPlane))

```

Или зная, например, что искомый самолёт дозвуковой и берёт на борт до 150 человек:

```

SEARCH
USE 'aircrafts.html' AS aircraft
WHERE (@aircraft~Plane.type == 'subsonic')
      AND(@aircraft~PassengerPlane.passengers == 150)

```

Пример поиска демонстрирует элемент «интеллектуальности» проводимого

поиска – информация о том, что самолёт Ту-154 дозвуковой, явно нигде не указывалась, а была выведена логически по правилу, общему для всех концептов, прямо или косвенно представляющих категорию Plane [15].

RDF (Resource Description Framework) [16] – это разработанная W3C модель представления данных для машинной обработки. RDF является частью концепции семантической паутины (SemanticWeb). RDFS (RDF Schema) [17] – расширение RDF, которое используется для определения таксономий классов, свойств и других данных. RDF и RDFS позволяют работать с метаданными.

UML (Unified Modeling Language) [18] – язык графического описания для объектного моделирования в области разработки программного обеспечения. UML является языком широкого профиля, использующим графические обозначения для создания абстрактной модели информационной системы, называемой UML-моделью. UML был создан для описания,

визуализации, проектирования и документирования программных систем.

SysML (Systems Modeling Language) [19] – предметно-ориентированный язык моделирования систем. Поддерживает определение, анализ, проектирование, проверку и подтверждение соответствия широкого спектра систем. SysML был разработан в рамках проекта специфика-

ции с открытым исходным кодом и имеет открытую лицензию для распространения и использования. Как язык, SysML является расширением языка UML. На рис. 1 как пример использования языка SysML показан блок *avMotion* многократно используемой динамической модели движения самолёта [19].

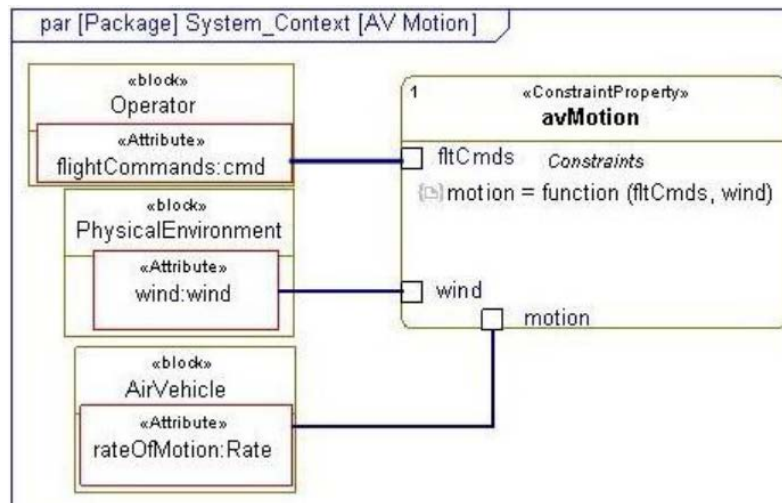


Рис. 1. Блок *avMotion* динамической модели движения самолёта на языке SysML [19]

Свойство ограничения для модели движение самолёта состоит из трёх блоков: Оператор, ФизическаяСреда, ЛетательныйАппарат. Внутри каждого блока имеется Атрибут со своими значениями. Линии, соединяющие параметры и атрибуты, являются обязательными операциями для выполнения полёта. Внутри *avMotion* параметры *ftCmds*, *wind* и *motion* являются переменными в логических выражениях. Функция

$$\text{rateOfMotion} = \text{function}(\text{wind}, \text{flightCommands})$$

задаёт название *function* для математической функции, для которой скорость движения является функцией *wind* (ветра) и *flightCommands* (команда полёта). Параметры не вносят новые значения в пространство состояний, они являются механизмом для ограничений между атрибутами.

SPARQL (SPARQL Protocol and RDF Query Language) [20] используется для представления запросов к разнообразным источникам данных, независимо от того, хранятся эти данные непосредственно в RDF либо представляются в виде RDF с помощью промежуточного программного обеспечения. SPARQL рекомендован консорциумом W3C в качестве одной из технологий семантической паутины. Результаты запросов SPARQL могут быть представлены в виде RDF-графов.

OWL (Web Ontology Language) [21] – язык для записи семантики ПрО в онтологиях, созданный в рамках проекта SemanticWeb. Язык OWL позволяет описывать классы, присущие веб-документам и приложениям, и отношения между ними. OWL рекомендован W3C и имеет 3 диалекта (подмножества терминов):

- OWL Lite – имеет наименьшую выразительную мощность, достаточную для решения простых задач.

• OWL DL – обладает выразительной мощностью, эквивалентной дескриптивной логике (разрешимой части логики предикатов первого порядка). Выразительности этого диалекта достаточно для решения большинства задач, встречающихся при проектировании онтологий. OWL DL имеет два важных свойства: полнота (все заключения являются вычислимыми) и разрешимость (все вычисления завершаются в конечное время). В OWL DL классу запрещено быть экземпляром.

• OWL Full – наиболее выразительный диалект, эквивалентен RDF, но не га-

```
<owl:Class rdf:ID="самолёт">
  <rdfs:subClassOf rdf:resource="#летательный_аппарат"/>.
</owl:Class>
```

Онтологии могут быть использованы для создания универсальной информационной модели, которая позволяет изучать информационное пространство с точки зрения элементов, ассоциаций между элементами, свойства предметов и ссылки на документацию, которая описывает и определяет их. Онтология и таксономия зависят от физических элементов, которые они представляют, и могут быть разработаны совместно.

В документации по OWL приведён пример увязки разнородных информационных моделей в рамках универсальной модели для аэрокосмической отрасли, где

$$\text{biplane}(X) \Rightarrow \text{CardinalityOf}(\text{wing}(X)) = 2$$

$$\text{wingspar}(X) \text{ AND } \text{wing}(Y) \text{ AND } \text{isComponentOf}(X, Y) \Rightarrow \text{length}(X) < \text{length}(Y)$$

В первой строке ограничивается количество крыльев у самолёта схемы «биплан», во второй строке указано, что лонжерон крыла является частью крыла, поэтому размах лонжерона должен быть меньше размаха крыла.

В разработанной NASA информационной базе OWL, описывающей проект полёта Phoenix на Марс с помощью языка запросов SPARQL, можно решать поисковые задачи вида [25]:

рантирует, что логический вывод в такой онтологии будет вычислимым. В частности, в Full-диалекте классы могут одновременно выступать в роли класса и экземпляра [22].

С помощью OWL между объектами можно устанавливать иерархические отношения типа «общее-частное». Для этого используется конструкция `rdfs:subClassOf`. Например [23], определение класса «самолёт» и указание на то, что самолёт является частным случаем летательного аппарата, выглядит следующим образом:

основные пользователи: инженер технического обслуживания, который ищет информацию, относящуюся к определенной части (например, лонжерон крыла), и инженер-конструктор, который решает задачу повторного использования конкретного сборочного узла.

Поддержка универсальной модели содержит определения ограничений для всех её представлений. Эти ограничения могут быть использованы для улучшения поиска или проверки их согласованности. Ниже представлен пример ограничений в синтаксисе языка OWL [24]:

▪ *Простой запрос:* найти URI (Uniform Resource Identifier — унифицированный идентификатор ресурса) и вывести имя для компонента "Spacecraft System".

SPARQL Запрос:

```
select distinct ?cid ?cn where {
  ?c rdf:type mission:Component.
  ?c base:identifier ?cid.
  ?c base:canonicalName ?cn
  filter (?cn = "Spacecraft System")}
```

Результат:

C.2 *Spacecraft System* (C.2 – идентификатор, *Spacecraft System* – имя компонента)

- *Сложный запрос*: найти и вывести идентификаторы и имена для всех функций, выполняемых компонентом, имя которого "Spacecraft System"

SPARQL Запрос:

```
select distinct ?fid ?fn where {
?c rdf:type mission:Component.
?c base:canonicalName ?cn.
?c mission:performs ?f.
?f base:identifier ?fid.
?f base:canonicalName ?fn.
filter (?cn = "Spacecraft System")}
```

Результат:

F.1.1.2.1 Transport Payload to Martian Vicinity (транспортная грузоподъемность вблизи Марса)

F.1.2.2.3 Execute Commands (выполнение команд)

F.1.2.2.3 Maintain Communication (поддержание связи)

F.1.1.2 Transport Payload to Martian Surface (транспортная грузоподъемность на поверхности Марса)

F.1.2.2 Maintain Operational State (поддержание рабочего состояния)

В одной из последних инициатив INCOSE (международная организация, объединяющая системных инженеров и занимающаяся развитием системной инженерии) – «Systems Engineering Vision

2020» декларируются принципы модели ориентированного подхода к системному инжинирингу (СИ), который получил название MBSE (Model-based Systems Engineering) [26]. MBSE – это формальное применение моделирования для поддержки системных требований, разработки, анализа, верификации и валидации систем в фазе концептуального проектирования и последующих фазах ЖЦ системы. Разработку принципов СИ и MBSE для космических систем (КС) осуществляют организации NASA, ECSS, INCOSE, OMG и др. Стандарты, спецификации и рекомендации этих организаций являются источником информации для формирования понятий онтологии СИ КС. В настоящее время работы по инженерии знаний и онтологии в области КС проводятся NASA в рамках проекта NExIOM (NASA Exploration Information Ontology Model) [27]. В качестве инструмента для создания онтологии СИ КС предполагается использовать программную среду проектирования онтологий Protégé [28], которая включает редактор онтологий, позволяющий проектировать онтологию, разворачивая таксономическую структуру классов и слотов. Ниже приведены фрагменты сгенерированных в Protégé OWL-описаний концептов, определений классов и аксиом онтологии СИ КС. Классы «SYSTEMS – ENGINEERING» и «REQUIREMENT – ENGINEERING» определяются следующим образом:

```
<owl:Class rdf:ID="Systems_engineering"/>
<owl:Class rdf:ID="Requirement_engineering"/>
```

Определение общего класса онтологии «SYSTEMS – ENGINEERING» и принадлежность его классу «THING» выражается так:

```
<rdfs:domain>
<owl:Class>
<owl:unionOf rdf:parseType="Collection">
<rdf:Description rdf:about="http://www.w3.org/2002/07/owl#Thing"/>
<owl:Class rdf:about="#Systems_engineering"/>
</owl:unionOf>
</owl:Class>
</rdfs:domain>
```

Аксиомы и онтологии СИ КС записываются в виде:

```
<owl:Class rdf:about="#Functional_requirement">
<rdfs:subClassOf rdf:resource="#Requirement_engineering"/>
</owl:Class>
<owl:Class rdf:about="#Requirement_engineering">
<rdfs:subClassOf rdf:resource="#Systems_engineering"/>
</owl:Class>
```

OWL-онтологию (документ, описанный на языке OWL) СИ КС при необходимости можно преобразовать в XML-документ и использовать его для обмена в распределённой компьютерной системе поддержки СИ. OWL-документ также можно конвертировать в XML-формат для обмена моделями и далее в модель на языке SysML (UML). Следовательно, в зависимости от целей конкретных процессов СИ и на различных этапах ЖЦ системы можно использовать языки OWL и SysML (рис. 2).

В Национальном авиационном университете Украины рассмотрели задачу применения онтологии при описании информационно-программного обеспечения для поддержки и эксплуатации авиационной техники. На основе вербального описания набора взаимосвязанных терминов: аэропорт, авиационная деятельность, объекты авиационной деятельности, безопасность авиации, аэронавигационное оборудование – было сформировано графическое представление (рис. 3) и аналитическое описание [29].

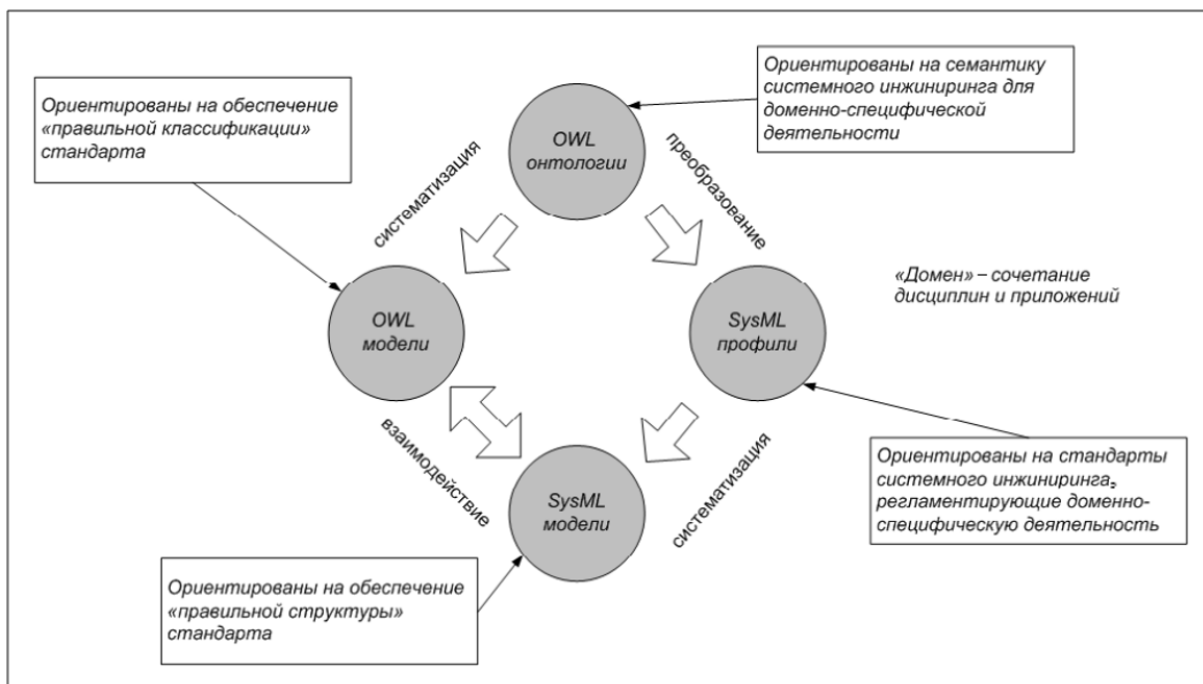


Рис. 2. Взаимосвязь между OWL- и SysML-моделями [26]

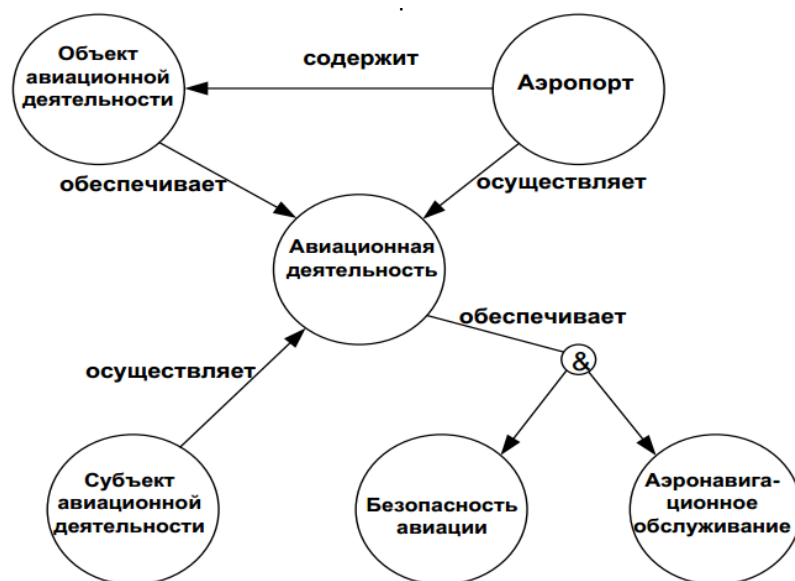


Рис. 3. Графическая схема термина «Авиационная деятельность» [29]

Системы онтологии «авиационной деятельности» могут быть представлены в языках XML, RDF.

