

**ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ПОВОЛЖСКИЙ РЕГИОН
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

№ 4 (32)

2014

СОДЕРЖАНИЕ

**ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

<i>Вашкевич Н. П., Карамышева Н. С., Зинкин С. А.</i> Организация распределенной агентно-ориентированной системы управления базами данных в метакомпьютерной среде с топологией типа «логическое кольцо»	5
<i>Волчихин В. И., Зинкин С. А.</i> Самомодификация топологии и развертывания объектов в виртуализированных сетях хранения и обработки данных (II. Операционная семантика и исполнительные механизмы)	18
<i>Лушников А. В.</i> Алгоритм выбора оптимальных траекторий обучения в двухуровневой системе образования	32
<i>Шептунов С. А., Соломенцев Ю. М., Кабак И. С., Суханова Н. В., Дробышева Т. И.</i> Нейросетевая модель формирования и развития личности ребенка в процессе его обучения в средней школе	41
<i>Аверченков А. В., Леонов Е. А.</i> Архитектура и принципы самообучения конструкторско-технологических экспертных систем, основанных на знаниях с использованием мониторинга сети Интернет	53

**ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И РАДИОТЕХНИКА**

<i>Пинишин А. В., Мясникова Н. В., Пинишин В. Н.</i> Повышение точности и качества воспроизведения динамическим стендом управляющих воздействий	62
<i>Гринь И. В., Ершов Р. А., Морозов О. А., Фидельман В. Р.</i> Оценка координат источника радиоизлучения на основе решения линеаризованной системы уравнений разностно-дальномерного метода	71
<i>Косников Ю. Н.</i> Построение интерфейса человек–компьютер для системы автоматизированного управления сложными объектами	82
<i>Шикина В. Е.</i> Изготовление цилиндрического пьезокерамического первичного преобразователя для массового расходомера жидкостей	93

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<i>Ваишурин А. С., Орлов Л. Н., Чегуров М. К.</i> Оценка влияния температурных условий эксплуатации на пассивную безопасность вахтовых автобусов.....	102
<i>Крюков Д. Б., Прыщак А. В., Гуськов М. С.</i> Исследование влияния конфигурации упрочняющих элементов на прочностные свойства моделей композиционных материалов системы титан-алюминий	112
<i>Ашанин В. Н., Мельников А. А., Цуриков С. А.</i> Измеритель мгновенного массового расхода воздуха для системы управления двигателем автомобиля	120
<i>Кондрашов А. Г., Фасхутдинов А. И.</i> Повышение эффективности планетарной шлиценатки	130
<i>Авдеева Т. П., Розен А. Е.</i> Исследование эффективности утилизации промышленных отходов методом пиролиза	137
<i>Литвинов А. Н., Хади О. Ш., Юрков Н. К.</i> Моделирование напряженно-деформированного состояния слоистых структур радиоэлектронных средств при технологических и эксплуатационных воздействиях	146
<i>Богомолов А. И., Голощапов В. М., Савицкий В. Я., Муйземнек А. Ю., Зиновьев Р. С.</i> Исследование влияния микроструктуры полимерных композиционных материалов на эксплуатационные свойства подшипников скольжения импульсных тепловых машин.....	158
<i>Верещака А. С., Сотова Е. С., Верещака А. А.</i> Работоспособность инструмента из смешанной керамики с нанодисперсным многослойным покрытием при обработке закаленной инструментальной стали.....	177
<i>Терехов М. В., Колякин В. В., Леонов Ю. А.</i> Автоматизация проектирования гидравлических систем с использованием параметрического моделирования	185
<i>Куликов М. Ю., Попов А. Ю., Флоров А. В., Сан Маунг</i> Пути снижения теплонапряженности режущего клина при колесотокарной обработке.....	192

**UNIVERSITY PROCEEDINGS
VOLGA REGION
ENGINEERING SCIENCES**

№ 4 (32)

2014

CONTENT

**COMPUTER SCIENCE, COMPUTER
ENGINEERING AND CONTROL**

<i>Vashkevich N. P., Karamysheva N. S., Zinkin S. A.</i> Design and development of distributed agent-oriented database management system in metacomputing media with topology of the “logical ring” type.....	5
<i>Volchikhin V. I., Zinkin S. A.</i> Topology self-modification and deployment of objects in virtualized data storage and processing networks (II. Operational semantics and actuators)	18
<i>Lushnikov A. V.</i> Algorithm of optimal learning trajectories selection in a two-tier education system.....	32
<i>Sheptunov S. A., Solomentsev Yu. M., Kabak I. S., Sukhanova N. V., Drobysheva T. I.</i> Neural network model of child’s identity development in the course of high school training	41
<i>Averchenkov A. V., Leonov E. A.</i> Architecture and principles of self-learning of engineering and Design expert systems based on knowledge using Monitoring of Internet	53

**ELECTRONICS, MEASURING EQUIPMENT
AND RADIO ENGINEERING**

<i>Pinishin A. V., Myasnikova N. V., Pinishin V. N.</i> Improving playback accuracy and quality of a dynamic control actions stand.....	62
<i>Grin' I. V., Ershov R. A., Morozov O. A., Fidel'man V. R.</i> Evaluation of radio source’s coordinates based on solution of linearized system of equations by range-difference method.....	71
<i>Kosnikov Yu. N.</i> Building of the “human-computer” interface for the system of complex objects automatic control.....	82
<i>Shikina V. E.</i> Production of cylindrical piezoceramic primary converter for mass flowmeter for liquids	93

MACHINE SCIENCE AND BUILDING

<i>Vashurin A. S., Orlov L. N., Chegurov M. K.</i> Estimation of temperature conditions' influence on passive safety of shift-buses	102
<i>Kryukov D. B., Pryshchak A. V., Gus'kov M. S.</i> Research of hardeners' configuration influence on strength properties of titanium-aluminum composite materials' models	112
<i>Ashanin V. N., Mel'nikov A. A., Tsurikov S. A.</i> Instantaneous mass air consumption meter for car engine control systems	120
<i>Kondrashov A. G., Faskhutdinov A. I.</i> Improving efficiency of planetary spline-knurling.....	130
<i>Avdeeva T. P., Rozen A. E.</i> Research of utilization efficiency of industrial waste through pyrolysis.....	137
<i>Litvinov A. N., Khadi O. Sh., Yurkov N. K.</i> Mode of deformation modeling in layered structures of radio-electronic means at technological and operational impacts.....	146
<i>Bogomolov A. I., Goloshchapov V. M., Savitskiy V. Ya., Muyzemnek A. Yu., Zinov'ev R. S.</i> Study of polymer composite materials' microstructure influence on operating abilities of journal bearings in pulse heat engine.....	158
<i>Vereshchaka A. S., Sotova E. S., Vereshchaka A. A.</i> Operability of a mixed ceramics instrument with nanodispersed multilayer coating at hardened tool steel working.....	177
<i>Terekhov M. V., Kolyakin V. V., Leonov Yu. A.</i> Automation of hydraulic system design using parametric modeling.....	185
<i>Kulikov M. Yu., Popov A. Yu., Florov A. V., San Maung</i> Methods of wedge's calorific intensity reduction at car-wheel processing.....	192

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 681.32

Н. П. Вашкевич, Н. С. Карамышева, С. А. Зинкин

ОРГАНИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ АГЕНТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БАЗАМИ ДАННЫХ В МЕТАКОМПЬЮТЕРНОЙ СРЕДЕ С ТОПОЛОГИЕЙ ТИПА «ЛОГИЧЕСКОЕ КОЛЬЦО»¹

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования являются метакомпьютерные системы обработки данных и знаний, распределенные системы баз данных. Под метакомпьютером подразумевается виртуальная система с заданной архитектурой, развернутая на глобальной или локальной вычислительной сети. Предметом исследования являются процессы управления обработкой реляционных баз данных в метакомпьютерах с архитектурой логического кольца. Целью работы является разработка и проверка модели взаимодействия асинхронных процессов при обработке фрагментированных отношений реляционной базы данных для основных операций реляционной алгебры в логическом кольце узлов сети ЭВМ, образующем распределенную систему управления базой данных (СУБД).

Материалы и методы. Исследование и организация процессов управления обработкой данных проведены на основе формализма асинхронных предикатных сетей с последующим статистическим моделированием выполнения множества согласованных продукционных правил.

Результаты. Продемонстрирована возможность применения модели асинхронных предикатных сетей для согласования процессов и агентов при организации обработки структурированных данных. Предложенные методы и алгоритмы распределенной обработки данных также могут быть реализованы и на многоядерных процессорах, в системах кластерного типа, ориентированных не только на взаимодействия агентов, но и на передачу сообщений.

Выводы. Предложены основные схемы выполнения бинарных и унарных операций реляционной алгебры, определенных над фрагментами, являющимися непересекающимися подмножествами кортежей отношений. Используются известные определения и алгоритмы выполнения операций реляционной алгебры для нефрагментированных отношений. Показана возможность конвейерной реализации операций в логическом кольце, что повышает уровень параллельности при обработке данных в распределенной СУБД.

Ключевые слова: распределенные базы данных, сетевая среда, мобильные агенты, асинхронные предикатные сети, логическое кольцо, статистическое моделирование.

¹ Статья подготовлена в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития НТК России на 2014–2020 гг.» (Соглашение № 14.574.21.0045 от 19.06.2014).

N. P. Vashkevich, N. S. Karamysheva, S. A. Zinkin

DESIGN AND DEVELOPMENT OF DISTRIBUTED AGENT-ORIENTED DATABASE MANAGEMENT SYSTEM IN METACOMPUTING MEDIA WITH TOPOLOGY OF THE “LOGICAL RING” TYPE

Abstract.

Background. The research object is the metacomputing systems of data and knowledge processing, distributed database systems. Under a metacomputer one should understand a virtual system with specified architecture, deployed on a global or local computing network. The research subject is the management processes of relation databases processing in metacomputers with logical ring architecture. The aim of the work is to develop and check the model of asynchronous processes interaction at processing of fragmentary relations of a relation database for basic operations of relation algebra in a logical ring of computer network units, forming a distributed system of database management.

Materials and methods. Research and organization of data processing management processes were carried out on the basis of formalism of asynchronous predicate networks with further statistical modeling of multiple coordinated productive rules execution.

Results. The authors demonstrated the possibility of using the model of asynchronous predicate networks for coordination of processes and agents at structurized data processing organization. The suggested methods and algorithms of distributed data processing may also be implemented in multicore processors, cluster systems, oriented towards agents' interaction as well as message transmission.

Conclusions. The researchers suggested the basic schemes of execution of relation algebra's binary and unary operations, determined over fragments, being disjoint subsets of relation sequences. The authors used well-known definitions and algorithms for execution of relation algebra's operations for nonfragmented relations. The works shows the possibility of pipeline realization of operations in a logical ring that increases the level of parallelism at data processing in a distributed system of database management.

Key words: distributed databases, network environment, mobile agents, asynchronous predicate network, logical ring, statistical modeling.

Введение

В связи с интенсивным развитием облачных и грид-технологий, включая и технологии сетевого хранения данных (storage grid), наблюдается быстрое количественное и качественное развитие сетевых систем управления базами данных (СУБД). Поэтому актуальна разработка СУБД, работающих на всем спектре параллельных архитектур от многоядерных процессоров до грид-сетей. Современные языки параллельного и распределенного программирования (например: C#, MC#, технология CUDA [1–3] и др.) позволяют проектировать распределенные приложения и программные системы обработки баз данных. Известно, что при проектировании конкретной архитектуры сетевой или многомашинной СУБД может быть предусмотрено выполнение следующих параллельных операций:

– параллельная обработка данных в центральной (клиентской) ЭВМ и в облачном или грид-сервисе, реализующем функции машины базы данных (МБД);

- анализ запроса и обработка данных;
- доступ к данным и обработка;
- передача данных и обработка;
- параллельный доступ и параллельная обработка данных;
- параллельная обработка данных.

Последние пять пунктов соответствуют работе [4], а первый несколько модифицирован нами в соответствии с современными тенденциями развития новых информационных технологий. В этой работе полагается, что первые четыре операции, скорее, следует считать конвейерной обработкой данных.

Реализация конвейерной обработки возможна в различных проектах, например, в проекте МБД университета Карнеги-Меллона (обработка данных при помощи систолических матриц), в МБД DIRECT Висконсинского университета, в МБД DBC (Database Computer for Very Large Database) университета штата Огайо и особенно эффективно реализована в машине GRACE Токийского университета [4]. Многосерверная сетевая база данных с циркулирующей информацией рассмотрена также в работе [5], где предложена организация локальной вычислительной сети, работающей по принципу «клиент–сервер» при удовлетворении запросов от рабочих станций к сегментированной базе данных, находящейся на нескольких серверах.

Целью настоящей работы является описание реализации кольцевой обработки сегментов реляционной базы данных в сетевой агентно-ориентированной среде. При этом без ограничения общности предложенные методы и алгоритмы распределенной обработки данных могут быть реализованы и на многоядерных процессорах, а также в системах кластерного типа, ориентированных не на коллектив взаимодействующих агентов, а на передачу сообщений.

1. Общая схема выполнения операций над сегментами отношений

На рис. 1 представлена общая схема организации выполнения операций реляционной алгебры над фрагментированными отношениями реляционной базы данных. Агенты *A*, *B*, *C*, *D*, *E* и *F* выполняют глобальные операции реляционной алгебры, осуществляя при необходимости конвейерный или другие разновидности коллективного обмена данными друг с другом. Основной обмен данными происходит в двунаправленном логическом кольце агентов. В тексте данной работы использован прямой шрифт для имен агентов *A*, *B*, *C*, *D*, *E*, *F* для того, чтобы отличать эти имена от имен *A*, *B* и *C* отношений.

Масштабируемость агентно-ориентированной схемы реализации кольца для другого числа агентов (логических узлов метакomпьютера) очевидна. Примерная схема сетевой реализации физического кольца метакomпьютера представлена на рис. 2, где *A*, *B*, *C*, *D*, *E*, *F* – логические узлы-агенты; y_i – IP-адреса узлов, идентифицирующие физические компьютеры локальных сетей, связанных в типовую TCP/IP сеть посредством маршрутизаторов *M* и коммутаторов *K*.

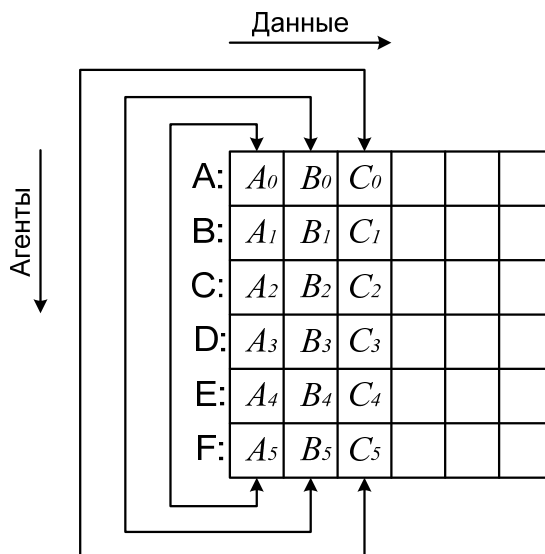


Рис. 1. Общая схема логической организации агентно-ориентированной метакомпьютерной системы для распределенных баз данных

2. Выполнение операций реляционной алгебры над сегментами отношений в логическом кольце

Предложим основные схемы выполнения бинарных и унарных операций реляционной алгебры, определенных над фрагментами $A_0, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$ и $B_0, B_1, B_2, B_3, B_4, B_5$ — непересекающимися подмножествами кортежей отношений A и B соответственно. Определения и алгоритмы выполнения операций реляционной алгебры для нефрагментированных отношений хорошо известны [6–9] и являются основой для описанной ниже агентно-ориентированной реализации. Ее отличие и новизна состоят в распределенной реализации и организации межагентных взаимодействий в процессе обработки фрагментов отношений. Реализация операций в подобной системе является, по существу, расширением интерфейса передачи сообщений MPI [10, 11]. В работе [11] рассмотрена сетевая реализация интерфейса передачи сообщений MPI как облачного сервиса в агентно-ориентированных метакомпьютерных системах. Основные варианты обмена сообщениями между процессами описаны асинхронными предикатными сетями, ранее предложенными в работе [12].