```

<rdf:Description>
  <rdf:type rdf:resource="&owl:AllDisjointClasses"/>
  <owl:members rdf:parseType="Collection">
    <rdf:Description
      rdf:about="&Ontology1086052309921;Аэронавигационное_обслуживание"/>
    <rdf:Description rdf:about="&Ontology1086052309921;Аэропорт"/>
    <rdf:Description
      rdf:about="&Ontology1086052309921;Безопасность_авиации"/>
    <rdf:Description
      rdf:about="&Ontology1086052309921;Объекты_авиационной_деятельности"/>
    <rdf:Description
      rdf:about="&Ontology1086052309921;Субъект_авиационной_деятельности"/>
  </owl:members>
</rdf:Description>
</rdf:RDF>
  
```

В Самарском государственном аэрокосмическом университете на кафедре конструкции и проектирования летательных аппаратов разрабатывается пилотный проект работа-проектанта самолёта. Тезаурус проектанта, созданный на языке OWL, служит семантической основой при

согласовании разнородных информационных моделей в среде предварительного проектирования самолёта. Фрагмент структуры тезауруса, разрабатываемого в онторедаторе Protégé, на примере геометрии крыла самолёта представлен на рис. 4 [30].

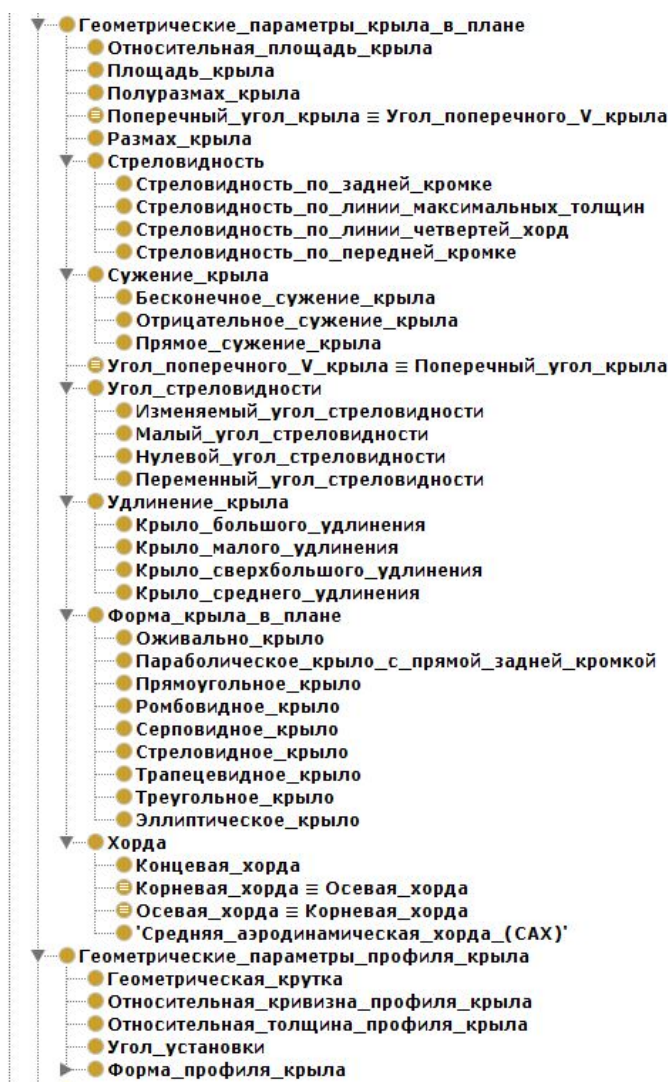


Рис. 4. Описание геометрических параметров крыла самолёта в Protégé [30]

Заключение

В рамках онтологического подхода решаются задачи создания единых баз данных сложных предметных областей в условиях гетерогенных информационных полей. Язык описания онтологий в значительной степени влияет на характеристики создаваемой информационной систе-

мы. С учётом требований к расширяемости и поддерживаемости, предъявляемых к базам данных технической информации, предпочтительными являются языки, синтаксис которых близок к естественному языку при сохранении выразительных возможностей формальной логики, такие как OWL или XML.

Библиографический список

1. Ontology Summit 2013 Commu-
nique. Towards Ontology Evaluation across
the Life Cycle. Available at:
[http://ontolog.cim3.net/cgi-
bin/wiki.pl?OntologySummit2013_Communi-
que](http://ontolog.cim3.net/cgi-bin/wiki.pl?OntologySummit2013_Communi-
que).
2. Conservative groupoids recognize
only regular languages. Available at:
[http://www.academia.edu/9200925/Conserva-
tive_groupoids_recognize_only_regular_lang-
uages_Extended_Version_](http://www.academia.edu/9200925/Conserva-
tive_groupoids_recognize_only_regular_lang-
uages_Extended_Version_).
3. Gellish A. Product Modeling Lan-
guage. Available at

<http://sourceforge.net/apps/trac/gellish/#a5.1>
TheGellishlanguage.

4. Orlando Chiarello, Dr. Knezevic Jezdimir The Role of Simplified Technical // English in Aviation Maintenance. 2013. No. 2. P. 36-38.

5. ASD Simplified Technical English Specification ASD-STE100. Available at: <http://www.asd-ste100.org>.

6. Simplified English. Available at: <http://www.aecma.ru/>.

7. Semantic Information Modeling in Formal English. Available at: <http://www.gellish.net/>.

8. Oscar Corcho A Roadmap to Ontology Specification Languages. Available at: http://www.cs.man.ac.uk/~ocorcho/documents/ekaw00_CorchoGomezPerez.pdf.

9. Казекин М.М. История языков представления онтологий. http://www.ict.edu.ru/ft/006054/2008_4_03-11.pdf.

10. Knowledge Interchange Format. Available at: <http://www.ksl.stanford.edu/knowledge-sharing/kif/>.

11. CycL Syntax. Available at: <http://www.cyc.com/cyc/cycl/syntax>.

12. Негода Д. Языки представления онтологий. http://callisto.nsu.ru/documentation/CSIR/qmeta/rus_237.pdf.

13. Share: News and Opinions about HTML. Available at: <http://www.w3.org/html/>.

14. Steven Pemberton. XHTML 1.0 The Extensible HyperText Markup Language. Available at: <http://www.w3.org/TR/xhtml1/>.

15. Soshnikov D. Software Toolkit for Building Embedded and Distributed Knowledge-Based Systems // In Proceedings of the 2nd International Workshop on Computer Science and Information Technologies CSIT' 200. Ufa, 2000. P. 103-111.

16. Кляйн Грахам. Среда описания ресурса (RDF): Понятия и абстрактный синтаксис. http://www.w3.org/2007/03/rdf_concepts_ru/

17. Brickly Dan RDF Vocabulary Description Language 1.0: RDF Schema. Available at: <http://www.w3.org/TR/2004/REC-rdf-schema-20040210>.

18. Unified Modeling Language. Available at: <http://www-01.ibm.com/software/rational/uml/>.

19. SysML Open Source Specification Project. Available at: <http://www.sysml.org/>.

20. Эрик Прудхоммоукс. Язык запросов SPARQL для RDF. <http://www.cambridgesemantics.com/semantic-university/sparql-by-example>.

21. Kalyanpur A. OWL: Capturing Semantic Information using a Standardized Web Ontology Language // Multilingual Computing & Technology Magazine. 2004. V. 15, issue 7. Available at: <http://www.mindswap.org/papers/MultiLing.pdf> (accessed 20.05.2011).

22. OWL Web Ontology Language Guide. Available at: <http://www.w3.org/TR/owl-guide/>.

23. OWL Web Ontology Language Use Cases and Requirements. Available at: <http://www.w3.org/TR/2004/REC-webont-req-20040210/#onto-def>.

24. Трофимов И.В. Эволюция выразительных способностей языка OWL. http://psta.psiras.ru/read/psta2011_4_85-94.pdf.

25. Steven Jenkins. Ontologies and Model-Based Systems Engineering // INCOSE IW 2010 MBSE Workshop. California Institute of technology: Jet Propulsion Laboratory. February 2010.

26. NASA Exploration Information Ontology Model (NExIOM) primer and vision. National Aeronautics and Space Administration, Headquarters Washington DC 20546. Washington, 2005. 18 p.

27. Kossiakoff Alexander. Systems engineering: principles and practice. Available at: http://www.incose.org/ProductsPubs/pdf/SEVision2020_20071003_v2_03.pdf.

28. Welcome to protégé. Available at: <http://protege.stanford.edu/>.

29. Луцкий М.Г. Розробка онтології безпеки авіації // Інженерія програмного забезпечення. 2010. № 4. С. 56-62.

30. Боргест Н.М., Громов А.А., Морено Р.Х., Коровин М.Д., Шустова Д.В.,

Одинцова С.А., Князихина Ю.Е. Робот-проектант: фантазия или реальность // Онтология проектирования. 2012. № 4. С. 73-94.

Информация об авторах

Боргест Николай Михайлович, кандидат технических наук, профессор кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: borgest@yandex.ru. Область научных интересов: онтология проектирования, системы автоматизированного проектирования.

Буракова Екатерина Евгеньевна, студентка, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный ис-

следовательский университет). E-mail: bee_2004@mail.ru. Область научных интересов: системы автоматизированного проектирования, онтология производственной сферы.

Коровин Максим Дмитриевич, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: maks.korovin@gmail.com. Область научных интересов: системы автоматизированного проектирования, искусственный интеллект.

ONTOLOGY DESCRIPTION LANGUAGES FOR HIGH-TECH FIELDS OF APPLIED ENGINEERING

© 2014 E. E. Burakova, N. M. Borgest, M. D. Korovin

Samara State Aerospace University, Russian Federation

The main task of ontology description languages is to describe semantics of domain data. Nowadays, ontology is the most common form of representation of semantically-interconnected data. Ontology consists of a set of concepts in a domain and relations between them. In this paper we consider the problems of existing toolkits for creating semantically-interconnected data storages for engineering domains and propose a solution in the form of an ontology. A modern approach to the classification of assets for ontology engineering is presented. The strengths and weaknesses of the approaches described are highlighted. The paper describes problems of structuring data in the engineering domain and the ways they can be solved using ontologies. A brief review of the common ontology description languages is given. Examples of the applied ontological approach in the database creation in the aerospace engineering domain are presented. XML and HTML are highlighted as the most widespread languages in the description of subject areas in modern information systems. The OWL ontology description language is described in detail as the most promising ontology description language recommended by the W3C. Varieties of the OWL language are described in terms of their applicability to solving various problems of describing engineering domains taking into account the limitations of descriptive ability and complexity of the syntax of each version. Examples of the use of the OWL language in engineering domains are given.

Ontology, semantic web, formal languages, life cycle, engineering, data domain, databases, ontology description languages.

References

1. Ontology Summit 2013 Communique. Towards Ontology Evaluation across the Life Cycle. Available at: http://ontolog.cim3.net/cgi-bin/wiki.pl?OntologySummit2013_Communique.
2. Conservative groupoids recognize only regular languages. Available at: http://www.academia.edu/9200925/Conservative_groupoids_recognize_only_regular_languages_Extended_Version_.
3. Gellish A. Product Modeling Language. Available at: <http://sourceforge.net/apps/trac/gellish/#a5.1> TheGellishlanguage.
4. Orlando Chiarello, Dr. Knezevic Jezdimir The Role of Simplified Technical // English in Aviation Maintenance. 2013. No. 2. P. 36-38.
5. ASD Simplified Technical English-Specification ASD-STE100. Available at: <http://www.asd-ste100.org/>.
6. Simplified English. Available at: <http://www.aecma.ru/>.
7. Semantic Information Modeling in Formal English. Available at: <http://www.gellish.net/>.
8. Oscar Corcho. A Roadmap to Ontology Specification Languages. Available at: http://www.cs.man.ac.uk/~ocorcho/document/s/ekaw00_CorchoGomezPerez.pdf.
9. Kazekin M.M. Istoriya yazikov predstavleniya ontologii [History of the ontology description languages]. Available at: http://www.ict.edu.ru/ft/006054/2008_4_03-11.pdf.
10. Knowledge Interchange Format. Available at: <http://www.ksl.stanford.edu/knowledge-sharing/kif/>.
11. CycL Syntax. Available at: <http://www.cyc.com/cyc/cycl/syntax>.
12. Negoda D. Yaziki predstavleniya ontologii [Ontology description languages]. Available at: http://callisto.nsu.ru/documentation/CSIR/qmeta/rus_237.pdf.
13. Share: News and Opinions about HTML. Available at: <http://www.w3.org/html/>.
14. Steven Pemberton. XHTML 1.0 The Extensible Hyper Text Markup Language. Available at: <http://www.w3.org/TR/xhtml1/>.
15. Soshnikov D. Software Toolkit for Building Embedded and Distributed Knowledge-Based Systems // In Proceedings of the 2nd International Workshop on Computer Science and Information Technologies CSIT' 2000. Ufa, 2000. P. 103-111.
16. Klein Graham. Resource description framework (RDF): Concepts and basic syntax. Available at: http://www.w3.org/2007/03/rdf_concepts_ru/
17. Brickly Dan. RDF Vocabulary Description Language 1.0: RDF Schema. Available at: <http://www.w3.org/TR/2004/REC-rdf-schema-20040210/>.
18. Unified Modeling Language. Available at: <http://www-01.ibm.com/software/rational/uml/>.
19. SysML Open Source Specification Project. Available at: <http://www.sysml.org/>.
20. Prudhommuks Eric. SPARQL query language for RDF. Available at: <http://www.cambridgesemantics.com/semantic-university/sparql-by-example>.
21. Kalyanpur A. OWL: Capturing Semantic Information using a Standardized Web Ontology Language // Multilingual Computing & Technology Magazine. 2004. V. 15, issue 7. Available at: <http://www.mindswap.org/papers/MultiLing.pdf> (accessed 20.05.2011).
22. OWL Web Ontology Language Guide. Available at: <http://www.w3.org/TR/owl-guide/>.
23. OWL Web Ontology Language Use Cases and Requirements. Available at: <http://www.w3.org/TR/2004/REC-webontreq-20040210/#onto-def>.
24. Trofimov I.V. Evolutsiya vyrazitelnyh sposobnostey yazika OWL [Evolution of the OWL language description capabilities]. Available at:

http://psta.psir.ru/read/psta2011_4_85-94.pdf.

25. Steven Jenkins. Ontologies and Model-Based Systems Engineering // INCOSE IW 2010 MBSE Workshop. California Institute of technology: Jet Propulsion Laboratory. February 2010.

26. NASA Exploration Information Ontology Model (NExIOM) primer and vision. National Aeronautics and Space Administration, Headquarters Washington DC 20546. Washington, 2005. 18 p.

27. Alexander Kossiakoff. Systems engineering: principles and practice. Availa-

ble at:
http://www.incose.org/ProductsPubs/pdf/SEVision2020_20071003_v2_03.pdf.

28. Welcome to protégé. Available at: <http://protege.stanford.edu/>.

29. Lutzkiy M.G. Ontology development of aviation security // Engineering Software. 2010. No. 4. P. 56-62.

30. Borgest N.M., Gromov A.A., Moreno R.H., Korovin M.D., Shustova D.V., Odintsova S.A., Knyazihina Y.E. Robot-designer: fantasy and reality // Ontology of designing. 2012. No. 4. P. 73-94. (In Russ.)

About the authors

Burakova Ekaterina Evgenievna, undergraduate student, Department of Aircraft Design, Samara State Aerospace University, Russian Federation. E-mail: bee_2004@mail.ru. Area of Research: computer-aided design systems, ontology of the industrial sphere.

Borgest Nikolay Mihajlovich, Candidate of Science (Engineering), Professor, Department of Aircraft Design, Samara State Aerospace University, Russian Federation.

E-mail: borgest@yandex.ru. Area of Research: ontology of designing, artificial intelligence, computer-aided design systems.

Korovin Maksim Dmitrievich, post-graduate student, Department of Aircraft Design, Samara State Aerospace University, Russian Federation. E-mail: maks.korovin@gmail.com. Area of Research: computer-aided design systems, artificial intelligence.

УДК 004.932.2

МЕТОД СЖАТИЯ ЦИФРОВЫХ ПОЛУТОНОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ЦЕПЕЙ МАРКОВА С НЕСКОЛЬКИМИ СОСТОЯНИЯМИ

© 2014 Е. П. Петров, Н. Л. Харина, Е. Д. Ржаникова

Вятский государственный университет, г. Киров

В работе представлена математическая модель (ММ) цифрового полутонового изображения (ЦПИ) на основе двумерной цепи Маркова с несколькими состояниями, исследована её адекватность реальным изображениям. На основе ММ разработан метод сжатия ЦПИ. Метод предусматривает разделение ЦПИ на разрядные двоичные изображения с последующим объединением в плоскости по два разряда. Каждая плоскость рассматривается как двумерный случайный марковский процесс с несколькими ($N = 4$) состояниями. На основе теории условных марковских процессов осуществляется предсказание элементов плоскости. Все неверно предсказанные элементы помещаются в битовый поток и служат опорными для восстановления изображения. Для плоскостей, содержащих младшие разряды, предварительно осуществляется выделение областей, содержащих фон, близкий по структуре к белому гауссовскому шуму (БГШ), хранение этих областей не осуществляется, они заполняются *выборками* БГШ при восстановлении. По своей эффективности метод не уступает известным методам сжатия, основанным на дискретно-косинусном или вейвлет-преобразовании, не содержит вычислительных операций, позволяет работать с многоуровневыми изображениями (8 и более) без увеличения времени сжатия за счёт параллельной обработки плоскостей.

Математическая модель, цепь Маркова, цифровое полутоновое изображение, матрица вероятностей перехода, сжатие изображений.

Введение

Известно, что наиболее ёмким носителем информации являются изображения, однако их передача на расстояние требует большой полосы частот, что при современной перегруженности эфира практически недопустимо. Наиболее перспективным методом решения данной задачи является «сжатие» изображений за счёт сокращения статистической избыточности, присущей большинству полутоновых изображений. Сжатие позволяет уменьшить полосу частот при сохранении допустимого качества передаваемого изображения.

Проблема сокращения избыточности (сжатия) ЦПИ является актуальной, несмотря на большое количество исследователей, вовлечённых в её решение в России и за рубежом. Главные причины – повышение точности при восстановлении ЦПИ со сложными сценами, содержащими большое количество мелких деталей, имеющих часто важное значение, и минимизация объёма вычислительных ре-

сурсов на передающей стороне. Изображения, подвергнутые сжатию методами, основанными на БПФ и вейвлет-преобразованиях с отсечкой высокочастотных составляющих, принципиально не могут быть восстановлены без искажений и требуют большого количества вычислений на операцию сжатия, что не всегда допустимо в специальных приложениях обработки ЦПИ.

В работе предлагается метод внутрикадрового предсказания (сжатия) статистических цифровых полутоновых изображений, основанный на представлении g -разрядных ЦПИ двумерными цепями Маркова с несколькими состояниями ($N \geq 2$).

Для построения математической модели дискретных многоуровневых импульсных сигналов можно воспользоваться методом Монте-Карло с цепями Маркова [1, 2], реализованными по алгоритмам Метрополиса [3] или Гиббса [4]. Согласно алгоритму Гиббса генерация выборки из многомерного распределения заменяется на итерацию выборок из од-

номерных распределений, что является более простой задачей построения ММ одномерных и многомерных дискретных многоуровневых случайных процессов на основе цепей Маркова с несколькими состояниями.

ММ на основе одномерной цепи Маркова с несколькими состояниями

Для описания одномерной цепи Маркова с несколькими состояниями воспользуемся стандартным описанием [5] с заданным вектором вероятностей начальных состояний

$$P = \|p_1, p_2, \dots, p_N\|^T \tag{1}$$

и матрицей вероятностей переходов (МВП) из состояния M_i в состояние M_j ($i, j \in N$) за один шаг вида

$$\Pi = \begin{pmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \dots & \pi_{1N} \\ \pi_{21} & \pi_{22} & \dots & \pi_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \pi_{N1} & \pi_{N2} & \dots & \pi_{NN} \end{pmatrix}, \tag{2}$$

удовлетворяющим условиям нормировки

$$\sum_{i=1}^N \pi_{ij} = 1; j \in N \tag{3}$$

и согласованности

$$p_i = \sum_{j=1}^N p_j \pi_{ji}^*; i \in N, \tag{4}$$

где π_{ji}^* – элементы транспонированной матрицы (2).

На основе вектора (1) и МВП (2), используя метод статистических испытаний Монте-Карло с цепями Маркова [1], получен алгоритм генерации цепей Маркова с $N(N \geq 2)$ состояниями.

Алгоритм работы ММ состоит из следующих операций.

1. В первом такте работы модели берётся случайное число ξ_1 , равномерно распределённое на интервале $[0,1]$, и

определяется область вектора $p_i (i \in N)$, в которую оно попадает: если

$$\xi_1 \in p_i (i \in N),$$

то марковская цепь принимает состояние $\mu_1 = M_i$. Переход к п. 2.

2. В следующем такте работы случайное число $\xi_k (k = 2, \dots, n)$ сравнивается с вероятностью перехода π_{ii} . Если

$$\xi_k \in \pi_{ii},$$

то $\mu_k = M_i$, иначе, если

$$\xi_k \in \pi_{is} (s \in N, s \neq i),$$

то $\mu_k = M_s$.

Переход к п. 3.

3. Случайное число ξ_k сравнивается с вероятностью перехода π_{ss} . Если выполняется условие

$$\xi_{k+1} \in \pi_{ss},$$

то $\mu_{k+1} = M_s, i = s$, переход к п. 2, иначе, если

$$\xi_{k+1} \in \pi_{sr} (r \in N, r \neq s),$$

то $\mu_{k+1} = M_r, i = r$, если $k \leq n$, переход к п. 2, иначе, переход к п. 4.

4. Останов.

В качестве примера приведена реализация цепи Маркова с $(N = 4)$ с вектором вероятностей начальных состояний

$$P = \|p_1, p_2, p_3, p_4\|^T = \left\| \frac{1}{4} \quad \frac{1}{4} \quad \frac{1}{4} \quad \frac{1}{4} \right\|^T \tag{5}$$

и МВП вида

$$\Pi = \begin{pmatrix} 0,6 & 0,1 & 0,1 & 0,2 \\ 0,05 & 0,8 & 0,07 & 0,08 \\ 0,03 & 0,03 & 0,9 & 0,04 \\ 0,05 & 0,1 & 0,1 & 0,75 \end{pmatrix}. \tag{6}$$

Получена цепь Маркова, фрагмент которой имеет вид:

22211422213333333344444333333332211244422111333334211111.

Погрешность оценки элементов МВП (6), вычисленной по реализации цепи Маркова из 30 000 состояний, не превышает 0,5 %. С увеличением статистики точность оценок МВП растёт:

$$\hat{\Pi} = \begin{pmatrix} 0,607 & 0,09 & 0,11 & 0,201 \\ 0,047 & 0,798 & 0,068 & 0,082 \\ 0,031 & 0,032 & 0,89 & 0,038 \\ 0,052 & 0,101 & 0,093 & 0,751 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

**ММ на основе
двумерной цепи Маркова
с несколькими состояниями**

Наибольший интерес представляют ММ на основе двумерных цепей Маркова с несколькими состояниями, например, ММ статических ЦПИ. Для этого представим g -разрядное ЦПИ набором из g разрядных двоичных изображений (РДИ).

Будем полагать, что l -е ($l \in g$) РДИ представляет двумерный марковский процесс, полученный суперпозицией двух одномерных цепей Маркова с несколькими состояниями на ортогональной сетке. Пусть РДИ образует марковское случайное поле (СП) размером $m \times n$ (рис.1), представляющее двумерную цепь Маркова с N равновероятными $p_i = \frac{1}{N}$ ($i \in N$) состояниями M_i ($i \in N$) с МВП от состояния M_s к состоянию M_t ($s, t \in N$) по горизонтали и вертикали СП соответственно:

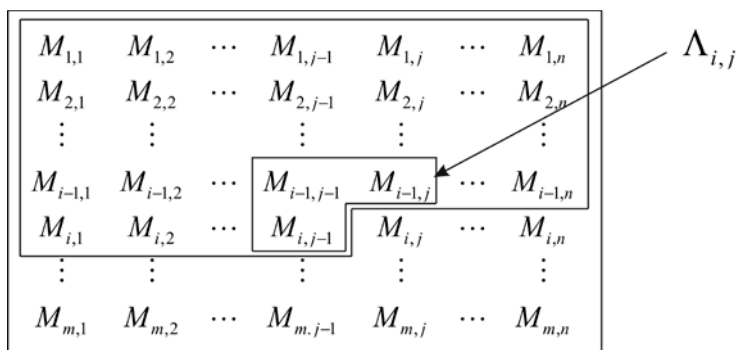


Рис. 1. Марковское случайное поле

$${}^1\Pi = \begin{pmatrix} {}^1\pi_{11} & {}^1\pi_{12} & {}^1\pi_{13} & {}^1\pi_{14} \\ {}^1\pi_{21} & {}^1\pi_{22} & {}^1\pi_{23} & {}^1\pi_{24} \\ {}^1\pi_{31} & {}^1\pi_{32} & {}^1\pi_{33} & {}^1\pi_{34} \\ {}^1\pi_{41} & {}^1\pi_{42} & {}^1\pi_{43} & {}^1\pi_{44} \end{pmatrix},$$

$${}^2\Pi = \begin{pmatrix} {}^2\pi_{11} & {}^2\pi_{12} & {}^2\pi_{13} & {}^2\pi_{14} \\ {}^2\pi_{21} & {}^2\pi_{22} & {}^2\pi_{23} & {}^2\pi_{24} \\ {}^2\pi_{31} & {}^2\pi_{32} & {}^2\pi_{33} & {}^2\pi_{34} \\ {}^2\pi_{41} & {}^2\pi_{42} & {}^2\pi_{43} & {}^2\pi_{44} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Если условная зависимость состояний определена от левого верхнего сегмента марковского СП (рис. 1), то элемент $M_{i,j}$ ($i \in m, j \in n$) СП зависит только от элементов некоторого подмножества $\Lambda_{i,j}$ этого сегмента, называемого окрестностью элемента $M_{i,j}$. Тогда лучшим образом удовлетворяющим условию каузальности является конфигурация окрестности (рис. 2)

$$\Lambda_{i,j} = \{M_{i,j-1}, M_{i-1,j}, M_{i,j}\} = \{v_1, v_2, v_3\}. \quad (9)$$

Вероятность состояния элемента v_3 (рис. 2) полностью определяется его энтропией относительно состояний элементов окрестности $\Lambda_{i,j}$.