Бинарная операция объединения « $\cup$ » выполняется над отношениями A и B с одинаковой схемой. Результат C имеет такую же схему. Агенты A, B, C, D, E и F метакомпьютерной системы при реализации данной операции выполняют следующие действия над фрагментами отношений A и B :

– формирование частичных результатов:

$$A: C_0 = A_0 \cup B_0;$$

$$B: C_1 = A_1 \cup B_1;$$

$$C: C_2 = A_2 \cup B_2;$$

$$D: C_3 = A_3 \cup B_3;$$

$$E: C_4 = A_4 \cup B_4;$$

F: $C_5 = A_5 \cup B_5$;

– формирование окончательного результата:

A: $C = (((C_0 \cup C_1) \cup C_2) \cup C_3) \cup C_4) \cup C_5$.

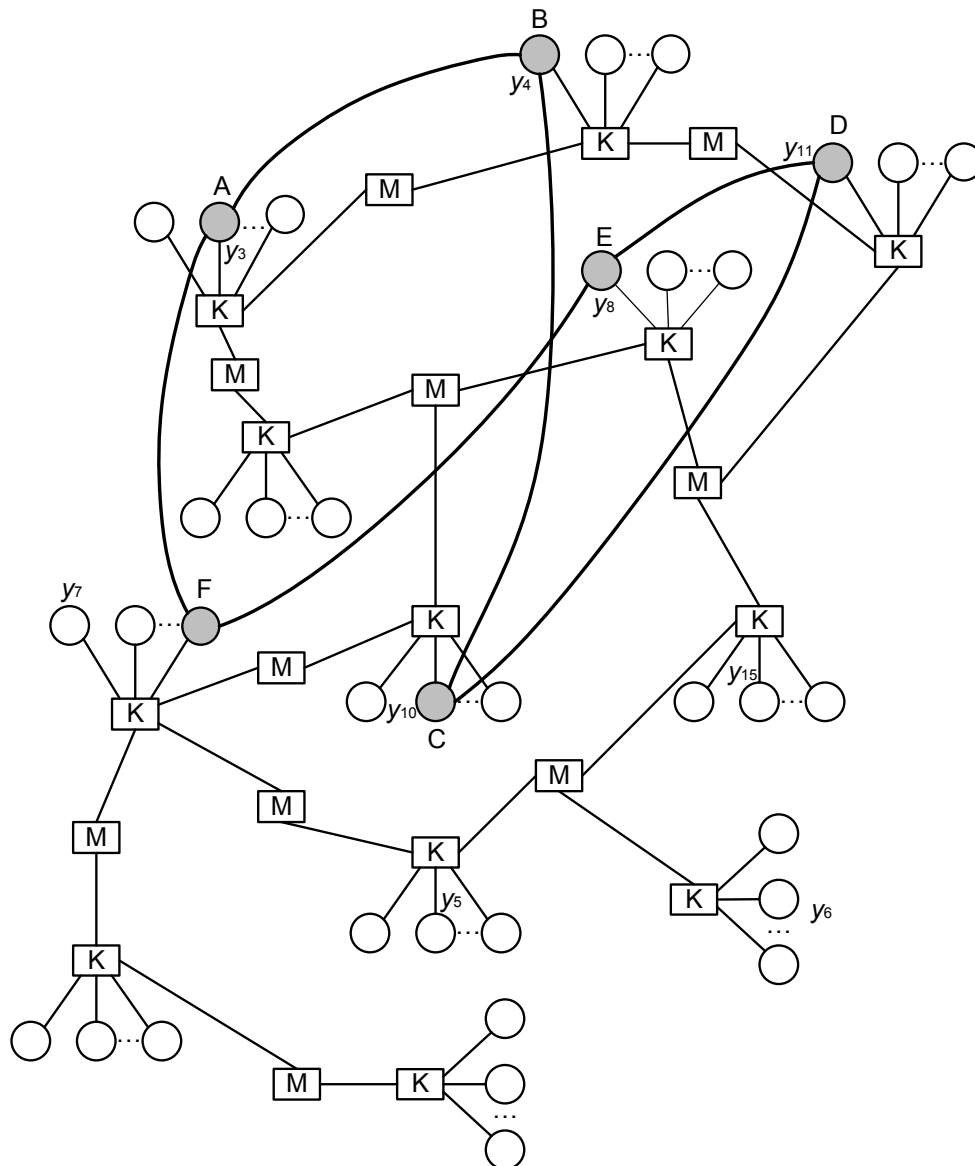


Рис. 2. Вариант размещения логического кольца агентов на физической сети

В формуле для окончательного результата C расстановка скобок указывает на порядок выполнения операции объединения частичных результатов агентом A . При этом необходимые фрагменты C_1 , C_2 , C_3 , C_4 и C_5 передаются агенту A либо в процессе кольцевого сдвига данных, либо агент A поочередно запрашивает частичные результаты C_1 , C_2 , C_3 , C_4 и C_5 и затем их получает последовательно после очередного запроса от агентов B , C , D , E и F соответственно. На этом выполнение операции $C = A \cup B$ завершается.

Бинарная операция пересечения « $\cap$ » аналогично выполняется над двумя операндами A и B с одинаковой схемой и результат C имеет такую же схему. На основании известного в теории множеств свойства дистрибутивности операции пересечения относительно операции объединения получим следующую схему выполнения операции пересечения над фрагментами исходных отношений:

– формирование частичных результатов в кольце агентов:

$$A: C_0 = (((((A_0 \cap B_0) \cup (A_0 \cap B_1)) \cup (A_0 \cap B_2)) \cup (A_0 \cap B_3)) \cup (A_0 \cap B_4)) \cup (A_0 \cap B_5);$$

$$B: C_1 = (((((A_1 \cap B_1) \cup (A_1 \cap B_2)) \cup (A_1 \cap B_3)) \cup (A_1 \cap B_4)) \cup (A_1 \cap B_5)) \cup (A_1 \cap B_0);$$

$$C: C_2 = (((((A_2 \cap B_2) \cup (A_2 \cap B_3)) \cup (A_2 \cap B_4)) \cup (A_2 \cap B_5)) \cup (A_2 \cap B_0)) \cup (A_2 \cap B_1);$$

$$D: C_3 = (((((A_3 \cap B_3) \cup (A_3 \cap B_4)) \cup (A_3 \cap B_5)) \cup (A_3 \cap B_0)) \cup (A_3 \cap B_1)) \cup (A_3 \cap B_2);$$

$$E: C_4 = (((((A_4 \cap B_4) \cup (A_4 \cap B_5)) \cup (A_4 \cap B_0)) \cup (A_4 \cap B_1)) \cup (A_4 \cap B_2)) \cup (A_4 \cap B_3);$$

$$F: C_5 = (((((A_5 \cap B_5) \cup (A_5 \cap B_0)) \cup (A_5 \cap B_1)) \cup (A_5 \cap B_2)) \cup (A_5 \cap B_3)) \cup (A_5 \cap B_4);$$

– формирование окончательного результата:

$$A: C = (((C_0 \cup C_1) \cup C_2) \cup C_3) \cup C_4) \cup C_5.$$

Здесь при формировании частичных результатов C_0, C_1, C_2, C_3, C_4 и C_5 фрагменты B_0, B_1, B_2, B_3, B_4 и B_5 отношения B сдвигаются по логическому кольцу, передаваясь от одного агента к другому, причем порядок выполнения операций задается расстановкой скобок на основе известного в теории множеств свойства ассоциативности операции объединения в выражениях C_0, C_1, C_2, C_3, C_4 и C_5 для частичных результатов. Окончательный результат $C = A \cap B$ формируется агентом A так же, как и для предыдущей операции объединения.

Бинарная операция разности « $-$ » позволяет получить множество $C = A - B$ кортежей, принадлежащих отношению A и не принадлежащих отношению B . Здесь требуется, чтобы отношения имели одну и ту же схему. Для фрагментированных отношений в агентно-ориентированном метакомпьютере выполнение данной операции может быть организовано в соответствии со следующими выражениями:

– формирование частичных результатов в кольце агентов:

$$A: C_0 = (((((A_0 - B_0) - B_1) - B_2) - B_3) - B_4) - B_5;$$

$$B: C_1 = (((((A_1 - B_1) - B_2) - B_3) - B_4) - B_5) - B_0;$$

$$C: C_2 = (((((A_2 - B_2) - B_3) - B_4) - B_5) - B_0) - B_1;$$

$$D: C_3 = (((((A_3 - B_3) - B_4) - B_5) - B_0) - B_1) - B_2;$$

$$E: C_4 = (((((A_4 - B_4) - B_5) - B_0) - B_1) - B_2) - B_3;$$

$$F: C_5 = (((((A_5 - B_5) - B_0) - B_1) - B_2) - B_3) - B_4;$$

– формирование окончательного результата:

$$A: C = (((C_0 \cup C_1) \cup C_2) \cup C_3) \cup C_4) \cup C_5.$$

Например, в результате выполнения агентом A действий, предписанных формулой для частичного результата C_0 , из фрагмента A_0 отношения A удаляются поочередно кортежи, принадлежащие еще и фрагментам $B_0, B_1, B_2,$

B_3 , B_4 и B_5 отношения B . Аналогичные действия после каждого кольцевого сдвига выполняются остальными агентами. В результате ни один фрагмент из фрагментов отношения A не будет содержать ни одного кортежа, принадлежащего отношению B . После объединения частичных результатов C_0 , C_1 , C_2 , C_3 , C_4 и C_5 агентом A результат $C = A - B$ будет находиться в зоне ответственности данного агента.

Выбор σ_α , или селекция, – это унарная операция над отношением. Пусть α – допустимая формула, выражающая предикат выборки, т.е. допустимая логическая формула с предикатными символами сравнения, используемыми в качестве логических переменных. Сравниваться могут как значения атрибутов с некоторыми константами, так и значения различных атрибутов между собой. Результатом является отношение, содержащее кортежи, для которых формула α истинна. При реализации данной операции агенты A , B , C , D , E и F в метакомпьютерной системе выполняют соответственно следующие действия над фрагментами A_0 , A_1 , A_2 , A_3 , A_4 , и A_5 отношения A :

– формирование частичных результатов:

$A: C_0 = \sigma_\alpha(A_0);$

$B: C_1 = \sigma_\alpha(A_1);$

$C: C_2 = \sigma_\alpha(A_2);$

$D: C_3 = \sigma_\alpha(A_3);$

$E: C_4 = \sigma_\alpha(A_4);$

$F: C_5 = \sigma_\alpha(A_5);$

– формирование окончательного результата:

$A: C = (((C_0 \cup C_1) \cup C_2) \cup C_3) \cup C_4) \cup C_5.$

В результате выполнения **бинарной операции « $\times$ » декартова произведения** двух отношений A и B со схемами R и S соответственно будет сформировано отношение со схемой, являющейся конкатенацией схем R и S , содержащее кортежи, образованные всеми возможными конкатенациями кортежей отношений A и B . Порядок выполнения операции декартова произведения, определенный над фрагментами отношений A и B , задается следующими выражениями:

– формирование частичных результатов в кольце агентов:

$A: C_0 = (((((A_0 \times B_0) \cup (A_0 \times B_1)) \cup (A_0 \times B_2)) \cup (A_0 \times B_3)) \cup (A_0 \times B_4)) \cup (A_0 \times B_5);$

$B: C_1 = (((((A_1 \times B_1) \cup (A_1 \times B_2)) \cup (A_1 \times B_3)) \cup (A_1 \times B_4)) \cup (A_1 \times B_5)) \cup (A_1 \times B_0);$

$C: C_2 = (((((A_2 \times B_2) \cup (A_2 \times B_3)) \cup (A_2 \times B_4)) \cup (A_2 \times B_5)) \cup (A_2 \times B_0)) \cup (A_2 \times B_1);$

$D: C_3 = (((((A_3 \times B_3) \cup (A_3 \times B_4)) \cup (A_3 \times B_5)) \cup (A_3 \times B_0)) \cup (A_3 \times B_1)) \cup (A_3 \times B_2);$

$E: C_4 = (((((A_4 \times B_4) \cup (A_4 \times B_5)) \cup (A_4 \times B_0)) \cup (A_4 \times B_1)) \cup (A_4 \times B_2)) \cup (A_4 \times B_3);$

$F: C_5 = (((((A_5 \times B_5) \cup (A_5 \times B_0)) \cup (A_5 \times B_1)) \cup (A_5 \times B_2)) \cup (A_5 \times B_3)) \cup (A_5 \times B_4);$

– формирование окончательного результата:

$A: C = (((C_0 \cup C_1) \cup C_2) \cup C_3) \cup C_4) \cup C_5.$

Данными выражениями определяются сдвиги и передачи данных в логическом кольце агентов при формировании результата $C = A \times B$.

Бинарная операция соединения определяется на основе операций декартова произведения и выборки как $\sigma_\alpha(A \times B)$ [7, 9], где α – формула, содержащая предикаты сравнения атрибутов из отношений A и B . Схема выполнения операции соединения соответствует схеме выполнения операции декартова произведения при учете условия, согласно которому в результирующее отношение включаются лишь те кортежи, которые удовлетворяют определенному соотношению между атрибутами соединения отношений A и B :

– формирование частичных результатов в кольце агентов:

A: $C_0 = (((\sigma_\alpha(A_0 \times B_0) \cup \sigma_\alpha(A_0 \times B_1)) \cup \sigma_\alpha(A_0 \times B_2)) \cup \sigma_\alpha(A_0 \times B_3)) \cup \sigma_\alpha(A_0 \times B_4) \cup \sigma_\alpha(A_0 \times B_5)$;

B: $C_1 = (((\sigma_\alpha(A_1 \times B_1) \cup \sigma_\alpha(A_1 \times B_2)) \cup \sigma_\alpha(A_1 \times B_3)) \cup \sigma_\alpha(A_1 \times B_4)) \cup \sigma_\alpha(A_1 \times B_5) \cup \sigma_\alpha(A_1 \times B_0)$;

C: $C_2 = (((\sigma_\alpha(A_2 \times B_2) \cup \sigma_\alpha(A_2 \times B_3)) \cup \sigma_\alpha(A_2 \times B_4)) \cup \sigma_\alpha(A_2 \times B_5)) \cup \sigma_\alpha(A_2 \times B_0) \cup \sigma_\alpha(A_2 \times B_1)$;

D: $C_3 = (((\sigma_\alpha(A_3 \times B_3) \cup \sigma_\alpha(A_3 \times B_4)) \cup \sigma_\alpha(A_3 \times B_5)) \cup \sigma_\alpha(A_3 \times B_0)) \cup \sigma_\alpha(A_3 \times B_1) \cup \sigma_\alpha(A_3 \times B_2)$;

E: $C_4 = (((\sigma_\alpha(A_4 \times B_4) \cup \sigma_\alpha(A_4 \times B_5)) \cup \sigma_\alpha(A_4 \times B_0)) \cup \sigma_\alpha(A_4 \times B_1)) \cup \sigma_\alpha(A_4 \times B_2) \cup \sigma_\alpha(A_4 \times B_3)$;

F: $C_5 = (((\sigma_\alpha(A_5 \times B_5) \cup \sigma_\alpha(A_5 \times B_0)) \cup \sigma_\alpha(A_5 \times B_1)) \cup \sigma_\alpha(A_5 \times B_2)) \cup \sigma_\alpha(A_5 \times B_3) \cup \sigma_\alpha(A_5 \times B_4)$;

– формирование окончательного результата:

A: $C = (((C_0 \cup C_1) \cup C_2) \cup C_3) \cup C_4 \cup C_5$.

Особенности вариантов операции соединения, состоящие в отбрасывании некоторых атрибутов, учитываются при реализации оператора σ_α .

Проекция π_X является **унарной операцией** над отношением. Пусть R – схема отношения A , а X – подмножество R . Операция проекции позволяет получить отношение $C = \pi_X(A)$ путем исключения из кортежей исходного отношения значений атрибутов, соответствующих атрибутам в $R \setminus X$ и последующего исключения повторяющихся кортежей. При реализации проекции агенты A, B, C, D, E и F в метакомпьютерной системе выполняют соответственно следующие действия над фрагментами A_0, A_1, A_2, A_3, A_4 , и A_5 отношения A :

– формирование частичных результатов:

A: $C_0 = \pi_X(A_0)$;

B: $C_1 = \pi_X(A_1)$;

C: $C_2 = \pi_X(A_2)$;

D: $C_3 = \pi_X(A_3)$;

E: $C_4 = \pi_X(A_4)$;

F: $C_5 = \pi_X(A_5)$;

– формирование окончательного результата:

A: $C = (((C_0 \cup C_1) \cup C_2) \cup C_3) \cup C_4 \cup C_5$.

На этапе получения окончательного результата при выполнении объединения промежуточных результатов агентом A естественно исключаются оставшиеся дубликаты кортежей.