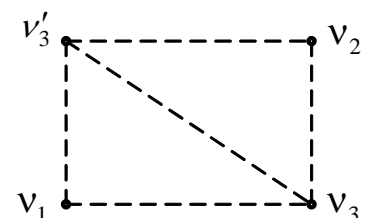


Рис. 2. Фрагмент области СП:
 $v_1 = M_{i,j-1}; v_2 = M_{i-1,j};$
 $v_3 = M_{i,j}; v_3' = M_{i-1,j-1}$

Выражение для энтропии состояния элемента v_3 можно представить в виде [6]:

$$H(v_3|v_2, v_1) = H(v_3) - I(v_3, v_2, v_1) = -\log \frac{\pi(v_3|v_1)\pi(v_3|v_2)}{\pi(v_3|v_1, v_2)}, \quad (10)$$

где $\pi(v_3|v_1)$, $\pi(v_3|v_2)$ – одномерные вероятности перехода между соседними состояниями; $\pi(v_3|v_1, v_2)$ – вероятность перехода в двумерной цепи Маркова.

Вероятности перехода от состояний элементов окрестности $\Lambda_{i,j}$ к состоянию $M_{i,j}$ образуют МВП вида:

$$P = \begin{pmatrix} \pi_{iii} & \pi_{iji} & \pi_{iki} & \pi_{ili} & \pi_{jii} & \pi_{jji} & \pi_{jki} & \pi_{jli} & \pi_{kii} & \pi_{kji} & \pi_{kki} & \pi_{kli} & \pi_{lii} & \pi_{lji} & \pi_{lki} & \pi_{lli} \\ \pi_{ijj} & \pi_{ijj} & \pi_{ikj} & \pi_{ilj} & \pi_{jjj} & \pi_{jjj} & \pi_{jkj} & \pi_{jij} & \pi_{kij} & \pi_{kjj} & \pi_{kkj} & \pi_{klj} & \pi_{lij} & \pi_{ljj} & \pi_{lkj} & \pi_{lj} \\ \pi_{iik} & \pi_{ijk} & \pi_{ikk} & \pi_{ilk} & \pi_{jik} & \pi_{jjk} & \pi_{jkk} & \pi_{jlk} & \pi_{kik} & \pi_{kjk} & \pi_{kkk} & \pi_{klk} & \pi_{lik} & \pi_{ljk} & \pi_{lkk} & \pi_{ilk} \\ \pi_{iil} & \pi_{ijl} & \pi_{ikl} & \pi_{ill} & \pi_{jil} & \pi_{jjl} & \pi_{jkl} & \pi_{jll} & \pi_{kil} & \pi_{kjl} & \pi_{kkl} & \pi_{kll} & \pi_{lil} & \pi_{ljl} & \pi_{lkl} & \pi_{lll} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Элементы МВП P (11) связаны с элементами МВП (8) следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \pi_{iii} &= \frac{{}^1\pi_{ii} \cdot {}^2\pi_{ii}}{{}^3\pi_{ii}}, \quad \pi_{ijj} = \frac{{}^1\pi_{ij} \cdot {}^2\pi_{ij}}{{}^3\pi_{ij}}, \\ \pi_{iik} &= \frac{{}^1\pi_{ik} \cdot {}^2\pi_{ik}}{{}^3\pi_{ii}}, \quad \pi_{iil} = \frac{{}^1\pi_{il} \cdot {}^2\pi_{il}}{{}^3\pi_{ii}}; \\ \pi_{iji} &= \frac{{}^1\pi_{ii} \cdot {}^2\pi_{ji}}{{}^3\pi_{ij}}, \quad \pi_{ijj} = \frac{{}^1\pi_{ij} \cdot {}^2\pi_{ij}}{{}^3\pi_{ij}}; \\ \pi_{ijk} &= \frac{{}^1\pi_{ik} \cdot {}^2\pi_{jk}}{{}^3\pi_{ij}}, \quad \pi_{ijl} = \frac{{}^1\pi_{il} \cdot {}^2\pi_{jl}}{{}^3\pi_{ij}}; \end{aligned} \quad (12)$$

где ${}^3\pi_{ii}$ – элементы дополнительной матрицы ${}^3P = {}^1P \times {}^2P'$, характеризующей статистическую связь элементов v_3 и v_3' .

Соотношения (12) приведены для первых двух столбцов МВП (11), остальные вычисляются аналогично. Элементы МВП удовлетворяют условию нормировки (3) и стационарности (4). Каждой строке МВП соответствует определённое состояние элементов окрестности Λ_{ij} (9).

Ниже приведён алгоритм работы ММ на основе двумерной цепи Маркова с несколькими состояниями ($N \geq 2$).

1. По известным матрицам 1P и 2P вычисляются матрицы 3P и P .

2. Берётся случайное число ξ_L ($L \leq m \cdot n$), равномерно распределённое на интервале $\{0, 1\}$.

3. Из матрицы P выбирается столбец, соответствующий значениям элементов окрестности $\Lambda_{i,j}$.

4. Число ξ_L сравнивается с 0 значениями выбранного столбца МВП. Если ξ_L попадает в интервал вероятности в первой строке, то элемент изображения v_3 принимает значение $M_1 = 0$, во второй строке – $M_2 = 1$, в третьей строке – $M_3 = 2$, в четвёртой – $M_4 = 3$.

5. Если $L \leq m \cdot n$, то переход к п. 2, иначе, переход к п. 6.

6. Останов.

В соответствии с МВП (13) по данному алгоритму получено искусственное ЦПИ (рис. 3), каждый элемент которого принимает одно из четырёх состояний.

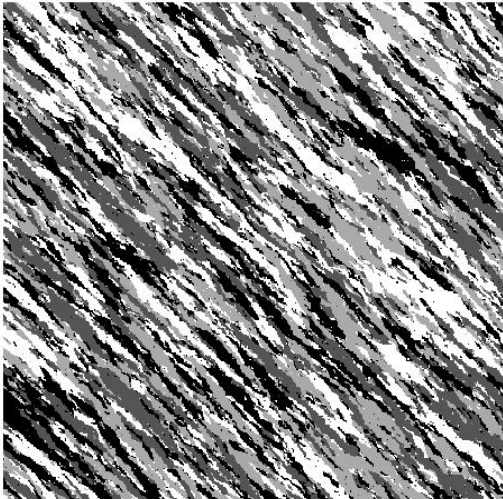


Рис. 3. Искусственное изображение размером 1000×1000

$${}^1\Pi = \begin{pmatrix} 0,9 & 0,033 & 0,033 & 0,033 \\ 0,033 & 0,9 & 0,033 & 0,033 \\ 0,033 & 0,033 & 0,9 & 0,033 \\ 0,033 & 0,033 & 0,033 & 0,9 \end{pmatrix},$$

$${}^2\Pi = \begin{pmatrix} 0,9 & 0,033 & 0,033 & 0,033 \\ 0,033 & 0,9 & 0,033 & 0,033 \\ 0,033 & 0,033 & 0,9 & 0,033 \\ 0,033 & 0,033 & 0,033 & 0,9 \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Метод сжатия цифровых полутоновых изображений

В качестве одного из возможных приложений ММ двумерной цепи Маркова с $N \geq 2$ приведён алгоритм, разработанный для внутрикадрового прогнозирования блоков в опорном кадре g -разрядного ЦПИ видеопоследовательности при сжатии ТВ изображений.

Представление g -разрядных ЦПИ цепями Маркова с числом состояний $N \geq 2$ позволило разработать метод сжатия ЦПИ [7], не уступающий известным методам и требующий значительно меньших вычислительных ресурсов при более высокой точности и скорости передачи ЦПИ за счёт перехода от бинарного представления пикселей ЦПИ к N -разрядному (N -уровневому). В данном методе сжатия

отсутствует переход из временной области в спектральную и обратно, что характерно для известных методов. Это позволяет реализовать процедуру сжатия ЦПИ на передающей стороне минимальными вычислительными ресурсами.

Алгоритм прогнозирования блоков № 1

1. Передаваемое g -разрядное ЦПИ разбивается на $l (l \in g)$ РДИ.

2. Каждое РДИ разбивается на блоки M_{ij} размером $d \times d (d = \overline{1,16})$.

3. Для каждого РДИ вычисляются МВП из одного состояния блока M_{ij} в другое по горизонтали ${}^1\Pi$ и вертикали ${}^2\Pi$ (1) соответственно.

4. Исходя из МВП ${}^1\Pi$ и ${}^2\Pi$, вычисляется МВП (5).

5. Прогнозируется блок \hat{M}_{ij} на основе МВП (5) и окрестности $\Lambda_{i,j}$.

6. Если $M_{ij} = \hat{M}_{ij}$, то блок не передаётся по каналу связи.

7. Если $M_{ij} \neq \hat{M}_{ij}$, то блок M_{ij} передаётся по каналу связи и становится опорным для следующего соседнего элемента.

Точность предсказания составляет 100 %.

Плоскости, построенные на младших разрядах ЦПИ, представляют собой СП, близкое по структуре к СП белого гауссовского шума (БГШ), с наличием мелких деталей сцены изображения, которыми не всегда можно пренебречь. Младшие плоскости ЦПИ в соответствии с алгоритмом № 1 дают наибольшее количество передаваемых блоков, снижая эффективность сжатия ЦПИ. Для таких плоскостей разработан алгоритм № 2, который позволяет выделять и передавать мелкие детали изображения, заполняя остальное пространство БГШ на приёмной стороне.

Алгоритм прогнозирования блоков № 2

1. Передаваемое g -разрядное ЦПИ разбивается на l ($l \in g$) РДИ.

2. Определяется длина последовательности (χ) одинаковых блоков M_{ij} ($i \in N$).

3. Если $\chi > \chi_{БГШ}$ (для БГШ $\chi_{БГШ} = 2$), то блок M_{ij} передается по каналу связи.

4. Если $\chi \leq \chi_{БГШ}$, то блок M_{ij} не передается по каналу связи, а при восстановлении ЦПИ на приёмной стороне заменяется выборкой БГШ.

Для кодирования передаваемого потока блоков изображения по аналогии с JPEG выбран код Хаффмена. Выбор применяемого алгоритма для каждого РДИ осуществляется на основе статистических характеристик изображения.

Проведённые исследования показали, что наиболее эффективно применять алгоритм 1 для $l = 1,5$ старших РДИ, а для остальных РДИ целесообразно применять алгоритм 2. Для исследований были использованы изображения, размещённые в открытом доступе сети Internet, представленные в формате JPEG, что нарушает их статистические свойства.

Для изображений, полученных с матриц ДЗЗ, сохранённые статистические характеристики позволят добиться более высокого коэффициента сжатия при малых СКО.

На рис. 4 приведены результаты сжатия реального ЦПИ (рис. 4, а) предложенным методом (рис. 4, б) и JPEG (рис. 4, в).

Для оценки эффективности методов сжатия приведен график зависимости СКО от степени сжатия для предложенного метода и JPEG (рис. 5).

Таким образом, эффективность предложенного метода сравнима с широко распространённым методом сжатия изображений JPEG по субъективным метрикам и объективным (СКО), но предло-

женный метод не имеет вычислительных операций на передающей стороне.

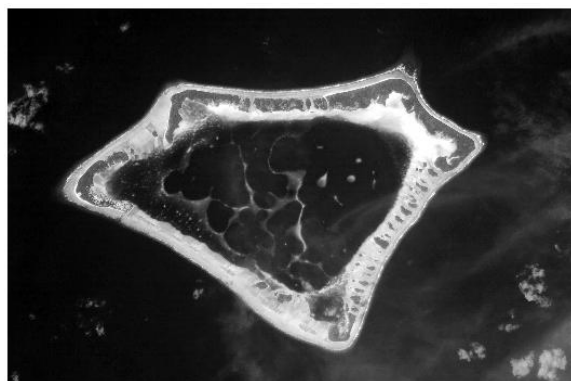


Рис. 4, а. Реальное ЦПИ



Рис. 4, б. Восстановленное ЦПИ
(предлагаемый метод,
коэффициент сжатия – 8, СКО – 10,3)



Рис. 4, в. Восстановленное ЦПИ
(JPEG, коэффициент сжатия – 8, СКО – 12,1)

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.В37.21.0628.

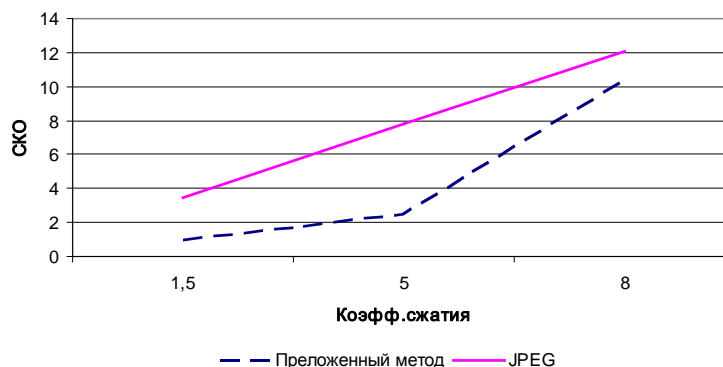


Рис. 5

Библиографический список

1. Шведов А.С. О методах Монте-Карло с цепями Маркова // Экономический журнал ВШЭ. 2010. Т. 14, № 2. С. 227-243.
2. Куени Джон Дж., Снелл Дж. Лори, Кнепп Антони У. Счетные цепи Маркова; пер. с англ. М.: Наука, 1987. 416 с.
3. Metropolis N., Rosenbluth A.W., Rosenbluth M.N., Teller A.H., Teller E. Equation of State Calculations by Fast Computing Machines // Journal of Chemical Physics. 1953. No. 21. P. 1087-1092.
4. Gelfand A.E., Smith A.F.M. Sampling-based Approaches to Calculating Marginal Densities // Journal of the American Statistical Association. 1990. No. 85. P. 398-409.
5. Тихонов В.И., Миронов М.А. Марковские процессы. М.: Сов. радио, 1977. 488 с.
6. Петров Е.П., Харина Н.Л., Ржаникова Е.Д. Модель цепи Маркова с несколькими состояниями // Сб. тр. X Международ. НТК «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» ФРЭМЭ'2012. Книга 1. Владимир, 2012. С. 211-215.
7. Петров Е.П., Харина Н.Л., Ржаникова Е.Д. Метод сжатия цифровых полутоновых изображений на основе цепей Маркова с несколькими состояниями // Сб. науч. трудов 15 Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2013». М.: РНТОРЭС имени А.С. Попова, 2013. С. 132-135.

Информация об авторах

Петров Евгений Петрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиоэлектронных средств, Вятский государственный университет, г. Киров. E-mail: EPetrov@mail.ru. Область научных интересов: исследование алгоритмов и устройств цифровой фильтрации дискретных коррелированных сигналов, цифровая обработка изображений.

Харина Наталья Леонидовна, кандидат технических наук, доцент кафедры

радиоэлектронных средств, Вятский государственный университет, г. Киров. E-mail: Natal_res@mail.ru. Область научных интересов: многомерные марковские поля в обработке изображений.

Ржаникова Елена Дмитриевна, аспирант, Вятский государственный университет, г. Киров. E-mail: lavrova_elena@bk.ru. Область научных интересов: многомерные марковские поля в обработке изображений.

METHOD OF COMPRESSION OF DIGITAL HALFTONE IMAGES ON THE BASIS OF MARKOV CHAINS WITH SEVERAL STATES

© 2014 E. P. Petrov, N. L. Harina, E. D. Rzhanikova

Vyatka State University, Kirov, Russian Federation

The paper presents a mathematical model (MM) of a digital halftone image (DHI) on the basis of a two-dimensional Markov chain with several states; its adequacy to real images is analyzed. On the basis of MM a method of DHI compression is developed. The method provides separation of DHI into binary images with subsequent combining of two digits in a plane. Each plane is considered as a two-dimensional random Markov process with several ($N=4$) states. On the basis of the theory of random Markov processes prediction of the plane elements is carried out. All incorrectly predicted elements are located in a bit stream and serve as a reference for the recovery of the image. Separation of areas containing background noise with a structure similar to the white gaussian noise (WGN) is carried out beforehand for the planes containing low-order bits, these areas are not stored, they are filled with WGN samples in case of restoration. The efficiency of the method is no inferior to that of known methods of compression based on DCT or DWT, it does not involve computing operations and makes it possible to work with multidigital images (8 and more digits) without increase in the time of compression due to parallel processing of the planes.

Mathematical model, Markov chain, digital halftone image, matrix of transition probabilities, image compression.

References

1. Shvedov A.S. On Markov Chain Monte Carlo Methods // Higher School of Economics Economic Journal. 2010. V. 14, no. 2. P. 227-243. (In Russ.)
2. Kemeny J.G., Snell J.L., Knapp A.W. Denumerable Markov Chains: Trans. from Engl. Moscow: Nauka Publ., 1987. 416 p.
3. Metropolis N., Rosenbluth A.W., Rosenbluth M.N., Teller A.H., Teller E. Equation of State Calculations by Fast Computing Machines // Journal of Chemical Physics. 1953. No. 21. P.1087-1092.
4. Gelfand A.E., Smith A.F.M. Sampling-based Approaches to Calculating Marginal Densities // Journal of the American Statistical Association. 1990. No. 85. P. 398-409.
5. Tichonov V.I., Mironov M.A. Markovskie protsessy [Markov processes]. Moscow: Sov. radio Publ., 1977. 488 p.
6. Petrov E.P., Harina N.L., Rzanikova E.D. Model of Markov chain with several states // Proc. 10th Int. Conf. «Physics and radioelectronics in medicine and ecology», Book 1. Vladimir. 2012. P. 211-215. (In Russ.)
7. Petrov E.P., Harina N.L., Rzanikova E.D. Method of compression of digital grayscale images on the basis of Markov's chains with several states // Proc. 10th Int. Conf. «Digital processing of signals and its application – DSPA-2013», Moscow: RNTORES imeni A.S. Popova Publ., 2013. P. 132-135. (In Russ.)

About the authors

Petrov Eugeny Petrovich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of the Department of Radio Electronic Means, Vyatka State University, Kirov, Russian Federation. E-mail: EPetrov@mail.ru. Area of Research: algorithms and devices of digital

filtration of discrete correlated signals, digital processing of images.

Harina Natalya Leonidovna, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Radio Electronic Means, Vyatka State University, Kirov, Russian Federation. E-mail: Natal_res@mail.ru.

Area of Research: multidimensional Markov fields in digital image processing.

Rzhanikova Elena Dmitrievna, post-graduate student, Vyatka State University,

Kirov, Russian Federation. E-mail: lavrova_elenabk@bk.ru.

Area of Research: multidimensional Markov fields in digital image processing.

УДК 33
ББК 65.050

СЕМАНТИЧЕСКИЙ СТАТУС ПОНЯТИЙ «ИННОВАЦИЯ», «ИННОВАЦИОННЫЙ ПРОЦЕСС», «ИННОВАЦИОННЫЙ ПРОДУКТ» (МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ АСПЕКТ)

© 2014 Т. Н. Соснина

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Рассматриваются семантические корни понятий «инновация», «инновационный процесс», «инновационный продукт», аргументируется вывод о необходимости поиска критериев разграничения инноваций от псевдоинноваций. Предлагается авторская версия определения понятий с позиций выводов теории предмета труда. Понятие «инновация» может применяться в случаях, когда потребительно-стоимостные и стоимостные технологические цепочки проектируются с учётом технико-технологических, экономических, социальных, экологических составляющих как на уровне *тактических целей* (получение продукта с параметром, востребованным обществом), так и на уровне *стратегических целей* (получение продукта, производство которого наносит минимальный ущерб биосфере). Понятие «инновационный процесс» может применяться по отношению к жизненным циклам, начиная от продукта природы (объект научного исследования), через промежуточные стадии, в рамках которых утилизируются побочные технологические отходы, до продукта природы, когда к биогеохимическим циклам Земли подключаются вышедшие из употребления конечные продукты производства и быта. Понятие «инновационный продукт» может быть использовано для обозначения тех конечных продуктов материального производства, которые нашли практическое применение в получении технико-технологического, экономического, экологического, социального эффектов и проведения мероприятий по утилизации побочных продуктов по ходу жизненного цикла и на завершающем этапе через подключение балластного субстрата к биогеохимическим циклам Земли.

Инновация, инновационная деятельность, инновационный процесс, инновационный продукт, готовый и конечный продукт инновации.

С середины 80-х годов прошлого века интерес к инновационной деятельности и её продуктам стал всеобщим. Термин «инновация» и его смысловые аналоги (новшество, новация, нововведение) стали использоваться не только в научных исследованиях, но и в политических документах, повседневной лексике.

Историческая справка. Корни понятия «инновация» восходят к древнелатинскому и новолатинскому языкам. В первом случае (*novatio*) оно означало изменение, обновление, с приставкой *in* (*innovation*) удавалось конкретизировать направление изменений и обновлений; во втором случае создавался синтез слов *investio* (облагаю) и *novatio* (обновляю).

В латинском языке использовались также близкие по смыслу термины *invenire* (инвенция) – изобретать, находить,

догадываться и *imitation* (имитация) – воспроизводить, повторять, подражать.

В XIX веке термин инновация и его смысловые аналоги стали чаще появляться в работах учёных. Есть мнение, что первым его использовал в своих работах «Теории экономического развития» (1912 г.), «Капитализм, социализм и демократия» (1942 г.) Й. Шумпетер (1883–1950). Сформулированная им идея «созидательного разрушения» соответствовала постулатам теории циклов, разработанной Н.Д. Кондратьевым (1892–1938) и П. Сорокиным (1889–1968). В аналогичном контексте проводились исследования Дж. Берналом (1901–1971), С. Кузнецом (1901–1985).

До середины XX века термин «инновация» ассоциировался с новой продукцией. В последней четверти XX – начале XXI века он превратился в синоним лю-

бой ценности, способной повысить стоимость структур, её производящих.

Широкое использование понятия «инновация», однако, не привело автоматически к единству трактовки его семантического статуса. Необходимость определения критериев, позволяющих отличить инновацию от псевдоновшества, остаётся до сих пор востребованной.

Движение в этом направлении предполагает наличие методологических принципов, следуя которым возможно преодоление трудностей, связанных с функционированием инновационных процессов и получением результатов, необходимых обществу.

О чём говорят факты?

1. Все исследования, имеющие отношение к инновациям, включая организационную работу по их изучению, контролируются ОЭСР (Организация экономического сотрудничества и развития). Последняя выполняет функции интеллектуального и информационного центра «Большой семёрки».

2. Ведущие страны западного мира демонстрируют внимание к инновационным формам деятельности и её продуктам, увеличивая объём финансирования фундаментальных наук как главного источника особо сложных инноваций. Затраты на фундаментальные, прикладные исследования и разработки отвечают пропорции 20:20:60.

3. Феномен инноваций исследуется и за пределами ареала ОЭСР. Страны Латинской Америки, Азии, Африки анализируют эту форму деятельности с учётом особенностей социально-экономических условий и стратегического курса своих стран.

Россия также идёт по пути создания инновационной экономики, отвечая на вызовы времени. Трудности и новизна этого пути для нашей страны порождают массу проблем, которые надо решать, вопросов, на которые надо отвечать: «Дискуссионность понятий, отсутствие согласованности в формулировках рождает неуверенность, нечёткость в действиях, что

приводит к распылению сил созидания. Поэтому, как никогда, важно найти взаимопонимание хотя бы на терминологическом уровне» [1, с.5].

Необходимо принять к сведению также понимание смысла инновационной деятельности гражданами России.

Воспроизведём результаты социологических опросов за 2008 и 2011 годы.

2008 г.: 27 % опрошенных россиян инновацией считают любые нововведения; 15% ассоциирует их с современными технологическими режимами; 3 % – с использованием достижений науки и техники; 53% затруднились с ответами.

2011 г.: 36 % трактуют инновацию как «новое», улучшенное; 19 % определяют её в контексте технологических и экономических усовершенствований; 7 % напрямую связывают инновации с наукой и изобретениями; 38 % – не смогли определить отношение к инновации.

Рассмотрим ситуацию в историко-логическом ключе. Воспроизведём определение понятия «инновация» различными авторами.

Анализ феномена в зарубежной и отечественной литературе до 1995 г. предложили Л.А. Баев и М.Г. Литке в статье «К вопросу о категориальной системе инновационного развития» [2].

Суммируем эту информацию в пяти позициях.

Первый вариант представлен точкой зрения Й. Шумпетера и П. Друкера, согласно которой инновация есть новая комбинация производственных факторов, мотивированная предпринимательским духом; «особый инструмент», с помощью которого осуществляется новый вид бизнеса.

Второй вариант отражает подход к определению инноваций как «уникальной продукции» (С. Мендел, Д. Эннис); как создание товаров или услуг, воспринимаемых потребителями в качестве новых или более совершенных (П. Дойль); как новый способ удовлетворения потребностей, дающий прирост полезного эффекта (А.А. Кутейников).

Третий вариант основан на утверждении: существенной характеристикой инновации является участие в её создании учёных; «преобразование идей в конкретный предмет» (В. Кингстон); «использование результатов научных исследований и разработок» (П. Завлин, А. Васильев); «новый способ удовлетворения общественных потребностей, основанный на достижениях науки и техники» (А.А. Кутейников).

Четвёртый вариант воспроизводит позицию той части авторов, которая акцентирует внимание на параметрах коммерциализации нового продукта: «Инновации – есть «коммерческое освоение новой идеи» (Б. Ригис); «процесс, в котором идея или изобретение приобретает экономический смысл» (Б. Твисс); «вложение средств в разработку техники, технологии, научные исследования» (О.В. Амуржуев); «результат деятельности, воплощённый в новой или усовершенствованной продукции, востребованной рынком» (Х. Саудер, А. Нашар).

Пятый вариант смещает центр тяжести прочтения инновации в плоскость целенаправленного практического их применения. Инновация есть «клеточка» управляемого развития, целенаправленных изменений» (А. Пригожин); «комплексный процесс создания, распространения и использования новых видов изделий, технологий, организационных форм» (В.Е. Шугуров, Ю.В. Буряк); «применение нового продукта или процесса на практике» (Э. Хиппель).

Воспроизведём типичные определения инноваций, содержащиеся в работах, опубликованных с 1996 по 2013 годы, на предмет выявления своеобразия трактовки их семантического статуса.

- Инновация есть новшество, применяемое в области технологии производства или управления какой-либо хозяйственной единицы [3].

- Новшество есть оформленный результат фундаментальных, прикладных исследований, разработок или экспериментальных работ в какой-либо сфере де-

ятельности по повышению её эффективности. Главное – внедрить новшество, превратить в форму инновации, т.е. завершить инновационную деятельность и получить положительный результат, затем продолжить диффузию инновации [4].

- Инновация есть процесс обновления и улучшения сбытового потенциала предприятия, обеспечивающего его выживаемость, расширение доли на рынке, повышение конкурентоспособности; создания новых рабочих мест, повышения делового престижа, укрепления независимого положения и, в конечном счёте, увеличения прибыли [5].

- Инновация – это не просто новое, но, прежде всего, действительно необходимое для страны, её экономики, населения. *Задача не в том, чтобы создать и даже внедрить что-то новое, а в том, чтобы внедрить именно то, что даёт реальный эффект и становится стимулом для появления новых инноваций, востребованных отечественным бизнесом и адаптированных к его возможностям* [6].

- Инновация есть жизненная необходимость противостояния консерватизму человеческого естества, корни которого уходят в историческое прошлое, когда страх утраты накопленного опыта имел следствием ритуализацию стратегии бытия, превращения их в незыблемые правила поведения и деятельности.