3. Асинхронная предикатная сеть для распределенной системы логического управления выполнением операций в физическом кольце

Выполнение операций реляционной алгебры над фрагментированными отношениями в структуре, представленной на рис. 1, требует кольцевого сдвига фрагментов отношений B и C . Система продукционных правил для асинхронной предикатной сети (АПС) MCS , предназначенная для управления кольцевым сдвигом фрагментов, имеет следующий вид:

MCS :

– продукции для агента A :

$$T_{a0}: P_a(a_0) \& \neg P_a(a_{af}) \Rightarrow \neg P_a(a_0) \& P_a(a_1) \& P_a(a_{af});$$

$$T_{a1}: P_a(a_1) \& P_b(b_{ba}) \Rightarrow \neg P_a(a_1) \& P_a(a_2) \& \neg P_b(b_{ba});$$

$$T_{a2}: P_a(a_2) \Rightarrow \neg P_a(a_2) \& P_a(a_3);$$

$$T_{a3}: P_a(a_3) \Rightarrow \neg P_a(a_3) \& P_a(a_0);$$

– продукции для агента B :

$$T_{b0}: P_b(b_0) \& \neg P_b(b_{ba}) \Rightarrow \neg P_b(b_0) \& P_b(b_1) \& P_b(b_{ba});$$

$$T_{b1}: P_b(b_1) \& P_c(c_{cb}) \Rightarrow \neg P_b(b_1) \& P_b(b_2) \& \neg P_c(c_{cb});$$

$$T_{b2}: P_b(b_2) \Rightarrow \neg P_b(b_2) \& P_b(b_3);$$

$$T_{b3}: P_b(b_3) \Rightarrow \neg P_b(b_3) \& P_b(b_0);$$

– продукции для агента C :

$$T_{c0}: P_c(c_0) \& \neg P_c(c_{cb}) \Rightarrow \neg P_c(c_0) \& P_c(c_1) \& P_c(c_{cb});$$

$$T_{c1}: P_c(c_1) \& P_d(d_{dc}) \Rightarrow \neg P_c(c_1) \& P_c(c_2) \& \neg P_d(d_{dc});$$

$$T_{c2}: P_c(c_2) \Rightarrow \neg P_c(c_2) \& P_c(c_3);$$

$$T_{c3}: P_c(c_3) \Rightarrow \neg P_c(c_3) \& P_c(c_0);$$

– продукции для агента D :

$$T_{d0}: P_d(d_0) \& \neg P_d(d_{dc}) \Rightarrow \neg P_d(d_0) \& P_d(d_1) \& P_d(d_{dc});$$

$$T_{d1}: P_d(d_1) \& P_e(e_{ed}) \Rightarrow \neg P_d(d_1) \& P_d(d_2) \& \neg P_e(e_{ed});$$

$$T_{d2}: P_d(d_2) \Rightarrow \neg P_d(d_2) \& P_d(d_3);$$

$$T_{d3}: P_d(d_3) \Rightarrow \neg P_d(d_3) \& P_d(d_0);$$

– продукции для агента E :

$$T_{e0}: P_e(e_0) \& \neg P_e(e_{ed}) \Rightarrow \neg P_e(e_0) \& P_e(e_1) \& P_e(e_{ed});$$

$$T_{e1}: P_e(e_1) \& P_f(f_{fe}) \Rightarrow \neg P_e(e_1) \& P_e(e_2) \& \neg P_f(f_{fe});$$

$$T_{e2}: P_e(e_2) \Rightarrow \neg P_e(e_2) \& P_e(e_3);$$

$$T_{e3}: P_e(e_3) \Rightarrow \neg P_e(e_3) \& P_e(e_0);$$

– продукции для агента F :

$$T_{f0}: P_f(f_0) \& \neg P_f(f_{fe}) \Rightarrow \neg P_f(f_0) \& P_f(f_1) \& P_f(f_{fe});$$

$$T_{f1}: P_f(f_1) \& P_a(a_{af}) \Rightarrow \neg P_f(f_1) \& P_f(f_2) \& \neg P_a(a_{af});$$

$$T_{f2}: P_f(f_2) \Rightarrow \neg P_f(f_2) \& P_f(f_3);$$

$$T_{f3}: P_f(f_3) \Rightarrow \neg P_f(f_3) \& P_f(f_0).$$

Принципы построения данной системы продукционных правил соответствуют составлению продукционных правил в работах [11, 12]. Введены предикаты P_x , $x \in \{a, b, c, d, e, f\}$, характеризующие состояния мобильных агентов A, B, C, D, E и F соответственно. Начальное состояние сети задают следующие начальные факты (истинные атомарные константные формулы): $P_a(a_0)$, $P_b(b_0)$, $P_c(c_0)$, $P_d(d_0)$, $P_e(e_0)$ и $P_f(f_0)$. Каждый из агентов может находиться в одном из четырех состояний: x_0 (начальная фаза подготовки к обмену), x_1 (реализация кольцевого обмена), x_2 (рабочая фаза) и x_3 (заключительная фаза).

за). Кольцевые связи между агентами осуществляются посредством проверки и модификации высказываний $P_a(a_{af})$, $P_b(b_{ba})$, $P_c(c_{cb})$, $P_d(d_{dc})$, $P_e(e_{ed})$ и $P_f(f_{fe})$, связывающих продукционные правила между собой. Проверка правильности АПС проводилась с помощью программы PredNet [13], позволяющей осуществлять статистическое моделирование системы продукционных правил.

4. Организация обменов фрагментами отношений между агентами

Два варианта реализации кольцевого сдвига иллюстрируют рис. 3 и 4. Пересылки, представленные на рис. 3, возможно организовать под управлением двух из АПС, описанных в работе [11], а пересылки, показанные на рис. 4, могут быть реализованы описанной в разд. 3 сетью MCS. Второй вариант реализации кольцевого обмена данными является более предпочтительным и рациональным. Алгоритмы выполнения обычных операций реляционной алгебры над нефрагментированными отношениями составлены по работам [6, 9] и соответствуют исходным определениям из работы Э. Кодда [8].

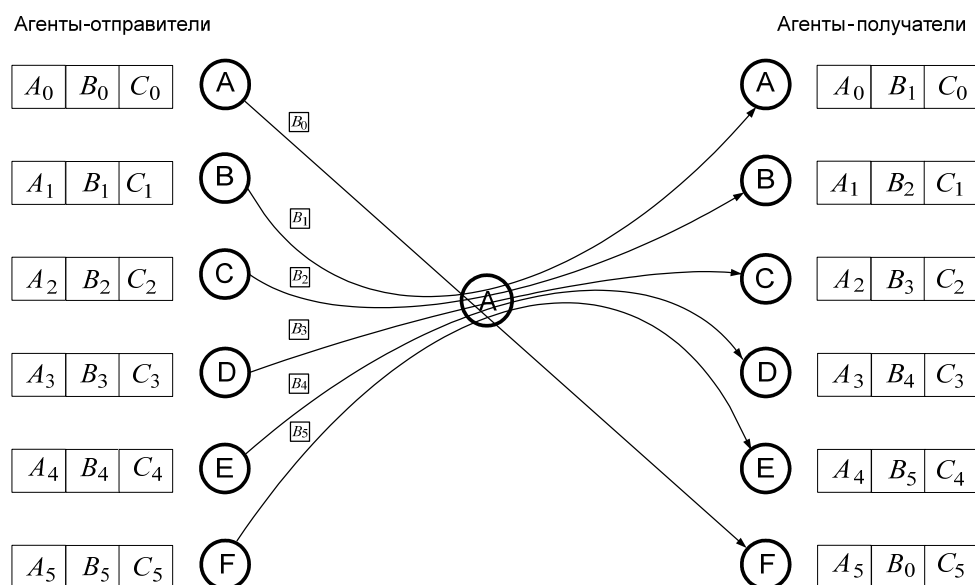


Рис. 3. Пересылки данных (фрагментов отношений) между агентами по логическому кольцу через агент-посредник А

Заключение

Основным результатом данной работы являются предложения по организации межагентных взаимодействий в сетевой среде при реализации систем управления распределенными реляционными базами данных, что повышает эффективность метакомпьютерной реализации процессов обработки структурированных данных. Кроме того, продемонстрирована возможность применения модели согласования процессов и агентов при организации обработки структурированных данных. Предложенные методы и алгоритмы распределенной обработки данных могут быть реализованы и на многоядерных процессорах, а также в системах кластерного типа, ориентированных не на агенты, а на передачу сообщений.

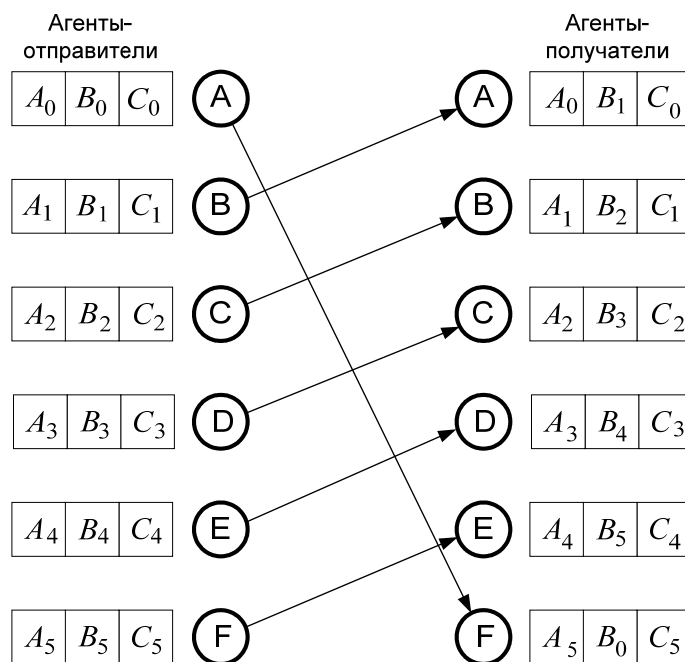


Рис. 4. Непосредственные пересылки данных (фрагментов отношений) между агентами по логическому кольцу (без агента-посредника)

Список литературы

1. **Троелсен, Э.** Язык программирования C# 5.0 и платформа .NET 4.5 / Э. Троелсен. – М. : Вильямс, 2013. – 1311 с.
2. **Guzev, V.** Asynchronous parallel programming language based on the Microsoft .NET platform / V. Guzev, Y. Serdyuk // PaCT-2003, Lecture Notes in Computer Science, Springer. – 2003. – Vol. 2763. – P. 236–243.
3. Параллельные вычисления на GPU. Архитектура и программная модель CUDA / А. Боресков, А. Харламов, Н. Марковский и др. – М. : Изд-во МГУ, 2012. – 336 с.
4. Компьютеры на СБИС : в 2-х кн. Кн. 2 / Т. Мотоока, Х. Хорикоси, М. Сакаутти и др. – М. : Мир, 1988. – 366 с.
5. **Барский, А. Б.** Применение SPMD-технологии при построении сетевых баз данных с циркулирующей информацией / А. Б. Барский // Информационные технологии. – 2004. – № 7. – С. 62–65.
6. **Мейер, Д.** Теория реляционных баз данных / Д. Мейер. – М. : Мир, 1987. – 608 с.
7. **Ульман, Дж.** Основы систем баз данных / Дж. Ульман. – М. : Финансы и статистика, 1983. – 334 с.
8. **Codd, E. F.** A relational model of data for large shared data banks / E. F. Codd // Comm. ACM. – 1970. – Vol. 13(6). – P. 377–387.
9. **Чери, С.** Логическое программирование и базы данных / С. Чери, Г. Готлоб, Л. Танка. – М. : Мир, 1992. – 352 с.
10. PACX-MPI: The Grid-computing library PACX-MPI extending MPI for computational Grid. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.hlrs.de/organization/av/amt/research/pacx-mpi/> (Дата обращения: 12.10.2014).
11. **Вашкевич, Н. П.** О реализации интерфейса передачи сообщений как облачного сервиса в агентно-ориентированных метакомпьютерных системах / Н. П. Вашкевич, С. А. Зинкин, Н. С. Карамышева // Инфокоммуникационные технологии. – 2013. – № 4. – С. 42–53.

12. **Зинкина, Н. С.** Методы и модели логического управления дискретными процессами в распределенных вычислительных системах на основе концепции согласования / Н. С. Зинкина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1 (17). – С. 35–47.
13. **Зинкина, Н. С.** Программа для моделирования систем логического управления с интенсивно используемой базой знаний / Н. С. Зинкина, Р. В. Щекин // Институт научной информации и мониторинга РАО. Объединенный фонд электронных ресурсов «Наука и образование», № ОФЭРНиО–17006 от 18.04.2011, № ЦИТиС 50201150550 от 27.04.2011.

References

1. Troelsen E. *Yazyk programirovaniya C# 5.0 i platforma .NET 4.5* [C# 5.0 programming language and NET 4.5. platform]. Moscow: Vilyams, 2013, 1311 p.
2. Guzev V., Serdyuk Y. *PaCT-2003, Lecture Notes in Computer Science*, Springer, 2003, Vol. 2763, pp. 236–243.
3. Borekov A., Kharlamov A., Markovskiy N. et al. *Parallel'nye vychisleniya na GPU. Arkhitektura i programnaya model' CUDA* [GPU parallel computing. CUDA architecture and program model]. Moscow: Izd-vo MGU, 2012, 336 p.
4. Motooka T., Khorikosi Kh., Sakauti M. et al. *Komp'yutery na SBIS: v 2-kh kn. Kn. 2* [SBIS computers: in 2 books. Book 2]. Moscow: Mir, 1988, 366 p.
5. Barskiy A. B. *Informatsionnye tekhnologii* [Information technologies]. 2004, no. 7, pp. 62–65.
6. Meyer D. *Teoriya relyatsionnykh baz dannykh* [Relation database theory]. Moscow: Mir, 1987, 608 p.
7. Ul'man Dzh. *Osnovy sistem baz dannykh* [Basic database systems]. Moscow: Finansy i statistika, 1983, 334 p.
8. Codd E. F. *Comm. ACM*. 1970, vol. 13 (6), pp. 377–387.
9. Cheri S., Gotlob G., Tanka L. *Logicheskoe programirovanie i bazy dannykh* [Logical programming and databases]. Moscow: Mir, 1992, 352 p.
10. *PACX-MPI: The Grid-computing library PACX-MPI extending MPI for computational Grid*. Available at: <http://www.hlrs.de/organization/av/amt/research/pacx-mpi/> (accessed 12 October 2014).
11. Vashkevich N. P., Zinkin S. A., Karamysheva N. S. *Infokommunikatsionnye tekhnologii* [Infocommunication technologies]. 2013, no. 4, pp. 42–53.
12. Zinkina N. S. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskieskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2011, no. 1 (17), pp. 35–47.
13. Zinkina N. S., Shchekin R. V. *Institut nauchnoy informatsii i monitoringa RAO. Ob"edinenny fond elektronnykh resursov «Nauka i obrazovanie»* [Institute of scientific information and monitoring of the Russian Academy of Education. Consolidated base of electronic resources “Science and Education”], No. OFERNiO–17006, 18 April 2011, No. TsITiS 50201150550, 27 April 2011.

Вашкевич Николай Петрович

доктор технических наук, профессор,
кафедра вычислительной техники,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: vt@alice.pnzgu.ru

Vashkevich Nikolay Petrovich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of computer engineering,
Penza State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Карамышева Надежда Сергеевна

кандидат технических наук,
инженер-программист, кафедра
вычислительной техники, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: kagliari@yandex.ru

Karamysheva Nadezhda Sergeevna

Candidate of engineering sciences,
software engineer, sub-department
of computer engineering, Penza State Uni-
versity (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Зинкин Сергей Александрович

доктор технических наук, профессор,
кафедра вычислительной техники,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: zsa49@yandex.ru

Zinkin Sergey Aleksandrovich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of computer engineering,
Penza State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

УДК 681.32

Вашкевич, Н. П.

**Организация распределенной агентно-ориентированной системы
управления базами данных в метакomпьютерной среде с топологией типа
«логическое кольцо» / Н. П. Вашкевич, Н. С. Карамышева, С. А. Зинкин //**
Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические
науки. – 2014. – № 4 (32). – С. 5–17.