Деятельность по созданию, применению, распространению новшеств становится безальтернативной стратегией человека (общества), ориентиром которой является культура [7].

В приведённых определениях понятия «инновация» появились такие *существенно конкретизирующие* его характеристики, как то: оформленный результат фундаментальных, прикладных исследований, разработок, экспериментальных работ; нововведение в области технологии производства и управления; конечный результат диффузии и внедрения новшеств, изобретений; конечный результат, имеющий экономическую, социальную и экологическую ценность; продукт повышен-

ной конкурентоспособности, пользующийся спросом на рынке, жизненная необходимость противостояния консерватизму человеческого естества.

Обилие подходов к определению смысла терминов «инновация», «инновационный процесс», «инновационный продукт» и их аналогов в контексте практической востребованности имело следствием попытку унификации их семантического статуса на уровне официальных государственных и межгосударственных структур.

В 1992 г. появился такой документ – «Руководство – ОСЛЮ», где для стран Европейского союза были предложены определения терминов, связанных с инновационной деятельностью в области промышленной технологии. Технологические инновации определялись как введение на рынок технологически новых продуктов и внедрение технологически новых процессов.

Последующие редакции этого документа расширили сферу применения термина «инновация». Вместо понятия «технологические инновации», стала использоваться более широкая формулировка: «ТПП-инновации» (аббревиатура, означающая технологический продукт – процесс), отражающая факт внедрения нововведений на рынке или в процессе производства.

Формула «ТПП-инновации» появилась как результат совместной деятельности научной, финансовой и коммерческой структур [8].

Аналогичный процесс имел место и в России. Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 июня 1998 г. № 32 в государственных официальных документах предписывалось исходить из следующей трактовки понятия «инновация»: инновация (нововведение) – конечный результат инновационной деятельности, получивший реализацию в виде нового или усовершенствованного продукта, реализуемого на рынке; нового или усовершенствованного технологического

процесса, используемого в практической деятельности.

Принципы инновационной деятельности были разработаны и утверждены Президиумом Российской Академии наук от 24.03.2009 № 85. В соответствующем документе определялся семантический статус понятий «инновация» (нововведение) и «инновационная деятельность».

Несколько позже 3.10.2009 приказом № 237 Росстата инновационный процесс предлагалось рассматривать в рамках одного из четырех вариантов: технологического, организационного, маркетингового и экологического.

8 декабря 2011 г. Правительство Российской Федерации утверждает (Распоряжение № 2227-р) «Стратегию инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года», в которой даётся целевая установка хозяйствующим субъектам: «Россия ставит перед собой амбициозные, но достижимые цели долгосрочного развития, заключающиеся в обеспечении высокого уровня благосостояния населения и закрепления геополитической роли страны как одного из лидеров, определяющих мировую политическую повестку дня. Единственным возможным способом достижения этих целей является переход экономики на инновационную социально ориентированную модель развития».

Заслуживают внимания оценочные суждения учёных относительно результативности инновационного развития современных экономических систем.

- «Когда знания столь тесно переплетаются с производством, не стоит удивляться, что хозяйствующие силы хотят поставить на знания своё клеймо и подчинить его производство правилам извлечения прибыли» [9].

- «Если общее понятие «инновация» было сформулировано в начале XX столетия, то нам предстоит разобраться в сопутствующих терминах, привнесённых позднейшей эпохой – эпохой господства концепции постиндустриального общества, таких как «наукоёмкость», «высокие

технологии», «высокотехнологические предприятия», «диффузия (перенос) технологий» и т.д. Сделать это представляется необходимым, так как, по нашим наблюдениям, в их трактовке царит немалая путаница» [10, с. 205].

«В ходе исследований накоплен огромный массив в той или иной мере однородных и надёжных статистических и социологических сведений об инновационной активности в многочисленных подробностях. Выяснялось, что эти сведения с трудом поддаются обобщениям и едва ли позволят построить нечто подобное требуемой теории.

Можно констатировать, что общая картина инновационной активности в странах ЕС не содержит каких-либо интригующих черт, какие можно было бы признать особенностями экономики знаний или постиндустриального общества.

Инновационность может считаться вполне заурядным свойством жизнеспособности производственной фирмы, действующей в условиях рыночной экономики» [10, с.199–200].

«Статус нового может быть различным. Его оценка зависит от многих факторов и обстоятельств. Поэтому присвоение какому-либо процессу определения «инновационный» является абстрактным до той поры, пока не будет осуществлен процесс этих «что», «куда», «как». В современный период существует некая «мода» на использование рубрики «инновация». Считается привлекательными с точки зрения запросов современной практики обращаться к поиску нового как форме выявления дополнительного потенциала уже известного и открытого» [11].

- «Под рекламно-пропагандистский шум пошёл уже замеченный экономистами процесс систематического вымывания из производства и обихода товаров длительного пользования. Западного обывателя приучают выбрасывать на свалку всякое изделие при появлении на рынке его обновлённой модификации. На столь быструю смену ассортимента стали ориентироваться и производители. За этим

нетрудно различить интересы промышленно-финансовых олигархий и заботу о стабильности экономик ведущих стран мира тем более устойчивых, чем больше производится и потребляется. Вопрос в том, сколь долго подобное расточительство ресурсов и труда способны выдерживать мировая экономика и природная среда» [10, с.198].

«Инновации невозможны без инвестиций в основные фонды производств, причем инвестиций долговременных и крупных, намного превосходящих затраты на сопутствующие исследования и разработки.

Распространенное представление о том, что руководители промышленных предприятий заинтересованы в инновациях, является обывательским мифом. На деле они стремятся обходиться без существенных изменений в структуре производства и ассортименте производимых товаров. Мощные монополистические корпорации часто позволяют себе сдерживать инновации.

С этой целью могут в том числе скучаться и «обездвиживаться» перспективные инновационные идеи (практика, подмеченная ещё сто лет назад)» [10, с.184–185].

Сегодня используются десятки определений понятий «инновация», «инновационная деятельность», «инновационный продукт», однако попытки выявить их природу продолжают.

Предлагаем авторскую версию определения семантического статуса понятий «инновация», «инновационный процесс» и «инновационный продукт». С этой целью:

1. Выделим базовые характеристики феномена инноваций, которые никем не отрицаются и признаются всеми.

2. Проанализируем механизмы функционирования вещественной и невестественной составляющих инновационного процесса с точки зрения их результативности – получения конечного инновационного продукта.

3. Рассмотрим инновационный процесс и его результаты в контексте их двойственной природно-социальной сущности.

Первая позиция раскрывается в публикациях таких авторов, как Ф.Ф. Бездудный, Г.А. Смирнов, О.Д. Нечаев, К.В. Пестриков, В.В. Гольберг, признающих процессуальность инноваций и их результаты в той или иной форме.

Вторая позиция – на ней мы остановимся подробнее – основана на расшифровке инновационного процесса в виде совокупности взаимосвязанных стадий, этапов, действий, учёт которых принципиально значим. О теоретическом разбросе в суждениях этой группы исследователей говорят следующие высказывания:

- «Инновационные циклы включают фазы: *волна* базисных инноваций; *диффузия* (распространение) этого поколения (уклада); *стабильность* (преобладают улучшающие микроинновации); *кризис*» [12].

- «Выделяются шесть этапов жизненного цикла инновационного продукта: вывоз товара на рынок и его пробная продажа; рост спроса на товар и увеличение объема продаж; относительное замедление роста спроса и замедление объема продаж; стабилизация продаж, достижение максимального уровня продаж и максимальной прибыльности; падение спроса, объема продаж и прибыли; устойчивое сокращение реализации товара, прекращение его производства и продажи» [13, с.164–165].

- «Жизненный цикл инновации есть: 1) определение периода времени, в течение которого инновация обладает активной жизнеспособностью на рынке и приносит прибыль и/или другую реальную выгоду; 2) период времени, в течение которого инновация проходит следующие стадии: стратегический маркетинг, НИОКР, организационно-техническая подготовка нового производства, производство, подготовка продукции к функционированию, эксплуатации и ремонту, утилизация и замена новой моделью» [14].

- «Инновационный процесс является нелинейным. Он может быть структурирован. Основные стадии инновационного процесса: новая идея инновационного маркетинга; экономическое обоснование; прикладные и поисковые исследования, разработки, опытное производство; апробация; коммерческая реализация, внедрение, инновация, имманентным признаком которой (помимо новизны) выступает то, что она должна быть введена в употребление, т.е. выведена на рынок или внедрена в практическую деятельность хозяйственного субъекта» [15].

Итог: исследователи фиксируют наличие конкретных фаз инновационного процесса, используя различные понятия и словосочетания (волны, базисное состояние, формирование ядра, диффузия, кризис, формирование кластера базисных инноваций; разработка, производство, продвижение и реализация; время активной жизнеспособности на рынке, фаза стратегического маркетинга, НИОКР, организационно-творческая подготовка нового производства, эксплуатация и ремонт, утилизация).

Не менее разнообразны характеристики инноваций в качестве результирующей тех или иных процессов [16, 17, 18].

Некоторые авторы сочли целесообразным уточнить понимание результатов инновационного процесса, посредством понятий: «продукт» (Е.П. Голубков); «услуга» (А.С. Кулагин); «технология» (Д.М. Степаненко); «знание» (Н.В. Волынкина).

Особо отметим утверждения тех исследователей, которые, конкретизируя качество инновационного процесса, используют понятие «конечный результат». Воспроизведем основные варианты.

Конечный результат – это:

- внедрение с целью изменения объекта управления и получения экономического, экологического, научно-технического или иного эффекта [19];

- технологии, которые служат основой для проведения новых исследований [20];

- новшество, доведённое до практического применения в технологиях, продуктах, в организационно-управленческой деятельности, маркетинге, финансовом управлении [21].

Закономерна в связи с этим постановка вопросов: «Отражается ли в подобного рода определениях конечная сущность инновационного процесса или речь идёт о каких-либо промежуточных его стадиях?», «Является ли фаза внедрения инновационного продукта основанием для квалификации его как конечного?». Ответ на оба вопроса будет отрицательным. Какова аргументация?

Появлению конечного продукта, как и любого другого, в том числе инновационного, предшествуют конкретные образования с качествами «готового продукта», потребительно-стоимостные параметры которого не могут обеспечить полноту функций, присущих продукту конечному. Для получения потребительно-стоимостных характеристик конечного продукта готовый продукт должен «пройти» последовательно все стадии жизненного цикла. Можно ли считать самодостаточным такой критерий для определения семантического статуса инновационного продукта? Ответ будет утвердительным.

Проведём анализ жизненного цикла инновационного продукта в технологическом ключе.

Технологические метаморфозы, предшествующие появлению конечного продукта, характеризуются двумя сдвоенными цепочками, связанными друг с другом, но выполняющими различные функции.

Первая пара представлена 1) вещественной (потребительно-стоимостной) цепочкой, в рамках которой природный субстрат преобразуется под влиянием труда человека и используемых им технических средств в социально-природное образование, отвечающее цели получения необходимого обществу продукта; 2) невещественной (стоимостной, затратной) цепочкой, фиксирующей фактическую

цену ресурсов, использованных при создании конечного продукта.

Вторая пара представлена также двумя технологическими цепочками: 3) вещественной (потребительно-стоимостной) в форме побочной продукции (отходы производства), образующейся на всех этапах жизненного цикла продукта, включая завершающий; 4) невещественной (стоимостной, затратной) цепочкой, фиксирующей цену ресурсов, которые оказались балластом [22].

Обе пары (1–2; 3–4) технологических цепочек функционируют по одной и той же схеме: предмет природы – предмет труда потенциальный или условный (сфера науки); предмет труда первичный (добывающие отрасли производства); предмет труда вторичный (перерабатывающие отрасли производства); предмет труда третичный (сфера обращения); предмет труда четверичный (сфера потребления); предмет труда пятиричный (сфера утилизации) – предмет природы (компонент биогеохимических циклов Земли).

Методологический приём вычленения четырёх технологических цепочек позволяет дифференцировать различные стадии жизненного цикла продукта по следующим критериям: технико-технологическому, экономическому, социальному, экологическому [23].

На какой из стадий жизненного цикла инновационного продукта решается вопрос о том, какой ценой будет получен конечный результат?

Ключевая роль при проектировании жизненных циклов инновационного продукта принадлежит условному потенциальному предмету труда, функционирование которого относится к сфере нематериальных видов деятельности (наука). Любая инновация, прежде всего, появляется в виде продукта творческого мышления учёного, изобретателя.

Такая деятельность совершается как и любая другая, сообразно алгоритму «триады» в рамках фундаментальных, прикладных исследований и разработок [24].

Вышеизложенное позволяет определить семантический статус понятий «инновация», «инновационный процесс», «инновационный продукт» следующим образом.

1. Понятие «инновация» может быть использовано в двух вариантах (развёрнутом и урезанном). Первый ассоциируется с *конечным* инновационным продуктом, второй – с *готовым* инновационным продуктом, предвещающим появление конечного.

Понятие «инновация» в развёрнутом формате должно применяться в случаях, когда потребительно-стоимостные (вещественные) и стоимостные (затратные) технологические цепочки проектируются с учётом технико-технологических, экономических, социальных, экологических составляющих как на уровне *тактических целей* (получение инновационного продукта с потребительно-стоимостными и стоимостными параметрами, востребованными обществом), так и на уровне *стратегических целей* (получение инновационного продукта, производство которого наносят минимальный ущерб биосфере).

Понятие «инновация» в урезанном формате может использоваться в случаях, когда потребительно-стоимостные (вещественные) и стоимостные (затратные) технологические цепочки функционируют в рамках *части* или незавершённого (урезанного) жизненного цикла продукта (современный вариант прочтения инноваций как внедрённого новшества, обладающего коммерческой ценностью).

Основное отличие второго варианта от первого состоит в игнорировании экологического компонента производства. Итог: цена инновации оказывается непомерно высокой, ведущей к деградации среды обитания «живого вещества» и человека как его органической части.