САМОМОДИФИКАЦИЯ ТОПОЛОГИИ И РАЗВЕРТЫВАНИЯ ОБЪЕКТОВ В ВИРТУАЛИЗИРОВАННЫХ СЕТЯХ ХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ (II. ОПЕРАЦИОННАЯ СЕМАНТИКА И ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ)¹

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования являются сети хранения и обработки данных с распределенной архитектурой, в которых обработка перемещаемых данных осуществляется мобильными агентами. Предметом исследования является операционная семантика и исполнительные механизмы развертывания средств обработки данных (мобильных агентов) и самих перемещаемых данных на вычислительной сети. Целью работы является разработка нового подхода к виртуализации ресурсов в условиях, когда программные модули и информационные объекты могут перемещаться по сети, создавая улучшенные условия для собственного выполнения и обработки, а также для выполнения соседних процессов. Главным образом это улучшение должно происходить за счет естественного распараллеливания процессов обработки данных.

Материалы и методы. Исследование и формализация процессов развертывания мобильных объектов базируется на введении модифицированного и расширенного перечня рекомендуемых к реализации в распределенных системах и сетях хранения и обработки данных пространственных операций (*deployment*-операций, или *d*-операций).

Результаты. Определены абстрактный и конкретный механизмы развертывания компонент, а также даны правила, позволяющие распараллелить процессы обработки данных в распределенной операционной среде. Предлагаемый подход применим к проектированию виртуализированных систем хранения и обработки данных, в частности, облачных сред, грид-систем и систем обработки данных на базе самоорганизующихся беспроводных сетей.

Выводы. Предложены принципы реализации методов и средств проектирования распределенных систем хранения и обработки данных, основанные на использовании непосредственно исполняемых формальных спецификаций и обеспечивающих построение масштабируемых систем с автоматизацией процессов реконфигурации структуры и миграции данных. Эти спецификации адекватно описывают процессы управления путями доступа к ресурсам, поиска и выборки данных, копирования и репликации данных.

Ключевые слова: хранение данных, обработка данных, формальное определение распределенных процессов, логико-алгебраический подход, сети абстрактных машин, темпоральные операции, операции развертывания.

V. I. Volchikhin, S. A. Zinkin

TOPOLOGY SELF-MODIFICATION AND DEPLOYMENT OF OBJECTS IN VIRTUALIZED DATA STORAGE AND PROCESSING NETWORKS (II. OPERATIONAL SEMANTICS AND ACTUATORS)

¹ Статья подготовлена в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития НТК России на 2014–2020 гг.» (Соглашение № 14.574.21.0045 от 19.06.2014).

Abstract.

Background. The research object is the data storage and processing networks with distributed architecture, where the data to be transferred are processed by mobile agents. The research subject is the operational semantics and actuators of deployment of data processing means (mobile agents) and the transferred data themselves in a computer network. The aim of the work is to develop a new approach to virtualization of resources in such conditions when program modules and information objects are capable of moving in a network creating improved conditions for self-execution and processing, as well as for execution of nearby processes. Essentially, the said improvement should take place due to natural paralleling of data processing processes.

Materials and methods. Research and formalization of mobile objects' deployment are based on introduction of the modified and extended list of preferred spatial operation to be realized in distributed systems of data storage and processing (*deployment-operations*, or *d-operations*).

Results. The authors determined an abstract and a concrete mechanism of content deployment, as well as established the rules allowing to parallelize data processing processes in a distributed operational medium. The suggested approach can be used in designing virtualized data storage and processing systems, particularly, cloud media, grid-systems and data processing systems on the basis of self-organizing wireless networks.

Conclusions. The authors suggested realization principles for methods and means of designing distributed data storage and processing systems, based on the use of directly executable formal specifications and providing formation of scalable systems with automatic processes of structure reconfiguration and migration of data. The said specifications adequately describe the processes of management of access roots to resources, search and sorting of data, coping and replication of data.

Key words: data storage, data processing, formal representations of distributed processes, logical-algebraic approach, networks of abstract machines, temporal operations, deployment operations.

Введение

В предыдущей работе [1] рассмотрены принципы формализации операций развертывания объектов в вычислительной сети и предложены способы визуализации возникающих ситуаций. Необходимость в таких действиях возникает при разработке облачных вычислительных сред, грид-систем, распределенных систем хранения данных, т.е. при организации таких систем, где на передний план выступают проблемы виртуализации и консолидации ресурсов хранения и обработки данных. В отличие от общепринятого определения виртуализации как абстракции вычислительных ресурсов, скрывающей от пользователя собственную реализацию, в настоящей работе поставлена задача использования виртуализации и одной из ее разновидностей – консолидации ресурсов для повышения производительности распределенной вычислительной системы за счет рационального размещения программных и информационных компонентов.

Согласно новой трактовке виртуализации ресурсов программные модули и информационные объекты могут перемещаться по сети, создавая улучшенные условия для собственного выполнения и обработки, а также для выполнения соседних процессов. Главным образом это улучшение происходит за счет естественного распараллеливания процессов обработки данных.

Наиболее показательным примером для виртуализации такого рода является обработка данных в агентно-ориентированных системах и сетях, при которой программные агенты могут перемещаться по запросу на нужный вычислительный ресурс, а другие программные агенты отвечают за хранение и перемещение обрабатываемых данных. В таких системах трудно обеспечить рациональное развертывание программных компонент и данных, поэтому в настоящей работе предлагается при размещении объектов в сети использовать элементы самоорганизации, при которой программные агенты могут проверять наличие той или иной ситуации в сети и в зависимости от результатов проверки выполнять те или иные действия по изменению этой ситуации.

1. Абстрактный конструктор развертывания объектов

Определим абстрактный механизм, или конструктор, развертывания компонент в распределенной среде как кортеж

$$\mathfrak{K} = (A, Y, S, S^*, F_s, P_s, R, M, P, F), \quad (1)$$

где A – множество объектов, или компонент; Y – множество узлов сети; S – множество ситуаций, возникающих в сети при развертывании объектов; S^* – множество элементарных или начальных ситуаций, составляющих систему образующих для алгебры ситуаций; F_s – множество операций развертывания; P_s – множество отношений развертывания; R – множество правил, которые должны соблюдаться при начальных или конечных ситуациях; M – множество процедур, осуществляющих смену ситуаций развертывания (процедуры реализуются модулями сетей абстрактных машин (CeAM), определенными в работе [1]); P и F – множества исходных и результирующих отношений и функций (рассматриваемых в качестве функциональных отношений) развертывания, им соответствуют одноименные предикаты и функции.

При помощи множества S^* зафиксирована система образующих, включающая множество элементарных ситуаций (начальное размещение агентов, менеджеров, данных, результатов на узлах сети). Пусть система операций, принимающих значения в множестве ситуаций – вариантов пространственных размещений объектов, содержит перечисленные в работе [1] d -операции, реализуемые на абстрактном уровне элементами из множества F_s . Посредством суперпозиции данных операций и системы образующих S^* в множестве S порождаются новые ситуации пространственного размещения объектов. Таким образом, нами был сформулирован подход к определению d -алгебры размещения объектов, или алгебры пространственных ситуаций. Собственно d -алгебра определена в абстрактном конструкторе $\mathfrak{K}$ как тройка (S, S^*, F_s) , где множество ситуаций S является носителем алгебры.

Исходные и результирующие ситуации удобно задавать не только в виде сложных выражений для описания ситуаций, но и в виде интерпретации обычной сигнатуры $\Sigma = P \cup F$, т.е. в виде отношений, связывающих объекты из множества A с узлами из множества Y . Дальнейшие свойства абстрактного конструктора $\mathfrak{K}$ поясним на примерах и последующих описаниях выполняемых операций.

2. Логико-алгебраические спецификации и операционная семантика пространственных операций

2.1. *d-операции размещения мобильных объектов в сети*

Рассмотрим модифицированный и расширенный перечень рекомендуемых к реализации в распределенных системах и сетях хранения и обработки данных пространственных операций (*deployment*-операций, или *d-операций*):

1. $A_i \overset{\circ}{\rightarrow} n_j$ – размещение объекта A_i на узле n_j сети; $A_i \overset{\circ}{\rightarrow} x$ – вариант: размещение объекта A_i на произвольном узле сети.
2. $A_i \overset{\circ}{\parallel} A_j$ – размещение объектов A_i и A_j на одном и том же узле;
 $\overset{\circ}{\parallel}(A_1, A_2, \dots, A_n)$ – обобщение данной операции на случай вектора объектов.
3. $A_i \overset{\circ}{\Downarrow} A_j$ – размещение объектов A_i и A_j на различных узлах;
 $\overset{\circ}{\Downarrow}(A_1, A_2, \dots, A_n)$ – обобщение данной операции на случай вектора объектов.
4. $A_i \overset{\circ}{\circlearrowleft} A_j$ – произвольное размещение объектов A_i и A_j в сети;
 $\overset{\circ}{\circlearrowleft}(A_1, A_2, \dots, A_n)$ – обобщение данной операции на случай вектора объектов.
5. $A_i \overset{\circ}{\circlearrowright} A'_i$ – создание копии A'_i объекта A_i на одном и том же узле;
 $A_i \overset{\circ}{\circlearrowright}(A'_i, A''_i, \dots, A_i^{(n)})$ – обобщение операции на случай вектора копий.
6. $A_i \overset{\circ}{\circlearrowright} A'_i$ – создание копии A'_i объекта A_i и размещение ее на другом узле; $A_i \overset{\circ}{\circlearrowright}(A'_i, A''_i, \dots, A_i^{(n)})$ – обобщение операции на случай вектора копий: все созданные копии размещаются на разных узлах.
7. $A_i \overset{\circ}{\circlearrowleft} A'_i$ – создание копии A'_i объекта A_i и размещение ее на произвольном узле сети; $A_i \overset{\circ}{\circlearrowleft}(A'_i, A''_i, \dots, A_i^{(n)})$ – обобщение операции на случай вектора копий: все созданные копии размещаются на произвольных узлах.
8. $\overset{\circ}{\text{d}} A_i$ – уничтожение объекта A_i ; $\overset{\circ}{\text{d}}(A_1, A_2, \dots, A_n)$ – обобщение операции на случай вектора объектов.
9. $\overset{\circ}{\text{d}}! A_i$ – из множества, содержащего исходный объект A_i и все его копии, выбирается и сохраняется в сети произвольный объект, а остальные уничтожаются.
10. $\overset{\circ}{\text{d}}!! A_i$ – в сети сохраняется исходный (родительский) объект, а все его копии уничтожаются.
11. $A_i, n_k \overset{\circ}{\rightarrow} n_j$ – перемещение объекта A_i с узла n_k на узел n_j ; вариант операции $A_i \overset{\circ}{\rightarrow} n_j$ – перемещение объекта A_i на узел n_j в случае, если достоверно известно, что он находится в сети.
12. $A_i \overset{\circ}{\boxtimes} A_j$ – в сети остается либо объект A_i , либо объект A_j в зависимости от выполнения условия x (операция « x -дизъюнкция»); $[x_1, x_2, \dots, x_n](A_1 \vee A_2 \vee \dots \vee A_n)$ – обобщение операции « x -дизъюнкция» на случай вектора объектов: при выполнении операции лишь одно из условий должно принимать значение *true*, в противном случае результатом операции будет неопределенный объект A^N .

13. $A_i \circledast A_j$ – вспомогательная операция d -конкатенации объектов: объекты A_i и A_j «сосуществуют» в одной и той же сети; $\circledast(A_1, A_2, \dots, A_n)$ – обобщение данной операции на случай вектора объектов.

2.2. Реализация и некоторые свойства space-операций

Размещение объектов в сети может быть выполнено на основе непосредственно исполняемых формальных спецификаций. Рассмотрим некоторые СеАМ-спецификации данных операций и некоторые их свойства. Следующие выражения (2)–(31) описывают важные свойства d -операций и реализующие их СеАМ-модули.

1. Выполнение d -операции $A_i \ominus n_j$ описывается следующим СеАМ-выражением:

$$[f_N(n_j)](f_d(A_i) \leftarrow n_j \vee R^E). \quad (2)$$

Здесь и далее используются следующие обозначения: N – множество узлов; A – множество объектов; $f_d : A \rightarrow N \cup \{undef\}$ – функция размещения объектов в сети (в случае $f_d(A_i) = undef$ будем считать, что объект A_i не размещен или, что в данном случае то же самое, отсутствует в сети); $f_N : N \rightarrow \{true, false\}$ – характеристическая функция множества узлов сети. При интерпретации данного выражения сначала осуществляется проверка значения высказывательной функции $f_N(n)$ при $n = n_j$ (n – предметная переменная, пробегающая по множеству N узлов сети), что эквивалентно проверке наличия узла n_j в сети. Затем в случае, если $f_N(n_j) = true$, осуществляется обновление функции $f_d(A_i) \leftarrow n_j$, что соответствует размещению объекта A_i на узле n_j . При $f_N(n_j) = false$ (узел n_j отсутствует в сети) модуль выполняет тождественное обновление R^E , и результатом такой операции является неопределенный объект A^N .

Другой вариант операции $A_i \ominus x$ размещения объекта на произвольно выбираемом узле описывается следующим СеАМ-выражением:

$$[(\exists! n \in N) f_N(n)](f_d(A_i) \leftarrow n \vee R^E). \quad (3)$$

Здесь квантифицированный оператор $\exists!$ «выбирает» произвольный узел из области истинности характеристической функции f_N , а затем обновляется функция f_d . Результатом обновления является кортеж $\langle A_i, n_k \rangle$, связывающий объект A_i с произвольно выбранным узлом n_k .

2. d -операция $\oplus$ коммутативна и ассоциативна:

$$A_i \oplus A_j = A_j \oplus A_i; \quad (4)$$

$$(A_i \oplus A_j) \oplus A_k = A_j \oplus (A_i \oplus A_k). \quad (5)$$

Бинарная операция $\oplus$ за счет ее ассоциативности и транзитивности соответствующего отношения обобщается на случай вектора объектов:

$$\textcircled{\text{II}} (A_1, A_2, \dots, A_n). \quad (6)$$

Рассмотрим СеАМ-спецификации выполнения данной операции. Предположим, что все объекты множества $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ уже размещены в сети на произвольных узлах, т.е. имеет место следующее высказывание:

$$(\forall a \in A)(\forall b \in A)(\forall n \in N)(\forall m \in N)((f_d(a) = n) \& \& (f_d(b) = m) \supset (n = m) \vee (n \neq m)). \quad (7)$$

После выполнения операции $\textcircled{\text{II}}$ все объекты размещаются на одном узле, при этом должно быть истинно новое высказывание:

$$(\forall a \in A)(\forall b \in A)(\forall n \in N)(\forall m \in N)((f_d(a) = n) \& (f_d(b) = m) \supset (n = m)). \quad (8)$$

Для данной операции размещения объектов рассмотрим два варианта СеАМ-спецификации. Первый вариант соответствует случаю, когда все объекты размещаются на произвольно выбранном новом узле:

$$[(\exists! n \in N) f_N(n)] \left(\left[(\forall a \in A)((f_d(a) \neq \text{undef}) \& f_{op}(a)) \right] \right. \\ \left. (f_d(a) \leftarrow n \vee R^E) \vee R^E \right). \quad (9)$$

Здесь $f_{op} : A \rightarrow \{\text{true}, \text{false}\}$ – характеристическая функция множества A объектов, участвующих в выполнении операции $\textcircled{\text{II}}$.

Квантифицированные операторы выбора $\exists!$ и $\forall$ в выражении (9) независимы, поэтому данное выражение можно представить в семантически эквивалентном виде:

$$\left[\underline{(\exists! n \in N) f_N(n)} \& \underline{(\forall a \in A)((f_d(a) \neq \text{undef}) \& f_{op}(a))} \right] \\ (f_d(a) \leftarrow n \vee R^E). \quad (10)$$

Второй вариант реализации d -операции $\textcircled{\text{II}}$ соответствует случаю, когда все объекты размещаются на том узле, на котором уже был размещен один из них, выбираемый произвольно. Два семантически эквивалентных СеАМ-выражения представлены ниже:

$$\left[\exists!(a \in A, n \in N)((f_d(a) = n) \& f_N(n) \& f_{op}(a)) \right] \\ ((\forall b \in A)((f_d(b) \neq \text{undef}) \& f_{op}(b)))(f_d(b) \leftarrow f_d(a) \vee R^E) \vee R^E; \quad (11)$$

$$\underline{\exists!(a \in A, n \in N)((f_d(a) = n) \& f_N(n) \& f_{op}(a)) \&} \\ \underline{(\forall b \in A)((f_d(b) \neq \text{undef}) \& f_{op}(b))}(f_d(b) \leftarrow f_d(a) \vee R^E). \quad (12)$$

При выполнении модуля, реализующего последнее выражение, сначала выбирается некоторый кортеж $\langle A_i, n_j \rangle$, для которого истинно высказыва-

ние $(f_d(A_i) = n_j) \& f_N(n_j) \& f_{op}(A_i)$, затем выбирается некоторое подмножество множества A , для каждого элемента b которого истинно высказывание $(f_d(b) \neq undef) \& f_{op}(b)$, и, наконец, выполняются обновления функции

$$f_d(b_{k_1}) \leftarrow f_d(A_i), f_d(b_{k_2}) \leftarrow f_d(A_i), \dots, f_d(b_{k_m}) \leftarrow f_d(A_i),$$

причем $f_d(A_i) = n_j$.

3. d -операция $\oplus$ коммутативна и ассоциативна:

$$A_i \oplus A_j = A_j \oplus A_i; \quad (13)$$

$$(A_i \oplus A_j) \oplus A_k = A_i \oplus (A_j \oplus A_k). \quad (14)$$

Как и предыдущая d -операция, бинарная операция $\oplus$ за счет ее ассоциативности и транзитивности (по построению, или реализации) соответствующего отношения обобщается на случай вектора объектов:

$$\oplus (A_1, A_2, \dots, A_n). \quad (15)$$

Предположим, что объекты множества $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ размещены на произвольных узлах сети, причем возможно размещение некоторых или всех объектов на одном и том же узле. Свойства текущего размещения отражает высказывание (7). После выполнения операции $\oplus$ должно иметь место новое высказывание:

$$(\forall a \in A)(\forall b \in A)(\forall n \in N)(\forall m \in N)((f_d(a) = n) \& (f_d(b) = m) \supset (n \neq m)). \quad (16)$$

СеАМ-выражение, описывающее выполнение операции $\oplus$, имеет следующий вид:

$$[(\exists! a \in A)((f_d(a) \neq undef) \& f'_{op}(a))][(\exists! n \in N)f'_N(n)] \\ (\{f_d(a) \leftarrow n, f'_{op}(a) \leftarrow false, f'_N(n) \leftarrow false\} \vee R^E) \vee R^E). \quad (17)$$

Семантически эквивалентное выражение для операции $\oplus$ имеет вид

$$\left[\underbrace{(\exists! a \in A)((f_d(a) \neq undef) \& f'_{op}(a))}_{\text{}} \& \underbrace{(\exists! n \in N)f'_N(n)}_{\text{}} \right] \\ (\{f_d(a) \leftarrow n, f'_{op}(a) \leftarrow false, f'_N(n) \leftarrow false\} \vee R^E). \quad (18)$$

В обоих выражениях используются копии f'_{op} и f'_N исходных высказывательных функций f_{op} и f_N . В процессе выполнения данных выражений соответствующими модулями выбираются объекты и узлы сети, которые затем связываются путем обновления функции f_d . Для предотвращения повторного выбора объектов выполняются обновления вспомогательных функций $f'_{op}(a) \leftarrow false$ и $f'_N(n) \leftarrow false$. Выражения (17) и (18) должны выполняться многократно до тех пор, пока не будет выполнено условие $(\forall a \in A) \neg f'_{op}(a) = true$, т.е. пока не будут размещены все объекты, участвующие

щие в операции. Многократное выполнение указанных выражений обеспечивается агентами-серверами, которые продолжают интерпретировать СеАМ-выражения до тех пор, пока истинны охранные условия.

4. Реализация d -операции $\textcircled{1}$ осуществляется следующим образом. В случае, когда объекты $A_1, A_2, \dots, A_n$ уже размещены в сети, в выполнении операции $\textcircled{1}$ нет необходимости, если только не требуется повторное перераспределение объектов. Выражение, описывающее повторное перераспределение объектов, представим в следующем виде:

$$\frac{[(\exists! a \in A)((f_d(a) \neq \text{undef}) \& f'_{op}(a)) \& (\exists! n \in N)f_N(n)]}{(\{f_d(a) \leftarrow n, f'_{op}(a) \leftarrow \text{false}\} \vee R^E)}. \quad (19)$$

Данное выражение построено на основе выражения (18) и отличается от него тем, что вместо обновляемой высказывательной функции f'_N в охранным условии (α -выражении) используется остающаяся неизменной высказывательная функция (унарный предикат) f_N . Поскольку функция f_N не обновляется, объекты $A_1, A_2, \dots, A_n$ размещаются на произвольно выбираемых узлах. Выражение (19) интерпретируется агентом-сервером до тех пор, пока не будут перераспределены все объекты.

5. Рассмотрим реализацию d -операции $\textcircled{\text{lc}}$. Пусть $A'_i, A''_i, \dots, A_i^{(n)}$ – копии объекта A_i , тогда запись $A_i \textcircled{\text{lc}} A'_i, A''_i, \dots, A_i^{(n)}$ означает, что в сети создается n копий объекта A_i , которые размещаются на том же узле, на котором размещен и объект A_i . Пусть $A_i^C = \{A'_i, A''_i, \dots, A_i^{(n)}\}$ – множество копий объекта A_i , размещенных в сети, и $A' = A_i^C \cup \{A_i\}$ – множество объектов, участвующих в выполнении операции. Выражение для модуля СеАМ, реализующего данную операцию, представим в следующем виде:

$$[f_d(A_i) \neq \text{undef}][(\exists a \in A')f_{op}(a)](f_d(a) \leftarrow f_d(A_i) \vee R^E) \vee R^E, \quad (20)$$

где значением функции f_d является номер узла, на котором размещен исходный объект.

6. При выполнении d -операции $\textcircled{\text{cc}}$ $A_i \textcircled{\text{cc}} A'_i, A''_i, \dots, A_i^{(n)}$ создаются и размещаются на различных узлах сети n копий $A'_i, A''_i, \dots, A_i^{(n)}$ объекта A_i . Выражение для модуля СеАМ, реализующего данную операцию, представим в следующем виде:

$$\frac{[(\exists! a \in A' \setminus \{A_i\})f''_{op}(a)][(\exists! n \in N \setminus \{f_d(A_i)\})f''_N(n)]}{(\{f_d(a) \leftarrow n, f''_{op}(a) \leftarrow \text{false}, f''_N(n) \leftarrow \text{false}\} \vee R^E) \vee R^E}, \quad (21)$$

где $f''_{op}(a)$ – характеристическая функция множества копий $\{A'_i, A''_i, \dots, A_i^{(n)}\}$ объекта A_i ; $f''_N(n)$ – характеристическая функция множества узлов, на кото-

рых могут размещаться копии объекта A_i . Данное выражение выполняется циклически до тех пор, пока все копии объекта A_i не будут размещены в сети. После каждого выполнения блока обновления из рассмотрения исключаются очередная копия объекта и узел, на котором она размещена, путем обновления функций $f_{op}''(a) \leftarrow false$ и $f_N''(n) \leftarrow false$ соответственно. Обновление $f_d(a) \leftarrow n$ связывает объект a с узлом n , на котором он будет размещен.

7. СеАМ-выражение, описывающее выполнение d -операции $\textcircled{c}$, представим в следующем виде:

$$[(\exists! a \in A' \setminus \{A_i\}) f_{op}''(a)] [(\exists! n \in N) f_N(n)] \\ (\{f_d(a) \leftarrow n, f_{op}''(a) \leftarrow false\} \vee R^E) \vee R^E, \quad (22)$$

Данное выражение похоже на выражение (21), описывающее выполнение операции $\textcircled{c}$. Отличие состоит в том, что номер очередного узла выбирается из области истинности унарного предиката $f_N(n)$, для которого здесь не выполняется правило обновления $f_N(n) \leftarrow false$. Поэтому копии объекта размещаются произвольно на узлах сети.

8. Выражение для модуля СеАМ, реализующего d -операцию $\textcircled{d} A_i$, имеет следующий вид:

$$[true](f_d(A_i) \leftarrow undef \vee R^E). \quad (23)$$

Пусть к началу выполнения данной операции имеет место равенство $f_d(A_i) = n_k$, $n_k \in N$, $A_i \in A$, что соответствует размещению объекта A_i на узле n_k . После выполнения модуля СеАМ, реализующего данную операцию, будет выполняться равенство $f_d(A_i) = undef$. Последнее означает, что местонахождение объекта A_i не определено, что в контексте данной предметной области равносильно его отсутствию в сети.

9. d -операция $\textcircled{dl} A_i$ реализуется модулем СеАМ, который описывается следующим выражением:

$$[(\forall a \in A') f_{op}(a)] [(\exists! b \in A, n \in N) (f_d(b) = n)] \\ (\{f_d(a) \leftarrow undef; f_d(b) \leftarrow n\} \vee R^E) \vee R^E, \quad (24)$$

где f_{op} – характеристическая функция множества A' .

10. СеАМ-выражение для модуля, реализующего операцию $\textcircled{dl} A_i$, может быть представлено в следующем виде:

$$[(\forall a \in A' \setminus \{A_i\}) f_{op}''(a)] (f_d(a) \leftarrow undef \vee R^E). \quad (25)$$

До выполнения данного модуля истинно высказывание

$$(\forall a \in A' \setminus \{A_i\}) (f_d(a) \neq undef) \& (f_d(A_i) = n_k), \quad (26)$$

а после выполнения станет истинным высказывание

$$(\forall a \in A' \setminus \{A_i\})(f_d(a) = \text{undef}) \& (f_d(A_i) = n_k), \quad (27)$$

11. Реализация d -операции $A_i, n_k \ominus n_j$ и ее варианта $A_i \ominus n_j$ может быть описана следующими выражениями для модулей СеАМ:

$$[f_d(A_i) = n_k](f_d(A_i) \leftarrow n_j \vee R^E), \quad (28)$$

$$[f_d(A_i) \neq \text{undef}](f_d(A_i) \leftarrow n_j \vee R^E), \quad (29)$$

$$[(f_d(A_i) \neq \text{undef}) \& (f_d(A_i) \neq n_j)](f_d(A_i) \leftarrow n_j \vee R^E). \quad (30)$$

Первое выражение соответствует операции $A_i, n_k \ominus n_j$, когда определено текущее местонахождение n_k объекта A_i и он перемещается на другой узел n_j . Второе выражение соответствует ситуации, когда известно лишь то, что объект A_i размещен в сети; в этом случае он либо попадает на новый узел ($n_k \neq n_j$), либо остается на прежнем месте ($n_k = n_j$). В третьем случае (операция $A_i \ominus n_j$) объект A_i перемещается на новый узел после проверки факта его нахождения в сети на узле, отличном от того узла, на который он должен быть перемещен. В зависимости от цели выполнения операции $\ominus$ реализуется тот или иной вариант.

12. Выполнение d -операции $A_i \boxtimes A_j$ похоже на выполнение операции α -дизъюнкции, однако здесь она определена не над операторами, а над размещаемыми в сети объектами. Используя аналогию с интерпретацией α -дизъюнкции в работе [2], запишем для x -дизъюнкции следующее выражение:

$$[x](A_i \vee A_j) = \underline{x} \circledast A_i \vee \underline{\neg x} \circledast A_j, \quad (31)$$

где « $\underline{}$ » – операция фильтрации (по аналогии с операцией фильтрации в [2]):

$$\underline{x} = A^E, \text{ если } x = \text{true} \text{ и } \underline{x} = A^N, \text{ если } x = \text{false},$$

где A^E – тождественный объект; A^N – неопределенный объект (по аналогии с тождественным и неопределенным операторами в алгебре алгоритмов В. М. Глушкова). Сохранив прежнее название для символа операции « $\underline{}$ » –

«фильтрация», введем для операции $\circledast$ название « d -конкатенация». Введенная операция обладает следующими свойствами:

$$A_i \circledast A_j = A_j \circledast A_i, \quad A_i \circledast A^E = A^E \circledast A_i = A_i, \quad A_i \circledast A^N = A^N \circledast A_i = A^N,$$

$$A^E \vee A^N = A^N \vee A^E = A^E, \quad A_i \vee A^N = A^N \vee A_i = A_i.$$

Наличие в сети неопределенного объекта не влияет на существование других объектов, не связанных с ним операций $\circledast$.

В результате выполнения операции x -дизъюнкции в сети остается один из объектов – A_i или A_j .

Так, например, при $x = true$

$$[x](A_i \vee A_j) = \underline{true} \circledast A_i \vee \underline{false} \circledast A_j = A^E \circledast A_i \vee A^N \circledast A_j = A_i \vee A^N = A_i,$$

а при $x = false$

$$[x](A_i \vee A_j) = \underline{false} \circledast A_i \vee \underline{true} \circledast A_j = A^N \circledast A_i \vee A^E \circledast A_j = A_j \vee A^N = A_j.$$

Достоинством предлагаемого подхода к размещению (или развертыванию) объектов в сети является то, что d -операции реализуются в рамках одной и той же технологии согласования процессов и объектов. Допускается и интеграция данной технологии с другими объектно ориентированными технологиями, например, с мультиагентными и с технологией классной доски.

3. Использование свойств пространственно-временных отношений для перехода от функциональной архитектуры систем хранения и обработки данных к их системной архитектуре

Сложность и эффективность тех или иных структурных решений во многом зависит от временного совмещения работы функциональных модулей (ФМ). Ранее [3] нами было рассмотрено применение алгебры сценариев и пространственных ситуаций (алгебры развертывания, или размещения, объектов) к проектированию интеллектуальных систем управления внешней памятью. Темпоральные операторы, используемые в алгебре сценариев, позволяют получать новые ФМ, а операторы развертывания позволяют получать новые варианты пространственных ситуаций. Например, применяя темпоральные операторы « $\uparrow$ » (выполнить неодновременно), « $\downarrow$ » (выполнить возможно одновременно), « $\parallel$ » (причинно обусловленное пересечение интервалов реализации сценариев) и « $\parallel^*$ » (причинно обусловленное перекрытие интервала реализации одного сценария интервалом реализации другого сценария), можно порождать новые сценарии из определенных изначально сценариев x и y , составляющих систему образующих в алгебре сценариев:

$$z_1 = x \uparrow y; z_2 = x \downarrow y; z_3 = x \parallel y; z_4 = x \parallel^* y,$$

где x, y – некоторые сценарии i -го уровня; а z_1, z_2, z_3, z_4 – сценарии $(i + 1)$ -го уровня, или составные ФМ. Решая задачу покрытия базовых функциональных структур, или сети функциональных модулей, физическими узлами вычислительной сети, будем рассматривать сами ФМ как разновидности сценариев.

Применяя операторы развертывания « $\parallel$ » (размещение различных ФМ на одном и том же физическом узле), « $\oplus$ » (размещение различных ФМ на различных физических узлах), « $\circledcirc$ » (произвольно допустимое размещение ФМ), получаем в результате новые пространственные сценарии, или ситуации. Например, в результате применения операторов развертывания

$$z_1' = x \oplus y, z_2' = x \circledcirc y, z_3' = x \parallel y$$

над ФМ x и y формируются новые ситуации z_1' , z_2' и z_3' , соответствующие не противоречащему семантике конкретной операции развертывания сценарию размещения ФМ на сети физических узлов. Данным ситуациям соответствуют составные ФМ. Для одноименных темпоральных операций « $\uparrow$ », « $\parallel$ », « $\uparrow$ », « $\parallel$ », « $\parallel^*$ » и операций « $\textcircled{\parallel}$ », « $\textcircled{\uparrow}$ », « $\textcircled{\downarrow}$ » развертывания (размещения) бинарных предикатов сформулируем правила размещения базовых функциональных структур на физических узлах. Так, правило

$$(\forall x)(\forall y)[|(x, y) \supset \textcircled{\parallel}(x, y)],$$

при выполнении которого «возможно (потенциально) одновременно» выполняемые ФМ x и y размещаются на одном и том же физическом узле и тем самым теряют возможность параллельного выполнения, соответствует критерию минимума аппаратных затрат, а правило

$$(\forall x)(\forall y)[|(x, y) \supset \textcircled{\uparrow}(x, y)],$$

при реализации которого «возможно одновременно» выполняемые ФМ x и y размещаются на различных физических узлах (тем самым обеспечивается возможность их параллельного выполнения), соответствует критерию возможной максимальной производительности за счет параллельного выполнения функциональных модулей.