Современная политическая, социально-экономическая, финансовая, морально-нравственная ситуация такова, что реализовать потенциал инноваций, не нанося ущерба биосфере, практически

невозможно, ибо производство начала XXI века ориентировано на достижение максимально высоких прибылей любой ценой. Решение экологических проблем, несмотря на усилия мировой общественности и нарождающегося «зелёного бизнеса», не соответствует реальной опасности, идёт вяло.

Требуется время для смены *стоимостной* парадигмы социально-экономического развития на *потребительно-стоимостную*, позволяющую по-новому оценить технико-технологические, экономические, социальные и экологические аспекты продукта в их диалектическом единстве [25].

2. Понятие «инновационный процесс» может быть использовано по отношению к жизненным циклам, начиная от предмета природы (объект научного исследования), через промежуточные стадии, в рамках которых утилизируются (повторно используется, обезвреживается и т.п.) побочные технологические отходы, до предмета природы, когда к биогеохимическим циклам Земли подключаются утилизированные (вышедшие из употребления по причинам физического и морального износа) конечные продукты производства и быта.

3. Понятие «инновационный продукт» может быть использовано для обозначения тех конечных продуктов материального производства, которые нашли практическое применение с получением технико-технологического, экономического, экологического, социального эффектов и проведения мероприятий по утилизации побочных продуктов по ходу жизненного цикла и на завершающем его этапе через подключение балластного субстрата к биогеохимическим циклам Земли.

Третья позиция предполагает анализ результатов инновационного процесса в контексте двойственной сущности получаемого продукта. Согласно теории предмета труда созданный человеком (обществом) продукт есть органическое единство природного и социального начал.

Применительно к сфере *материального производства* «природное» ассоциируется с потребительно-стоимостной вещественной субстанцией продукта, «социальное» – с затратами абстрактного и конкретного труда.

Применительно к сфере *нематериального производства* природное потребительно-стоимостное начало характеризуется гармоничным взаимопроникновением эмпирического и абстрактно-понятийного начал с социальным – затратами абстрактного и конкретного труда.

Примечание. Понятие «конечный продукт» может использоваться по отношению к любой из стадий жизненного цикла предмета труда учёного при условии, если полученный результат (в том числе в виде «побочного продукта») обладает качеством «самодостаточности» и может быть использован в процессе дальнейшего научного поиска или в сферах образования-просвещения.

Предложенные автором определения акцентируют внимание на наличии в них экологической составляющей. Отличие такого подхода от существующих в литературе (В.А. Цукерман, А.Ф. Колчин, М.В. Овсянников и др.) состоит в том, что эффект утилизации рассматривается применительно ко всем стадиям жизненного цикла, а не только к одному из них – завершающему.

В заключение подчеркнём, что история науки свидетельствует об одной неопровержимой истине: в инновациях воплощаются фундаментальные открытия, сделанные за 10, 20 и даже 100-200 лет до появления инноваций. Поэтому именно фундаментальные исследования определяют настоящее и будущее благополучия мира в целом, отдельных государств в частности.

Фундаментальная наука не может выжить, если её обрекают на «самофи-

нансирование». Поэтому государство обязано брать на себя функции поддержки фундаментальных отраслей знания – естественных, технических, гуманитарных [26].

Справка. По данным Всемирного банка, сегодня инвестиции в научные исследования и инновационную деятельность таковы: Германия на научные исследования и разработки направляет около 2,7 % ВВП, США – 2,8 %, Япония – 3,5 %, Россия – 1,04 %.

2013 год вошёл в историю как год признания заслуг нашего великого соотечественника – Владимира Ивановича Вернадского (отмечалось 150-летие со дня его рождения). Уместно обратиться к следующим его высказываниям, не утратившим своей актуальности: «Интересы научного знания должны выступать вперед в текущей государственной политике. Свобода научного знания есть основное условие максимального успеха работы. Она не терпит ограничений. Государство, которое предоставило ей максимальный размах, ставит минимальные преграды, достигает максимальной силы в ноосфере и наиболее в ней устойчиво» [27]. И ещё одна существенная ремарка: «*Страна, которая не работает в области научной мысли*, которая только усваивает через образование чужую работу, *есть страна мертвая*. С каждым годом значение самостоятельной научной работы как основного элемента культуры становится более важным и неизменным, весь земной шар становится аренной государственных интересов» [28]. «Ученые не должны закрывать глаза на возможные последствия их научной работы, научного прогресса. Они должны себя чувствовать ответственными за все последствия их открытий. Они должны связать свою работу с лучшей организацией всего человечества» [29].

Библиографический список

1. Руководство Осло: рекомендации по сбору и анализу данных по инновациям. 3-е изд. М.: ЦИСН, 2006. 192 с.
2. Баев Л.А., Литке М.Г. К вопросу о категорийной системе оценки и управления инновационным развитием // Менеджмент в России и за рубежом. 2013. № 3. С. 20-27.
3. Бернар И., Колли Ж.К. Толковый экономический и финансовый словарь. Терминология. В 2-х т. Т.2. М.: Международные отношения, 1997. С. 81.
4. Фатхутдинов Р.А. Инновации и их развитие // Стандарты и качество. 2000. № 1. С. 49.
5. Пестриков С.В. Методология управления развитием экономических систем в промышленности: автореф. на соиск. уч. ст. к.э.н. Самара, 2004.
6. Арутюнов Е.К. Роль государства в инновационном развитии и инновационные приоритеты России // Сб. трудов 5-й Всероссийской научно-практической конференции «Научное, экспертно-аналитическое обеспечение национального стратегического проектирования инновационного и технологического развития России». М.: ИНИОН РАН, 2009. С. 22.
7. Яркова Е.Н. Ценностно-смысловые аспекты инновационной деятельности: к проблеме методологии изучения // Социум и власть. 2013. № 5. С. 95-100.
8. Костин А.В., Азгальдов Г.Г. Интеллектуальная собственность, инновации и квалиметрия // Экономические стратегии. 2008. № 2. С. 162-168.
9. Хардт М., Негри А. Множество: война и демократия в эпоху империй. М.: Культурная революция, 2006. 559 с.
10. Хромов Г.С. Инновации и вокруг них // Научно-исследовательские исследования: сб. науч. трудов. М.: ИНИОН РАН, 2008. 266 с.
11. Гусева Н.В. Инновационный процесс и инновационные программы: определения и ожидания // Сб. трудов 8-й Международной научно-практической конференции «Регионы России: стратегии и механизмы модернизации инновационного и технологического развития». Ч.П. М.: ИНИОН РАН, 2012. С. 340.
12. Экономическая энциклопедия / под ред. Л. Абалкина. М.: Экономика, 1999. 950 с.
13. Толковый словарь «Инновационная деятельность». Термины менеджмента и смежных областей (от А до Я). Новосибирск: Сибирское научное издательство, 2006. 480 с.
14. Цукерман В.А. Промышленная инвестиционная и инновационная политика. Энциклопедический словарь. Апатиты: Кольский научный центр РАН, 2009. С. 27.
15. Маннапов А. Система управления инновационной деятельности в организации // Проблемы теории и практики управления. 2013. № 6. С. 98-104.
16. Фатхутдинов Р.А. Инновации и развитие // Стандарты и качество, 2000. №1. С. 49.
17. Кокурин Д.И. Инновационная деятельность. М.: Экзамен, 2001. 576 с.
18. Овсянников Н.М. Инновационный менеджмент. М.: РУДН, 2002. 347 с.
19. Фатхутдинов Р.А. Инновационный менеджмент. СПб.: Питер, 2008. 448 с.
20. Балацкий Е.В. Качественные сдвиги в исследовательской деятельности // Инновационное общество. 2007. № 1-2. С. 64-68.
21. Фасхиев Х.А. Модель управления инновационной деятельностью предприятия // Менеджмент в России и за рубежом. 2013. № 4. С. 11-28.
22. Соснина Т.Н. Жизненный цикл продукта в аспекте постулатов логистики и теории предмета труда // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2008. № 1(14). С. 261-268.
23. Соснина Т.Н. Стоимость: экономический, экологический и социальный аспекты (методологическое исследова-

ние). Самара: Самарский научный центр РАН. 2008. 428 с.

24. Соснина Т.Н. Предмет труда и современное производство. Саратов: Саратовский университет, 1984. 116 с.

25. Соснина Т.Н. Анализ терминологического статуса понятия «полная стоимость» (методологический аспект) // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2011. № 1. С. 227-237.

26. Шаракшанэ С.А. О реформировании Российской академии наук (по материалам экспертного опроса). М.: ИНИОН РАН, 2013. 48 с.

27. Вернадский В.И. Научная мысль как планетное явление. М.: Наука. 1981. 105 с.

28. Вернадский В.И. Публицистические статьи. М.: Наука. 1995. 169 с.

29. Вернадский В.И. Об ответственности учёных. М.: Наука. 1988. 395 с.

Информация об авторе

Соснина Тамара Николаевна, доктор философских наук, профессор, профессор кафедры философии и истории, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследователь-

ский университет). E-mail: tnsssau@bk.ru. Область научных интересов: методология функционирования материальных и информационных потоков, социальная экология, теория управления.

SEMANTIC STATUS OF THE CONCEPTS «INNOVATION», «INNOVATION PROCESS», «INNOVATIVE PRODUCT» (methodological aspect)

© 2014 T. N. Sosnina

Samara State Aerospace University, Russian Federation

The paper deals with the semantic roots of such concepts as «innovation», «innovation process», «innovative product»; reasons are given for the necessity of looking for criteria of distinguishing innovations from pseudoinnovations. The author's version of defining the above-mentioned concepts from the perspective of the theory of the subject of labour is presented. The «innovation» concept can be used in cases when consumer-cost and cost process chains are designed with regard for technical and technological, economic, social and ecological components both at the level of tactical aims (obtaining a product with a parameter required by the society) and at the level of strategic aims (obtaining a product the production of which causes minimum damage to the biosphere). The «innovation process» concept can be used referring to life cycles in which, starting from the product of nature (the object of research), through intermediate stages at which the technological waste is utilized to the product of nature when the final industrial and household products out of use are added to the biogeochemical Earth cycles. The «innovative product» concept can be used to denote the final products of material production that find practical application in the achievement of the required technical and technological, economic, social and ecological effects and taking measures to utilize the by-products during the life cycle and at the final stage through the connection of the ballast substrate to the biogeochemical Earth cycles.

Innovation, innovative activity, innovation process, innovative product; finished and final product of innovation.

References

1. Oslo Manual: Guidelines for Collecting and Interpreting Innovation Data / 3rd Edition. Paris: OECD / ES, 2005. 192 p.
2. Bayev L.A., Litke M.G. To a question of an assessment and management of innovative development categorical system // Management in Russia abroad Journal. 2013. No. 3. P. 20-27. (In Russ.)
3. Bernar I. Collie G.K. Tolkovyy ekonomicheskii i finansovyy slovar'. Terminologiya [Explanatory economic and financial dictionary. Terminology]. Moscow: Mezhdunarodnye otnosheniya Publ., 1997. V. 2. 81 p.
4. Fatkhutdinov R.A. Innovations and their development // Standarty i kachestvo. 2000. No.1. p. 49.
5. Pestrikov S.V. Metodologiya upravleniya razvitiem ekonomicheskikh sistem v promyshlennosti. Avtoref. na soisk. uch. st. k.e.n [Methodology of managing the development of economic systems in industry. Author's abstract of the Candidate's dissertation (Economics)]. Samara. 2004.
6. Arutyunov E.K. Rol' gosudarstva v innovatsionnom razvitiy i innovatsionnye prioritety Rossii // Sbornik trudov 5-y Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Nauchnoe, ekspertno-analiticheskoe obespechenie natsional'nogo strategicheskogo proektirovaniya innovatsionnogo i tekhnologicheskogo razvitiya Rossii». Moscow: INION RAN, 2009. P. 22. (In Russ.)
7. Yarkova E.N. Value-semantic aspects of innovation activity: towards the methodology study // Society and power. 2013. No.5. P. 95-100. (In Russ.)
8. Kostin A.V., Azgaldov G.G. Intellectual property, innovations and qualimetry // Ekonomicheskie strategii. 2008. No. 2. P. 162-168. (In Russ.)
9. Hardt M., Negri A. Mnozhestvo: voyna i demokratiya v epokhu imperiy [War and democracy during the era of empires]. Moscow: Kul'turnaya revolyutsiya Publ., 2004. 559 p.
10. Khromov G.S. Innovatsii i vokrug nikh // Naukovedcheskie issledovaniya: sbornik nauchnykh trudov. Moscow: INION RAN, 2008. 266 p.
11. Guseva N.V. Innovatsionny protsess i innovatsionnye programmy: opredeleniya i ozhidaniya // Sbornik trudov 8-y mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Regiony Rossii: strategii i mekhanizmy modernizatsii innovatsionnogo i tekhnologicheskogo razvitiya». V. II. Moscow: INION RAN, 2012. P. 340. (In Russ.)
12. Ekonomicheskaya entsiklopediya [Economic encyclopedia] / Edited by L. Abalkin. Moscow: Ekonomika Publ., 1999. 950 p.
13. Tolkovyy slovar' «Innovatsionnaya deyatel'nost'». Terminy menedzhmenta i smezhnykh oblastey (ot A do Ya) [Explanatory dictionary "Innovative activity". Terms of management and related areas (from A to Z)]. Novosibirsk: Sibirskoe nauchnoe izdatel'stvo Publ., 2006. 480 p.
14. Zuckerman W.A. Promyshlennaya investitsionnaya i innovatsionnaya politika. Entsiklopedicheskii slovar' [Industrial investment and innovation policy. Encyclopedic dictionary]. Apatity: Kol'skiy nauchnyy tsentr RAN Publ., 2009. P. 27.
15. Mannapov A. Innovation Management System in Organization // Problemy teorii i praktiki upravleniya. 2013. No.6. P. 98-104. (In Russ.)
16. Fatkhutdinov R.A. Innovations and development // Standards and quality, 2000. No.1. P. 49. (In Russ.)
17. Kokurin D.I. Innovatsionnaya deyatel'nost' [Innovation activity]. Moscow: Ekzamen Publ., 2001. 576 p.
18. Ovsyannikov N.M. Innovatsionny menedzhment [Innovation management]. Moscow: Peoples' Friendship Univ. of Russ. Publ., 2002. 347 p.