В проектируемых системах хранения и обработки данных обычно учитываются ограничения объема памяти физических узлов и реальные выгоды от параллельного выполнения некоторых из них невелики, поэтому для многих проектируемых систем нередко достаточно выполнения следующего более общего правила:

$$\begin{aligned} &(\forall x)(\forall y)[|(x, y) \supset \textcircled{\downarrow}(x, y)] \sim \\ &\sim (\exists x)(\exists y)[|(x, y) \supset \textcircled{\parallel}(x, y)] \& (\exists x)(\exists y)[|(x, y) \supset \textcircled{\uparrow}(x, y)] \vee \\ &\vee (\forall x)(\forall y)[|(x, y) \supset \textcircled{\parallel}(x, y)] \vee (\forall x)(\forall y)[|(x, y) \supset \textcircled{\uparrow}(x, y)], \end{aligned}$$

при реализации которого «возможно одновременно» выполняемые ФМ размещаются либо на одном и том же физическом узле, либо на разных узлах.

Аналогично, для темпорального отношения « $\uparrow$ » в реализованных системах хранения и обработки данных может соблюдаться правило

$$\begin{aligned} &(\forall x)(\forall y)[\uparrow(x, y) \supset \textcircled{\downarrow}(x, y)] \sim \\ &\sim (\exists x)(\exists y)[\uparrow(x, y) \supset \textcircled{\parallel}(x, y)] \& (\exists x)(\exists y)[\uparrow(x, y) \supset \textcircled{\uparrow}(x, y)] \vee \\ &\vee (\forall x)(\forall y)[\uparrow(x, y) \supset \textcircled{\parallel}(x, y)] \vee (\forall x)(\forall y)[\uparrow(x, y) \supset \textcircled{\uparrow}(x, y)], \end{aligned}$$

означающее возможность размещения выполняемых разновременно ФМ как на одних и тех же, так и на различных физических узлах.

Для темпоральных отношений « $\parallel^*$ », « $\parallel$ » и « $\uparrow$ » размещение ФМ x и y связано с выполнением следующих правил:

$$\begin{aligned} &(\forall x)(\forall y)[\parallel^*(x, y) \supset \textcircled{\uparrow}(x, y)], \\ &(\forall x)(\forall y)[\parallel(x, y) \supset \textcircled{\uparrow}(x, y)], \\ &(\forall x)(\forall y)[\uparrow(x, y) \supset \textcircled{\downarrow}(x, y)] \sim \end{aligned}$$

$$\sim (\exists x)(\exists y)[\uparrow(x, y) \supset \textcircled{\uparrow}(x, y)] \& (\exists x)(\exists y)[\uparrow(x, y) \supset \textcircled{\parallel}(x, y)] \vee \\ \vee (\forall x)(\forall y)[\uparrow(x, y) \supset \textcircled{\downarrow}(x, y)] \vee (\forall x)(\forall y)[\uparrow(x, y) \supset \textcircled{\parallel}(x, y)].$$

Проиллюстрируем использование свойств пространственно-временных отношений для перехода от функциональной архитектуры систем хранения и обработки данных к системной архитектуре. В работе [3] приведен пример СеАМ-реализации следующего сценария обработки данных в сетевой системе хранения данных:

$$F_0 = F_1 \uparrow ((F_2 \downarrow F_3) | (F_4 \uparrow [\alpha] (F_5 \vee A^E) \uparrow F_6)) \uparrow (F_7 \parallel^* F_8) \uparrow F_k.$$

Не вдаваясь в детали выполнения указанных операций, опишем на основе приведенных выше правил ситуацию развертывания используемых ФМ в сети физических узлов:

$$F_0 = F_1 \textcircled{\uparrow} ((F_2 \textcircled{\parallel} F_3) \textcircled{\downarrow} (\textcircled{\parallel}(F_4, F_5, F_6))) \textcircled{\uparrow} (F_7 \textcircled{\downarrow} F_8) \textcircled{\uparrow} F_k.$$

Данное выражение соответствует ситуации развертывания, обеспечивающей реализацию параллелизма при повышенных аппаратных затратах. Если же при реализации необходима некоторая экономия физических узлов в ущерб производительности, то возможно модифицировать последнее выражение следующим образом:

$$F'_0 = (F_1 \textcircled{\parallel} ((F_2 \textcircled{\parallel} F_3) \textcircled{\parallel} (\textcircled{\parallel}(F_4, F_5, F_6)))) \textcircled{\uparrow} (F_7 \textcircled{\downarrow} F_8) \textcircled{\uparrow} F_k.$$

Заключение

Предложены принципы реализации методов и средств проектирования распределенных систем хранения и обработки данных, основанные на использовании непосредственно исполняемых формальных спецификаций и обеспечивающих построение масштабируемых систем с автоматизацией процессов реконфигурации структуры и миграции данных. Эти спецификации адекватно описывают процессы управления путями доступа к ресурсам, поиска и выборки данных, копирования и репликации данных.

Список литературы

1. Волчихин, В. И. Самомодификация топологии и развертывания объектов в виртуализированных сетях хранения и обработки данных (I. Темпоральные и пространственные операции) / В. И. Волчихин, С. А. Зинкин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 3 (31). – С. 54–69.
2. Многоуровневое структурное проектирование программ. Теоретические основы, инструментарий / Е. Л. Ющенко, Г. Е. Цейтлин, В. П. Грицай, Т. К. Терзян. – М. : Финансы и статистика, 1989. – 208 с.
3. Зинкин, С. А. Функционально-структурная реализация интеллектуальных систем управления внешней памятью ЭВМ и систем / С. А. Зинкин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2008. – № 1 (5). – С. 14–24.

References

1. Volchikhin V. I., Zinkin S. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2014, no. 3 (31), pp. 54–69.

3. Yushchenko E. L., Tseytlin G. E., Gritsay V. P., Terzyan T. K. *Mnogourovnevoe strukturnoe proektirovanie programm. Teoreticheskie osnovy, instrumentariy* [Multi-level structural software engineering. Theoretical base, instruments]. Moscow: Finansy i statistika, 1989, 208 p.
4. Zinkin S. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2008, no. 1 (5), pp. 14–24.

Волчихин Владимир Иванович

доктор технических наук, профессор,
президент Пензенского государственного
университета (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: rectorat@pnzgu.ru

Volchikhin Vladimir Ivanovich

Doctor of engineering sciences, professor,
President of Penza State University (40
Krasnaya street, Penza, Russia)

Зинкин Сергей Александрович

доктор технических наук, профессор,
кафедра вычислительной техники,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: zsa49@yandex.ru

Zinkin Sergey Aleksandrovich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of computer engineering,
Penza State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

УДК 681.324

Волчихин, В. И.

Самомодификация топологии и развертывания объектов в виртуализированных сетях хранения и обработки данных (II. Операционная семантика и исполнительные механизмы) / В. И. Волчихин, С. А. Зинкин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 4 (32). – С. 18–31.

АЛГОРИТМ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ТРАЕКТОРИЙ ОБУЧЕНИЯ В ДВУХУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЕ ОБРАЗОВАНИЯ

Аннотация.

Актуальность и цели. С переходом системы высшего профессионального образования на двухуровневую модель обучения «бакалавриат – магистратура» появилось несколько проблем, одна из которых – сложность определения оптимальных траекторий обучения в двухуровневой системе образования. Целью работы является решение этой проблемы путем разработки формализованного алгоритма, позволяющего найти оптимальные с точки зрения временных затрат траектории обучения на более высоком уровне образования. Решение данной проблемы позволит своевременно и с минимальными затратами выпускать профессиональные кадры перспективных направлений подготовки для удовлетворения кадровых потребностей рынка труда.

Материалы и методы. Задача поиска оптимальных образовательных траекторий по своей сути является задачей переподготовки профессиональных кадров. Рассмотрен существующий метод решения данной задачи, основанный на определении частично изоморфных графов учебных планов. Предложен алгоритм поиска целесообразных траекторий в системе двухуровневого высшего образования, базирующийся на вычислении расстояния Левенштейна между названиями перечня дисциплин сравниваемых направлений подготовки.

Результаты. Разработан формализованный алгоритм поиска оптимальных с точки зрения временных затрат траекторий обучения на более высоком уровне образования. Проведена экспериментальная проверка, в результате которой определены целесообразные траектории обучения в системе «бакалавриат – магистратура». Данный алгоритм также может быть применен для выполнения схожей задачи в системе среднего профессионального образования.

Выводы. Подход, основанный на вычислении расстояния Левенштейна между названиями перечня дисциплин сравниваемых направлений подготовки, дает возможность определить оптимальные траектории обучения с приемлемой точностью. Он является более быстрой альтернативой подходу, основанному на выделении частично изоморфных графов учебных планов.

Ключевые слова: траектория обучения, изоморфизм графов, расстояние Левенштейна, система образования.

A. V. Lushnikov

ALGORITHM OF OPTIMAL LEARNING TRAJECTORIES SELECTION IN A TWO-TIER EDUCATION SYSTEM

Abstract.

Background. As the system of higher education has shifted to the two-tier model of learning – "bachelor - master" – there have appeared several problems, one of which being the complexity of determining the optimal trajectories of learning in the two-tier education system. The purpose of this paper is to solve this problem by developing a formal algorithm that allows to find the best, in terms of time, learning paths at higher education. The solution to this problem will allow to timely and cost-effectively deliver professionals having qualification in perspective fields of knowledge to meet human resource needs of the labor market.

Materials and methods. The task of finding the optimal educational trajectories, essentially, is the task of training professional personnel. The author considered the existing method to solve this problem, based on the definition of partially isomorphic graphs of curricula. The researcher suggested an algorithm for searching feasible trajectories in the two-level system of higher education based on calculation of the Levenstein distance between the list titles of subjects from compared educational programs.

Results. The author developed a formalized time-optimal search algorithm for learning trajectories at a higher level of education and carried out the experimental verification, which, as a result, determined expedient learning trajectories in the "Bachelor - Master" system. This algorithm can also be used to perform similar tasks in the system of vocational education.

Conclusions. The approach, based on calculation of the Levenstein distance between the titles in the list of subjects from compared education programs, enables to determine the optimal learning trajectory with acceptable accuracy. It is a faster alternative approach based on allocation of partially isomorphic graphs curricula.

Key words: trajectory of learning, graph isomorphism, Levenstein distance, two-tier educational system.

Введение

Болонский процесс – процедура сближения и гармонизации систем высшего образования европейских стран с целью создания единого пространства высшего образования. Официальной датой начала процесса принято считать 19 июня 1999 г., когда была подписана Болонская декларация [1]. Россия присоединилась в сентябре 2003 г. к Болонскому процессу, в рамках которого система образования переходит на двухуровневую систему высшего образования, включающую бакалавриат с продолжительностью обучения 4 года и магистратуру с продолжительностью обучения 2 года.

Главное преимущество новой системы обучения в условиях динамично развивающегося рынка труда – это возможность после четырех лет обучения в бакалавриате более точно определить свои интересы и потребности и, исходя из этого, выбрать более узкое направление подготовки и профиль магистратуры. Еще одно преимущество состоит в возможности получить две разные специальности, в том числе за рубежом.

Помимо преимуществ, система имеет несколько недостатков: неготовность российского рынка труда принимать на рабочие места бакалавров в связи с распространенным мнением об их недостаточном уровне подготовки; сложность адаптации образовательных программ специалитета, рассчитанных на пятилетнее обучение к четырехлетнему образовательному циклу. Возможность поступить в магистратуру на любое направление подготовки (НП), вне зависимости от того, на каком бакалавр учился до этого, также создает определенные проблемы. Перечень дисциплин, преподаваемых в рамках НП бакалавров обычно коррелирует только с НП магистров внутри одной группы специальностей. В результате данная возможность во многих случаях может оказаться нецелесообразной. Под целесообразностью понимаются временные затраты, необходимые для получения базовых знаний, которые необходимы для успешного обучения на новом, неизвестном НП магистратуры. В настоящий момент отсутствуют программные средства для поддержки принятия решений при определении оптимальных траекторий в двухуровневой системе образования.

1. Постановка задачи и существующие решения

После рассмотрения существующих проблем предлагается разработать алгоритм поиска наиболее целесообразной траектории продолжения обучения на более высоком уровне образования с целью минимизации затрат на получение перспективной специальности и повышения конкурентоспособности выпускника вуза на динамично развивающемся рынке труда.

Потребность в определении целесообразной траектории обучения на более высоком уровне образования может возникнуть в следующих случаях:

1. Принятие решения о получении востребованной специальности в магистратуре высшего профессионального образования (ВПО) на современном рынке труда после окончания бакалавриата.

2. Принятие решения о получении востребованной специальности в бакалавриате ВПО на современном рынке труда после получения специальности среднего профессионального образования (СПО).

Текущая задача по своей сути является задачей переподготовки профессиональных кадров. К настоящему времени наиболее комплексным решением данной задачи является [2] идея автоматизированного сравнения государственных образовательных стандартов специальностей, а также учебных планов специальностей, которые представлены графами, для переподготовки специалистов одной специальности на другую с целью минимизации затрат на переподготовку. Математическая постановка этой задачи сформулирована как задача IS-анализа (анализ информационных структур), которая базируется на методах установления частичного изоморфизма графов. Применяется 2-этапный вариант сравнения государственных образовательных стандартов (ГОС), когда после этапа сравнения федеральных компонент и выявления наиболее похожих ГОС проводится сравнение региональных компонент (дисциплин) и дисциплин по выбору.

В зависимости от количества дисциплин, которые необходимо дополнительно изучить для переподготовки и повышения квалификации, рассматриваются следующие способы:

1. Краткосрочные курсы повышения квалификации продолжительностью от 72 до 100 ч.

2. Среднесрочные курсы, являющиеся профессиональной подготовкой продолжительностью от 100 до 500 ч.

3. Получение второго высшего образования с временными затратами на обучения – свыше 500 ч.

Такой подход обеспечивает точное определение дисциплин, которые необходимо дополнительно изучить и соответственное время, необходимое для изучения. Однако данный подход связан с необходимостью представления учебных планов в виде графа и использованием сложных алгоритмов установления изоморфизма.

В связи с внедрением федерального государственного образовательного стандарта (ФГОС) третьего поколения наиболее перспективным направлением получения более высокой квалификации является обучение в системе двухуровневого высшего образования «бакалавриат – магистратура», а также в системе «СПО – бакалавриат ВПО».

2. Алгоритм поиска целесообразной траектории обучения в системе «бакалавриат – магистратура»

В работе [3] был предложен алгоритм поиска возможных траекторий обучения в системе двухуровневого высшего образования. Он предназначен для определения наиболее близких направлений подготовки магистратуры для продолжения обучения после бакалавриата. Алгоритм основывается на анализе множеств дисциплин, входящих в каждое направление подготовки бакалавров и магистров.

Множество НП магистров обозначим как

$$M = \{m_1, m_2, m_3, \dots, m_i\}, \quad (1)$$

а множество направлений подготовки НП бакалавров как

$$B = \{b_1, b_2, b_3, \dots, b_j\}. \quad (2)$$

Представим каждый элемент множества направлений подготовки множеством дисциплин, тогда

$$D(m_i) = \{d_1^{m_i}, d_2^{m_i}, d_3^{m_i}, \dots, d_n^{m_i}\} - \quad (3)$$

множество дисциплин i -го НП магистров:

$$D(b_j) = \{d_1^{b_j}, d_2^{b_j}, d_3^{b_j}, \dots, d_k^{b_j}\} - \quad (4)$$

множество дисциплин j -го НП бакалавров.

Введем функцию F , которая предназначена для расчета степени соответствия двух направлений подготовки:

$$F(b_j, m_i) = diff, \quad (5)$$

где $diff$ — целое положительное число, равное сумме минимальных редакционных расстояний (расстояний Левенштейна) между названиями дисциплин.

Для нахождения минимального различия между названиями двух дисциплин введем функцию $L(d_n^{m_i}, d_k^{b_j})$. Эта функция базируется на вычислении расстояния Левенштейна [4] между двумя строками, но имеет ряд модификаций. В классическом виде расстояние Левенштейна имеет недостаток: расстояния между совершенно разными короткими словами оказываются небольшими, в то время как расстояния между очень похожими длинными словами оказываются значительными. Для устранения этого недостатка предлагается модифицировать функцию [3]. Предлагается добавить проверку на вхождение строк. Если одна строка является вхождением в другую строку, то строки будем считать идентичными в смысловом отношении, иначе необходимо сравнить расстояние Левенштейна двух строк с длиной минимальной строки. Если расстояние Левенштейна превосходит длину минимальной строки, то можно считать строки логически различными и результатом будет являться заранее определенное большое значение разницы строк, в обратном случае результат работы функции L будет равен расстоянию Левенштейна

[3]. Блок-схема модифицированной функции расчета разницы строк представлена на рис. 1.