19. Fatkhutdinov R. A. Innovatsionny menedzhment [Innovation management]. Saint Petersburg: Piter Publ., 2008. 448 p.
20. Balatsky E.V. Qualitative shifts in research activity // Innovative society. 2007. No. 1-2. P. 64-68. (In Russ.)
21. Faskhiyev H.A. Model of management of the innovative enterprise activity //

Management in Russia and abroad Journal. 2013. No. 4. P. 11-28. (In Russ.)

22. Sosnina T.N. Product life cycle in the aspect of postulates of logistics and labour object theory // Vestnik of the Samara State Aerospace University. 2008. No. 1(14). P. 261-268. (In Russ.)

23. Sosnina T.N. Stoimost': ekonomicheskiy, ekologicheskiy i sotsial'nyy aspekty (metodologicheskoe issledovanie) [Cost: economic, ecological and social aspects (methodological research)]. Samara: Samarskiy nauchnyy tsentr RAN Publ., 2008. 428 p.

24. Sosnina T.N. Predmet truda i sovremennoe proizvodstvo [Object of labor and modern production]. Saratov: Saratov State University Publ., 1984. 116 p.

25. Sosnina T.N. Analysis of the terminological status of the concept "overall cost"

(methodological aspect) // Vestnik of the Samara State Aerospace University. 2011. No. 1. P. 227-237. (In Russ.)

26. Sharakshane S.A. O reformirovani Rossijskoy akademii nauk (po materialam ekspertnogo oprosa). [Reforming of the Russian Academy of Sciences (according to the materials of expert poll)]. Moscow: INION RAN, 2013. 48 p.

27. Vernadsky V.I. Nauchnaya mysl' kak planetnoe yavlenie [Scientific thought as a planetary phenomenon]. Moscow: Nauka Publ., 1981. 105 p.

28. Vernadsky V.I. Publitsisticheskie stat'i [Publicistic articles]. Moscow: Nauka Publ., 1995. 169 p.

29. Vernadsky V.I. Ob otvetstvennosti uchenykh [Responsibility of scientists]. Moscow: Nauka Publ., 1988. 395 p.

About the author

Sosnina Tamara Nikolayevna, Doctor of Philosophical Science, Professor, Department of Philosophy and History, Samara State Aerospace University, Russian Federa-

tion. E-mail: tnsssau@bk.ru. Area of Research: methodology of functioning of material and information flows, social ecology, theory of management.

**ВЕСТНИК
САМАРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
имени академика С. П. КОРОЛЁВА
(национального исследовательского университета)**

№ 3 (45)

2014

**Корректоры: Т. К. Кретинина, Ю. Н. Литвинова
Компьютерная вёрстка Т. А. Ефимова
Переводчик Е. И. Безрукова**

Каталожная цена: 1000 руб.

Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 23,5
Тираж 200. Заказ _____

Отпечатано в издательстве СГАУ
443086, г. Самара, Московское шоссе, 34

**Правила оформления статей для журнала
"Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени
академика С. П. Королёва (национального исследовательского университета)"**

1. Статья представляется в двух экземплярах, распечатанных на лазерном принтере с одной стороны листа формата А4 в режиме качественной печати, а также в электронном виде на отдельном носителе (CD, DVD). Каждый экземпляр должен быть подписан всеми авторами и вместе с комплектом документов (см. п. 7) отправлен на адрес редакции журнала «Вестник СГАУ»: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34, СГАУ, ком. 212а, корп. 3А. Тел.: (846) 267-48-41; e-mail: vest@ssau.ru.

2. Текст статьи представляется в формате Microsoft Word, подготовленный по следующим требованиям:

- объём статьи – до 10 страниц формата А4;
- поля текста – по 2,5 см с каждой стороны;
- шрифты – Times New Roman, Symbol;
- междустрочный интервал – одинарный;
- отступ первой строки абзаца – 1 см;
- выравнивание – по ширине страницы;
- страницы должны быть пронумерованы.

Имя файла определяется по фамилии первого автора: **Иванов.doc**.

Замена буквы «ё» на букву «е» в тексте недопустима.

3. Допускается наличие рисунков, формул и таблиц по тексту.

3.1. Рисунки размещаются как в самом тексте статьи, так и в отдельных файлах. Рисунки могут быть созданы средствами Microsoft Word/Excel или представлены в форматах JPEG, GIF, TIFF, PNG.

Подпись к рисунку начинается со слова «Рис.» и номера по порядку; располагается под рисунком, выравнивание – по центру, курсив, кегль – 10 пт. Для ссылки на рисунок по тексту статьи следует использовать сокращение, например, рис. 1.

3.2. Для набора математических выражений и формул следует использовать Microsoft Equation 3.0 (и выше) или MathType по следующим требованиям:

- буквы латинского алфавита - Times New Roman; курсив, кегль 12 пт;
- буквы греческого алфавита - Symbol; курсив, кегль 12 пт;

Все специальные символы в тексте статьи должны выполняться в математическом редакторе. **Не допускается применение в тексте вставных символов Microsoft Word при наборе математических выражений и формул.**

Формулы следует печатать с новой строки; нумерация формул осуществляется в порядке следования по тексту статьи. Нумеровать следует только формулы, на которые в тексте делаются ссылки. Номер формулы и ссылка на неё в тексте обозначается числом в круглых скобках: (1), (2), (3). Допускается разбивка длинных формул на строки; длина формулы в строке строго ограничена – 80 мм.

3.3. Заголовок таблицы начинается со слова «Таблица» и номера по порядку; располагается над таблицей, выравнивание – по левому краю, кегль – 10 пт. Для ссылки на таблицу по тексту статьи следует использовать сокращение, например, табл. 1.

Обязательно наличие подрисуночных подписей и подписей к таблицам.

4. Аннотация к статье (на русском и английском языках) должна быть информативной (не содержать общих слов), содержательной (отражать основное

содержание статьи и результаты исследований), структурированной (следовать логике описания результатов в статье). Авторское резюме должно описывать основные цели исследования; объяснить методику проведения исследования (без методологических деталей); суммировать наиболее важные результаты и их важность. Рекомендуемый объем аннотации – 150-250 слов.

Аннотация не должна содержать ссылок на литературу и аббревиатуры (если возможно).

Аннотация на английском языке должна содержать англоязычную специальную терминологию по тематике публикации.

5. Библиографический список приводится на русском и английском языках отдельными списками. Требования к оформлению библиографических ссылок учитывают правила ГОСТ 7.0.5-2008.

Литературные источники располагаются в порядке их использования по тексту статьи в виде нумерованного списка. Ссылки на литературные источники в тексте приводятся в квадратных скобках и отделяются запятыми или тире, например, [1-3], [1,2,5].

5.1. Библиографический список на английском языке (References) должен полностью повторять структуру русскоязычного списка. Рекомендуемая схема описания русскоязычных публикаций на английском языке:

- авторы (транслитерация);
- перевод заглавия статьи на английский язык (для русскоязычных книг и монографий название приводится в транслитерации, далее перевод на английский язык в квадратных скобках);
- название русскоязычного источника (транслитерация или английский вариант, если таковой имеется);
- перевод названия источника на английский язык в квадратных скобках (для журналов можно не делать);
- выходные данные с обозначениями на английском языке (том – V., № – no., C. – P.);
- указание на язык статьи (In Russ.) после описания статьи.

5.2. Если русскоязычная публикация имеет переводной вариант (на английском языке), то в английской части библиографии приводятся переводные данные публикации.

5.3. Включение в библиографический список неопубликованных материалов не допускается.

6. В каждой статье должны быть указаны следующие данные **на русском и английском языках** (по структуре оформления рукописи):

- УДК (при необходимости MSC);
- название статьи (12 пт, все буквы прописные жирное начертание);
- инициалы, фамилия автора(ов) (12 пт);
- название организации, город, страна;
- аннотация (10 пт);
- ключевые слова (каждое ключевое слово или словосочетание отделяется от другого запятой или точкой с запятой) (10 пт, курсив);
- текст статьи (12 пт) (допускается разбиение текста на разделы: Введение, ..., Заключение);
- библиографический список (References) (заголовки 12 пт, жирное начертание);
- информация об авторах: учёная степень, учёное звание, должность (с указанием подразделения), организация; электронная почта (e-mail); область научных интересов.

6.1. Если авторы работают в разных организациях, то принадлежность указывается с помощью надстрочного знака: ^{1, 2}. Если авторы работают в одной организации, оцифровка индексами фамилий и организации не требуется.

6.2. Англоязычный блок, содержащий название статьи, ФИО авторов, наименование организации, аннотацию, ключевые слова, библиографический список, информацию об авторах, приводится отдельным разделом после информации об авторах на русском языке.

7. К тексту статьи прилагается комплект сопроводительных документов:

- направление организации (если авторы не являются сотрудниками СГАУ) на фирменном бланке, подписанное её руководителем или заместителем по научной работе, заверенное печатью;
- отзыв специалиста по научному направлению статьи (не являющегося сотрудником подразделения, где работают авторы));
- акт экспертизы о возможности опубликования в открытой печати;
- контактная информация: фамилия, имя, отчество (полностью) на каждого автора; адрес для переписки и телефон (не публикуются в журнале).

8. Статьи, не отвечающие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются. Рукописи и сопроводительные документы не возвращаются. Датой поступления рукописи считается день получения редакцией окончательного текста.

9. При подготовке аннотации и оформлении библиографического списка на английском языке рекомендуется использовать следующие методические материалы:

Кириллова О.В. Редакционная подготовка научных журналов по международным стандартам. М., 2013. 90 с.,

(http://shkola.neicon.ru/images/documents/1_kirillovaredprep_2013.pdf)

- раздел 3.3 – «Авторское резюме и ключевые слова на английском языке»;
- раздел 3.4 – «Списки литературы в латинице - References».

УДК 535.42

ФОРМИРОВАНИЕ СВЕТОВЫХ ШАРОВ НА ОСНОВЕ ВСТРЕЧНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ОСТРОСФОКУСИРОВАННЫХ ПУЧКОВ С РАЗЛИЧНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ

© 2013 С. Н. Хонина, А. В. Устинов

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Рассмотрено формирование сферических распределений интенсивности на основе встречной интерференции остросфокусированных вихревых пучков с различной поляризацией. Формирование трёхмерных распределений осуществляется простым способом с помощью оптимизации ширины и положения одной кольцевой диафрагмы. Для узкой диафрагмы оптимальные параметры вычисляются аналитически, а для широкой диафрагмы – дополнительно численно корректируются. Показано, что в зависимости от поляризации, порядка вихревой сингулярности и дополнительного фазового набег в одном из пучков можно формировать как цельные, так и полые световые шары субволнового радиуса, состоящие из различных компонентов электрического поля.

(Текст аннотации)

Острая фокусировка, встречная интерференция, трёхмерное субволновое распределение интенсивности, поляризация, вихревая фазовая функция.

Формирование заданных трёхмерных распределений интенсивности остросфокусированного лазерного излучения актуально в задачах оптического захвата и манипулирования, микроскопии и записи данных.

(Текст статьи)

Библиографический список

1. Хонина С.Н., Вологовский С.Г. Управление вкладом компонент векторного электрического поля в фокусе высокоапертурной линзы с помощью бинарных фазовых структур // Компьютерная оптика. 2010. Т. 34, №1. С. 58-68.
2. Хонина С.Н., Устинов А.В. Формирование тонкой световой трубки при острой фокусировке азимутально-поляризованного излучения // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2012. Т. 14, № 6. С. 279-284.
3. Sheppard C.J.R., Gong W., Si K. Polarization effects in 4Pi microscopy. // Micron. – 2011. V. 42. P. 353–359.
4. ...

Информация об авторах

Хонина Светлана Николаевна, доктор физико-математических наук, профессор кафедры технической кибернетики, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: khonina@smr.ru. Область научных интересов: сингулярная оптика, дифракционная оптика, оптический анализ изображений.

Устинов Андрей Владимирович, аспирант кафедры технической кибернетики, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: andr@smr.ru. Область научных интересов: дифракционная оптика, разработка программ оптического моделирования, обработка изображений.

FORMATION OF LIGHT BALLS ON THE BASIS OF INTERFERENCE OF ONCOMING FINE-FOCUSED BEAMS WITH DIFFERENT POLARIZATIONS

© 2013 S. N. Khonina, A. V. Ustinov

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The paper deals with the formation of spherical intensity distributions on the basis of the interference of oncoming fine-focused vortex beams with different polarization. The formation of three-dimensional distributions is accomplished in a simple way by optimizing the width and position of a single annular diaphragm. The optimum parameters are analytically estimated for a narrow ring aperture, while those for a broad diaphragm are further numerically corrected. It is shown that, depending on the polarization, the order of the vortex singularity and an additional phase advance in one of the beams both solid and hollow light balls of a subwavelength radius consisting of different components of the electric field can be formed.

(Text of abstract)

Sharp focusing, interference of oncoming beams, three-dimensional subwavelength intensity distribution, polarization, vortex phase function.

References

1. Khonina S.N., Volotovskiy S.G. Control by contribution of components of vector electric fields in focus of a high-aperture lens by means of binary phase structures. *Computer Optics*, 2010. V. 34, no. 1. P. 58-68. (In Russ.)
2. Khonina S.N., Ustinov A.V. Forming of the thin light tube at sharp focusing of azimuthally-polarized radiation. *Izv. SNC RAN*, 2012, v. 14, no 6, p. 279-284. (In Russ.)
3. Sheppard C.J.R., Gong W. Si K. Polarization effects in 4Pi microscopy. *Micron*, 2011, v. 42, p. 353–359.
4. ...

About the authors

Khonina Svetlana Nikolaevna, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Technical Cybernetics, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: khonina@smr.ru. Area of research: singular optics, diffractive optics, optical image processing.

Ustinov Andrey Vladimirovich, Postgraduate Student of the Department of Technical Cybernetics, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: andr@smr.ru. Area of research: diffractive optics, software design for optical modeling, image processing.