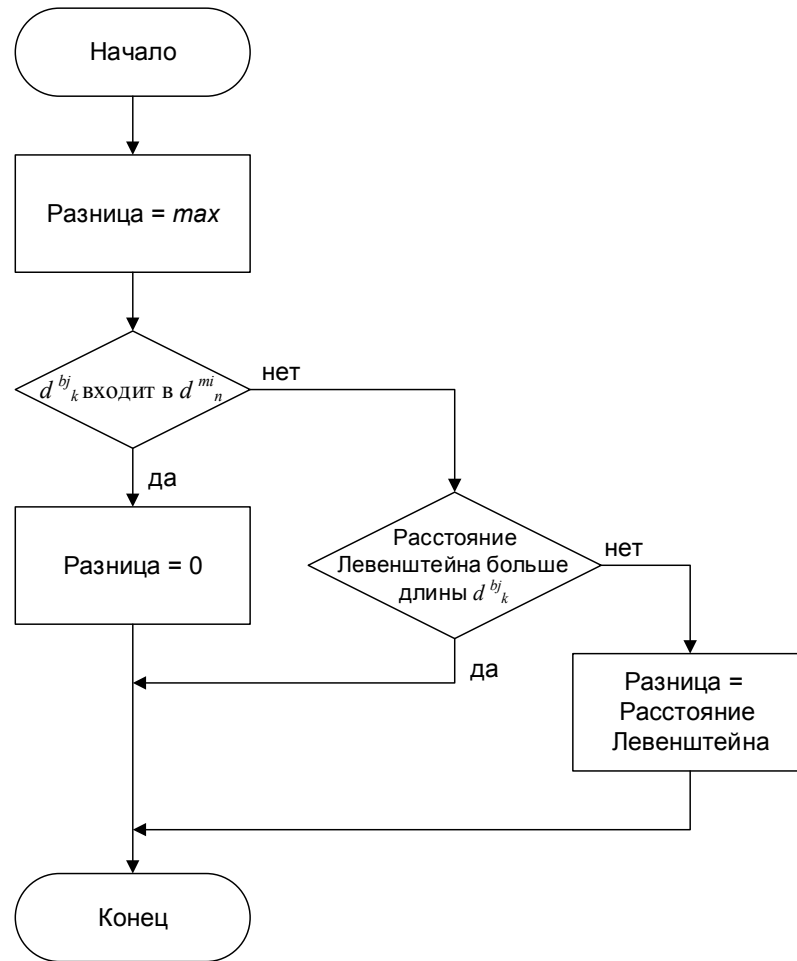


Рис. 1. Схема алгоритма модифицированной функции Левенштейна

Таким образом, функция F примет вид

$$F(b_j, m_i) = \sum_{d_t^{bj}}^k \sum_{d_r^{mi}}^n \min \left(L(d_t^{bj}, d_r^{mi}) \right). \quad (6)$$

Функция F является аддитивной, ее минимальное значение, равное нулю, будет свидетельствовать о полном соответствии двух направлений подготовки.

На основании предложенной модификации функции Левенштейна опишем алгоритм поиска оптимальных траекторий обучения в двухуровневой системе образования. Основные этапы алгоритма:

1. Выбрать исходное НП бакалавриата, например, 010100 – Математика.
2. Выбрать доступные НП магистратуры.

3. Для каждого соответствия «направление бакалавриата – направление магистратуры» рассчитать по предлагаемой формуле F степень соответствия направлений подготовки.

4. Выбрать НП магистров с максимальной степенью соответствия направлений подготовки (с минимальным значением $diff$).

Выбранные НП назовем «прямыми» соответствиями. Помимо «прямых» соответствий возможны «транзитивные» – это такие направления подготовки магистров, которые являются «прямыми» для схожего НП бакалавра. Для определения «транзитивного» соответствия необходимо:

1. Для выбранного НП бакалавров с использованием функции F найти соответствие среди остальных НП бакалавров. Например, для НП 010100 – Математика, наиболее близкое по перечню дисциплин направление бакалавров: 010200 – Математика и компьютерные науки.

2. Повторить пункты 2–4 алгоритма поиска прямых соответствий.

3. В случае определения «транзитивного» соответствия значения $diff$ для найденного схожего НП и найденного «прямого» НП для схожего суммируются.

Экспериментальная проверка представлена в табл. 1, 2.

Таблица 1

«Прямые» соответствия

НП бакалавриата	НП магистратуры	Значение $diff$
010100 – Математика	010200 – Математика и компьютерные науки	430
	010900 – Прикладные математика и физика	456
	010100 – Математика	221

Таблица 2

«Транзитивные» соответствия

НП бакалавриата	Схожие НП бакалавриата	НП магистратуры	Значение $diff$
010100 – Математика	010800 – Механика и математическое моделирование	010900 – Прикладные математика и физика	473
	011200 – Физика		650
	010400 – Прикладная математика и информатика	010300 – Фундаментальная информатика и информационные технологии	491

В табл. 1 и 2 были выбраны соответствия с минимальным значением $diff$, т.е. с максимальной степенью соответствия направлений подготовки бакалавров и магистров. Степень соответствия выбранного НП «010100 – Математика» остальным НП магистратуры значительно ниже (значение $diff$ варьируется в пределах 800–2000). Эти результаты дают право полагать, что в табл. 1 и 2 были найдены наиболее целесообразные траектории обучения в системе «бакалавриат – магистратура».

По результатам, приведенным в табл. 1 и 2, имеется возможность построить графы (рис. 2, 3), вершинами которых являются НП бакалавров и магистров, ребра – возможные пути дальнейшего обучения бакалавра, а веса ребер – значения *diff*.

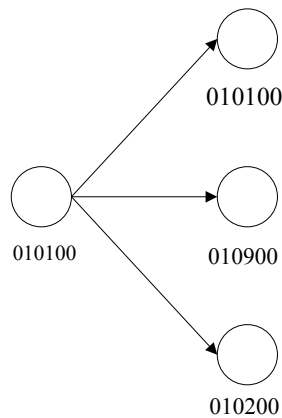


Рис. 2. Граф «прямых» соответствия НП

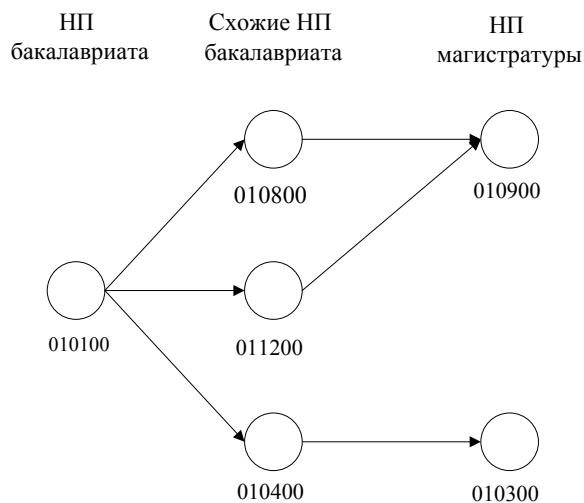


Рис. 3. Граф «Транзитивных» соответствий НП

3. Применение алгоритма поиска целесообразной траектории обучения в системе «СПО – бакалавриат ВПО»

Наряду с поиском целесообразных траекторий в системе «бакалавриат – магистратура» не менее важным является определение целесообразных траекторий в системе «СПО – бакалавриат ВПО». Продолжение обучения в вузах после получения среднего профессионального образования является весьма распространенной практикой, и нередко возникают сложности определения наиболее подходящего направления подготовки для абитуриента. Для выбора оптимальной траектории продолжения обучения в учреждениях

ВПО после получения среднего профессионального образования предлагается использовать предложенный выше алгоритм. Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Таблица 3
Траектории обучения в системе «СПО – бакалавриат ВПО»

НП СПО	НП бакалавриата ВПО	Значение <i>diff</i>
021301 – Картография	021300 – «Картография и геоинформатика»	531
	022000 – «Экология и природопользование»	588
	021600 – «Гидрометеорология»	624

На основании результатов, представленных в табл. 3, можно сделать вывод, что выпускнику СПО, прошедшему обучение по специальности 021301 – «Картография», целесообразно поступить на НП бакалавриата 021300 – «Картография и геоинформатика», так как данные НП имеют минимальное значение *diff*.

Заключение

После перехода системы высшего профессионального образования на двухуровневую модель обучения «бакалавриат – магистратура» возник ряд проблем, таких как сложность адаптации существующих программ обучения, а также возможность поступить на любое направление подготовки магистратуры после окончания бакалавриата, которая приводит зачастую к формированию неоптимальных траекторий обучения.

В данной работе предлагается алгоритм поиска оптимальных траекторий в системе двухуровневого высшего образования. Алгоритм показал приемлемый результат работы, на основе которого были найдены прямые и транзитивные соответствия для нескольких направлений подготовки бакалавров. Алгоритм был применен для выполнения схожей задачи в системе «СПО – бакалавриат ВПО».

Подход с использованием модифицированной функции расчета расстояния Левенштейна позволяет быстро определить степень соответствия различных направлений подготовки без использования сложных алгоритмов. Следующим этапом в развитии алгоритма является определение перечня дисциплин и количества часов на их изучение для переподготовки и повышения квалификации.

Предложенный алгоритм используется для разработки систем принятия решений в сфере регионального образования для согласования выпуска профессиональных кадров и потребностей рынка труда.

Список литературы

1. Зона европейского высшего образования [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.inf.tsu.ru/Webdesign/bpros.nsf/news/010920051>
2. Бершадский, А. М. Информационная поддержка регионального рынка труда и выпуска специалистов с высшим образованием : моногр. / А. М. Бершадский, В. В. Эпп ; под ред. В. И. Волчихина. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2008. – 122 с.

3. **Бершадский, А. М.** Методика и алгоритм поиска возможных траекторий обучения в системе двухуровневого высшего образования / А. М. Бершадский, А. В. Лушников // Системы автоматизированного проектирования и информационные системы : тр. Междунар. лектория. – Воронеж : Изд-во Воронежского гос. техн. ун-та, 2014. – С. 124–128.
4. Расстояние Левенштейна [Электронный ресурс]. – URL: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Расстояние Левенштейна](http://ru.wikipedia.org/wiki/Расстояние_Левенштейна).

References

1. *Zona evropeyskogo vysshego obrazovaniya* [European higher education zone]. Available at: <http://www.inf.tsu.ru/Webdesign/bpros.nsf/news/010920051>
2. Bershadskiy A. M., Bershadskiy A. M. *Informatsionnaya podderzhka regional'nogo rynka truda i vypuska spetsialistov s vysshim obrazovaniem: monogr.* [Information support to the regional labor market and deliver of experts with higher education: monograph]. Penza: Izd-vo PGU, 2008, 122 p.
3. Bershadskiy A. M., Lushnikov A. V. *Sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya i informatsionnye sistemy: tr. Mezhdunar. lektoriya.* [CAD and information systems: proceedings of the International lecture center]. Voronezh: Izd-vo Voronezhskogo gos. tekhn. un-ta, 2014, pp. 124–128.
4. *Rasstoyanie Levenshteyna* [Levenstein distance]. Available at: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Rasstoyanie Levenshteyna](http://ru.wikipedia.org/wiki/Rasstoyanie_Levenshteyna).

Лушников Алексей Владимирович
аспирант, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

Lushnikov Aleksey Vladimirovich
Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

E-mail: al.lushnikov@yandex.ru

УДК 004

Лушников, А. В.

Алгоритм выбора оптимальных траекторий обучения в двухуровневой системе образования / А. В. Лушников // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 4 (32). – С. 32–40.

С. А. Шептунов, Ю. М. Соломенцев,
И. С. Кабак, Н. В. Суханова, Т. И. Дробышева

НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ ЛИЧНОСТИ РЕБЕНКА В ПРОЦЕССЕ ЕГО ОБУЧЕНИЯ В СРЕДНЕЙ ШКОЛЕ

Аннотация.

Актуальность и цели. Проблема разработки средств и методов для формирования и развития личности ребенка, с одной стороны, относится к области педагогики и психологии, а с другой стороны – к области кибернетики и искусственного интеллекта. Вопросы педагогики достаточно полно отражены в специальной литературе, в то время как применение искусственного интеллекта, а именно искусственных нейронных сетей, не нашло достаточного освещения в специальной литературе.

Материалы и методы. В основе работы лежит применение искусственных нейронных сетей, спроектированных по особой технологии МОДУС-НС.

Результаты. Разработана модель формирования и развития личности ребенка при его обучении, в основе которой лежат искусственные нейронные сети особого способа реализации – технологии МОДУС-НС. Приведено описание основ технологии МОДУС-НС и ссылки на литературе с полным описанием этой технологии.

Выводы. Предложена модель формирования и развития личности ребенка в процессе его обучения. Модель использует методы искусственного интеллекта, в частности, большие искусственные нейронные сети. Предложено устройство для реализации нейросетевой модели, которое может быть использовано для определения текущего и целевого уровней интеллектуального эмоционального, физического развития ребенка, для разработки мер по формированию и развитию у него определенных личностных качеств, с ориентацией на последующее профессиональное обучение. Получена модель личности с принципиально новыми свойствами: масштабируемость нейронной сети; простота переноса и копирования результатов предшествующего обучения; возможность реализации различных моделей личности на одном аппаратном комплексе. Все перечисленные новые свойства позволяют создавать новое поколение интеллектуальных систем, которые могут не только моделировать, но и прогнозировать развитие личности ребенка в процессе его обучения в средней школе.

Ключевые слова: нейронная сеть, искусственный интеллект, модель формирования и развития личности.

S. A. Sheptunov, Yu. M. Solomentsev,
I. S. Kabak, N. V. Sukhanova, T. I. Drobysheva

NEURAL NETWORK MODEL OF CHILD'S IDENTITY DEVELOPMENT IN THE COURSE OF HIGH SCHOOL TRAINING

Abstract.

Background. The problem of development of means and methods of child's identity creation and development, on the one hand, belongs to the field of pedagogy and psychology, and on the other hand – to the field of cybernetics and artificial intelligence. Problems of pedagogy are rather fully reflected in special litera-

ture, while the application of artificial intelligence, namely the artificial neural networks, hasn't found sufficient reflection in special literature.

Materials and methods. The study was based on the application of the artificial neural networks designed according to the MODUS-NN special technology.

Results. The authors developed a model of child's identity creation and development during his/her training which is based on artificial neural networks with specific ways way of realization – the MODUS-NN technology. The researchers described the fundamentals of the MODUS-NN technology and gave references in literature with a full description of this technology.

Conclusions. The model of child's identity creation and development in the course of high school training is offered. The model uses methods of artificial intelligence, in particular, large artificial neural networks. The authors offer a device for realization of the artificial neural network model which can be used for determination of the current and target levels of intellectual, emotional, physical development of a child, for development of measures for creation and development of certain personal qualities in a child, focused on subsequent vocational education. The model of the personality was received embracing the following essentially new properties: scalability of a neural network; simplicity of previous results transfer and copy; possibility of realization of various models of the personality on one hardware complex. All the new properties listed allow to create a new generation of intellectual systems which are capable of not only modeling, but also predicting development of the child's identity in the course of high school training.

Key words: neural network, artificial intelligence, model of identity creation and development.

Анализ методов формирования и развития личности ребенка в средней школе

Цель исследования – разработка модели для формирования и развития личности ребенка в процессе его обучения в средней школе.

Модель формирования и развития личности ребенка ориентирована на работу педагога, психолога или дефектолога с детьми школьного возраста и подростками. Модель использует методы искусственного интеллекта, в частности, большие нейронные сети.

Для реализации нейросетевой модели формирования и развития личности ребенка необходимо специальное устройство. Это устройство может быть использовано для тестирования и определения текущего и целевого уровней интеллектуального эмоционального, физического развития ребенка, для разработки мер по формированию и развитию у него определенных личностных качеств. Формирование и развитие личности ребенка происходит с ориентацией на его последующее профессиональное обучение.

Например, у курсантов военного училища и учеников спортивной школы надо развивать ответственность, дисциплину, физическую силу и выносливость, у учащихся медицинского училища – милосердие, терпение и сострадание, у студентов театрального училища – эмоциональность и восприимчивость и т.д.

В ряде работ описаны общие подходы к формированию и развитию интеллектуальных, эмоциональных и физических способностей человека.

Например, в книге В. Г. Крысько «Психология в схемах и таблицах» приводится пример психологической структуры личности человека [1]. В этой структуре выделены следующие факторы формирования личности:

внешняя среда, действия, сознание, интеллект, физическое тело, чувства и эмоции. Согласно В. Г. Крысько, личность формируется, проявляется и совершенствуется в деятельности. Деятельность рассматривается как процесс взаимодействия человека с окружающей средой. Деятельность представляется как структура, состоящая из отдельных компонентов или действий. Действие включает в себя постановку цели и ее достижение.

В книге П. Д. Успенского «Четвертый путь» также описана психологическая структура личности человека [2]. Согласно П. Д. Успенскому и Г. Гурджиеву, существуют сотни и тысячи отдельных маленьких «я», которые формируют структуру личности человека.

Описанные подходы к формированию и совершенствованию структуры личности представляются упрощенными, так как они не учитывают взаимное влияние и взаимные связи между элементами, входящими в структуру личности.

В предложенной модели личность ребенка условно представляется как сложная система, состоящая из большого числа взаимно связанных и взаимно зависимых частей. Каждая часть личности, в свою очередь, условно представляется как сложная система, состоящая из подсистем и т.д. до самого нижнего уровня, в который входят элементарные и неделимые компоненты личности.

Использование искусственного интеллекта для решения поставленной задачи

Модель формирования и развития личности ребенка. Функциональная схема модели формирования и развития личности ребенка на основе нейронных сетей представлены на рис. 1 (ИНС – искусственные нейронные сети).

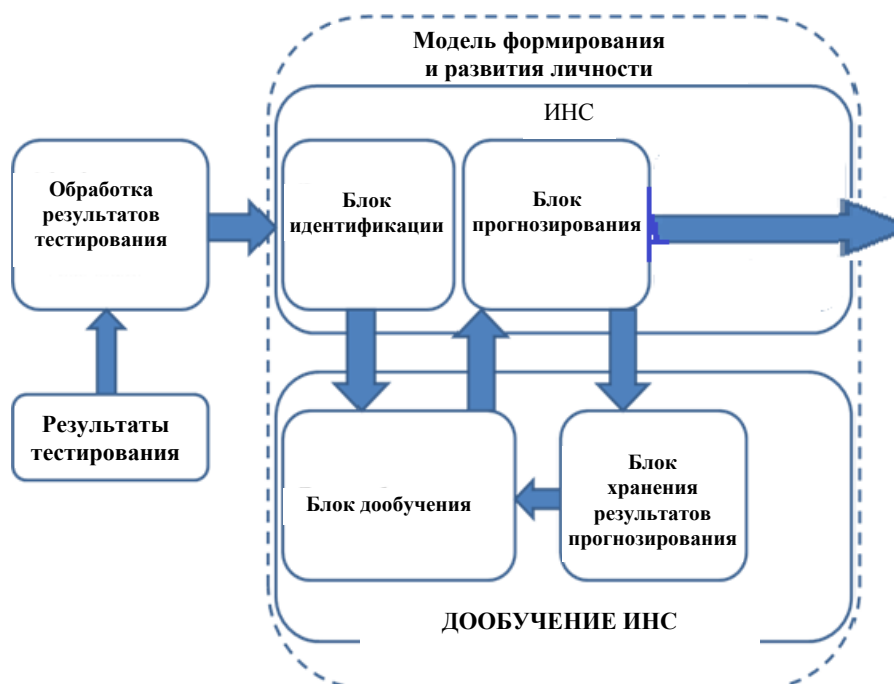


Рис. 1. Функциональная схема модели формирования и развития личности ребенка

Объектом исследования является личность ребенка.

Методом исследования выбрано имитационное моделирование процесса формирования и развития личности ребенка.

На вход имитационной модели подаются результаты психологического тестирования ребенка. На выходе модели получают значение, которое характеризует уровень развития личности в данный момент времени t . Уровень развития личности является нечеткой переменной и принимает значения в диапазоне $[0;1]$ (от 0 до 100 % уровня развития личности взрослого человека). На выходе модели формируют прогноз развития личности ребенка для последующего момента времени $(t + dt)$.

Модель формирования и развития личности ребенка реализована на базе искусственной нейронной сети. В этой модели можно выделить три основных функциональных блока:

- блок идентификации текущего уровня развития личности ребенка;
- блок прогнозирования развития личности ребенка;
- блок дообучения ИНС.

Каждый блок реализуется отдельным фрагментом обученной нейронной сети.

Блок идентификации определяет текущий уровень развития личности ребенка по результатам его психологического тестирования. Блок идентификации текущего состояния обучается перед началом работы модели на основе начальной экспериментальной обучающей выборки.

Блок прогнозирования развития личности ребенка обучается в процессе работы модели на основе текущих фактических данных. Выходом блока прогнозирования развития личности ребенка является оценка времени, необходимого для формирования определенных целевых значений компонентов личности в процессе обучения.

Блок дообучения ИНС позволяет проводить дополнительное обучение модели в процессе ее работы.

При традиционном использовании нейронных сетей обучение производится в один этап – перед началом эксплуатации нейронной сети. Обучение производят на достаточной по количеству обучающей выборке до достижения требуемого качества работы нейронной сети. При этом предъявляются требования к качеству и самой обучающей выборки.

В предложенной подсистеме обучение ИНС происходит в два этапа:

- первичное обучение при помощи метода обратного распространения ошибки;
- дополнительное обучение во время работы системы при помощи генетических алгоритмов.

На первом этапе обучения при помощи метода обратного распространения ошибки создается заведомо большая по числу нейронов сеть и большое значение среднеквадратичной ошибки обучения. В последующем при дополнительном обучении устанавливается допустимое значение среднеквадратичной ошибки. Затем уменьшается размерность сети за счет удаления малозначимых нейронов.

Предварительное обучение необходимо для того, чтобы сформировать начальную популяцию для генетических алгоритмов и для увеличения быстродействия сети. Быстродействие сети увеличивается за счет снижения тра-

фика информации в коммутаторной нейронной сети путем оптимальной группировки нейронов.

Возможны три способа обучения:

- 1) предварительное обучение системы;
- 2) обучение или переобучение в процессе работы;
- 3) комбинация обоих подходов.

Схема использования интеллектуальной модели развития личности показана рис. 2.

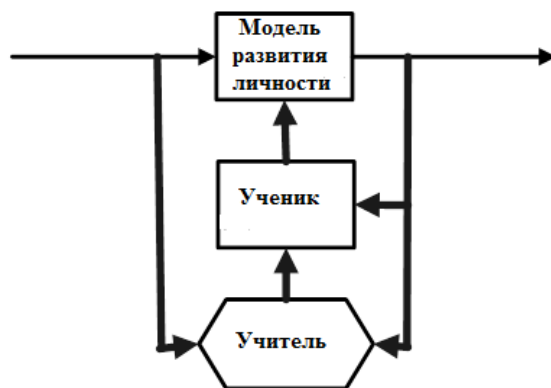


Рис. 2. Интеллектуальная модель развития личности

Предложенная реализация интеллектуальной модели развития личности использует большие нейронные сети.

Известны три основных способа создания искусственных нейронных сетей [3]:

1. Аппаратная реализация, когда нейронная сеть является аппаратной схемой, электронным устройством.
2. Программная реализация, когда нейронная сеть является компьютерной программой.
3. Аппаратно-программная реализация, являющаяся комбинацией двух первых способов.

Описание используемой нейросетевой модели. Аппаратно-программная реализация интеллектуальных систем ставит ряд научных проблем:

– предлагается реализовать интеллектуальную систему из набора унифицированных аппаратных модулей с памятью. В процессе инициализации такой системы в память модуля производится загрузка результатов предварительного обучения нейронной сети.

– необходимо определить архитектуру интеллектуальной системы. Применен принцип декомпозиции и модульного построения.

– интеллектуальный модуль должен реализовать фрагмент большой нейронной сети. Существенным ограничением является количество линий связи между модулями в составе управляющей системы. Количество линий связи между интеллектуальными модулями необходимо сократить путем рационального размещения нейронов с учетом взаимных связей и количества передаваемой информации. Традиционная архитектура нейронной сети не позволяет эффективно решить перечисленные ранее задачи, поэтому необходимо разработать новую архитектуру нейронной сети.

Поставленные задачи были решены и их результаты защищены патентами РФ [4–9].

Коммутаторная архитектура нейронных сетей. В традиционной архитектуре нейронных сетей используются только элементы одного типа – нейроны. При аппаратной реализации традиционной нейронной сети одним из ограничений являлось количество линий связи у каждого нейрона.

Предложена новая «коммутаторная» архитектура нейронной сети. В коммутаторной нейронной сети используются два типа устройств – нейроны и коммутаторы. В коммутаторной нейронной сети все нейроны имеют только один вход и только один выход (рис. 3).

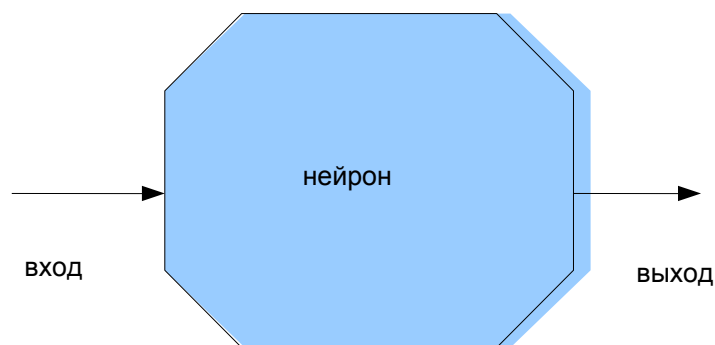


Рис. 3. Нейрон коммутаторной сети

В коммутаторной нейронной сети нейрон реализует функцию активации и является очень простым элементом. Передачу информации между нейронами выполняют специальные устройства – коммутаторы (рис. 4).

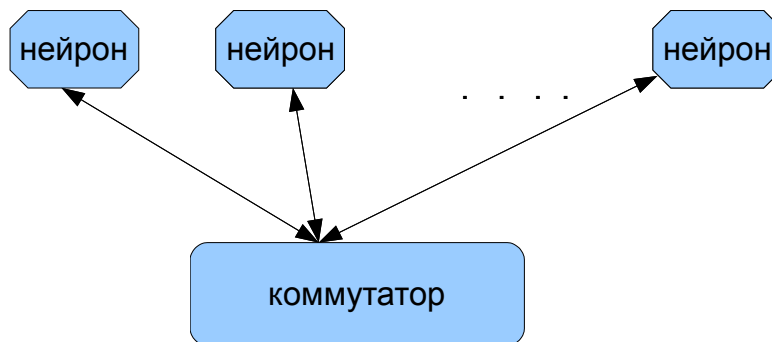


Рис. 4. Фрагмент коммутаторной сети

Коммутаторы имеют много входов и много выходов. Входы и выходы коммутатора подсоединены к нейронам или к другим коммутаторам.

Коммутаторы могут соединяться друг с другом, образуя древовидную структуру. Коммутаторы получают информацию с выходов одних нейронов и передают информацию на входы других нейронов с учетом взаимных связей нейронов и масштабирующих коэффициентов. Масштабирующие коэффициенты и взаимные связи нейронов записаны в память коммутатора в форме

таблиц. Таблицы взаимных связей нейронов и масштабирующих коэффициентов формируются при обучении нейронной сети и могут меняться при ее переобучении. Указанные таблицы заносятся в память коммутатора при инициализации интеллектуальной системы.

Доменная архитектура нейронных сетей. В основу доменной архитектуры нейронных сетей положены два принципа:

- 1) принцип разделения функций принятия решения и функций транспорта информации (принцип коммутации);
- 2) принцип разделения большой нейронной сети на фрагменты (принцип домена).

Первый принцип (принцип коммутации) предусматривает наличие в нейронной сети двух типов элементов:

- 1) элементов, принимающих решение – нейронов (или доменов);
- 2) элементов, выполняющих передачу информации между нейронами (или доменами), – коммутаторов.

Принятие решения и транспорт информации разделены.

Второй принцип (домена) предусматривает объединение множества взаимосвязанных простых элементов (нейронов и коммутаторов) в более сложный элемент принятия решения – домен.

Множества взаимосвязанных нейронов и коммутаторов образуют автономные группы. Обмен информацией между нейронами из одной автономной группы выполняется в коммутаторе. Обмен информацией между нейронами из разных автономных групп выполняет специальное устройство – шлюз домена.

Шлюз домена выполняет следующие функции:

- разделяет все нейроны на внутренние и внешние;
- принимает и передает информацию между внутренними и внешними нейронами,
- выполняет функцию маршрутизации.

Нейронные сети с доменной архитектурой построены по тем же принципам, что и коммутаторные нейронные сети (рис. 5, 6).

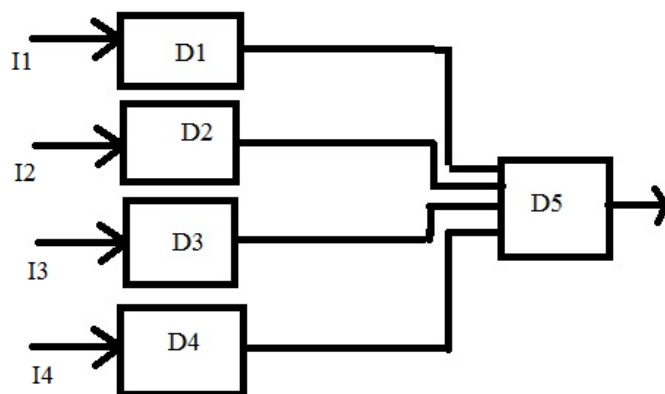


Рис. 5. Нейросетевая модель формирования и развития личности ребенка

Обучение коммутаторной и доменной нейронной сети. При обучении коммутаторной (доменной) нейронной сети нейроны не изменяются. Ре-

зультаты обучения коммутаторной (доменной) нейронной сети отражаются в таблицах взаимных связей нейронов и таблицах коэффициентов масштабирования выходов нейронов. Эти таблицы хранятся в памяти коммутаторов. Обучение доменной нейронной сети происходит путем обучения ее отдельных доменов. Шлюз домена выполняет функции коммутатора самого верхнего уровня. В шлюзе имеется память, где хранятся таблицы взаимных связей и коэффициентов масштабирования выходов внутренних и внешних нейронов.

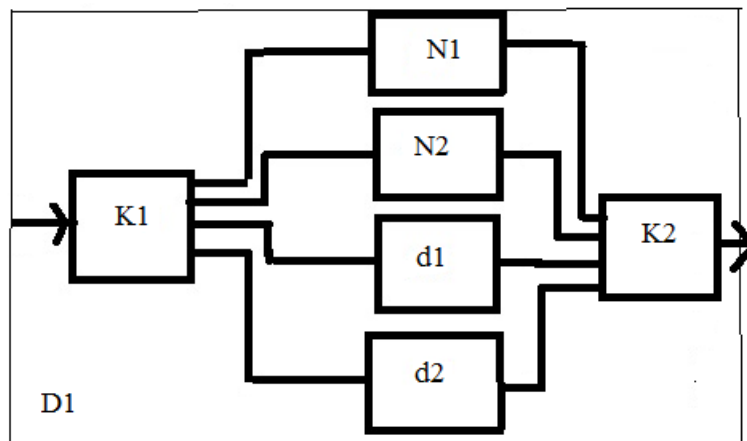


Рис. 6. Фрагмент большой нейронной сети

Нейросетевая модель формирования и развития личности. Предложено устройство для реализации модели формирования и развития личности на базе обученной большой нейронной сети. Большая нейронная сеть содержит соединенные друг с другом фрагменты – домены верхнего уровня. Домены верхнего уровня содержат нейроны (N), домены нижнего уровня (d) и коммутаторы (K). Каждый домен условно обозначает определенную часть или компонент личности ребенка. Домены являются фрагментами большой обученной искусственной нейронной сети, где каждому домену (D) присвоен последовательно возрастающий номер, например: D1, D2, D3, D4 и т.д. Каждый домен нейронной сети соединен с одним или несколькими устройствами других доменов.

Домены верхнего уровня с номерами от 1 до n обозначают уже сформированные в процессе обучения и воспитания отдельные части личности, а домены с номерами от $n + 1$ до $n + k$ обозначают отдельные части личности, которые могут быть целенаправленно сформированы в процессе решения новых задач и освоения новых видов деятельности.

Нейронам и доменам нижнего уровня, входящим в один домен (D1), также присвоены последовательно возрастающие номера, начиная с $n + k + 1$. Домены нижнего уровня условно обозначают компоненты личности, которые формируются в результате освоения ребенком определенных видов деятельности. Домены нижнего уровня с номерами от $n + k + 1$ до m обозначают уже сформированные в процессе обучения и воспитания компоненты личности, а домены нижнего уровня с номерами от $m + 1$ до $m + l$ обозначают отдель-

ные компоненты личности, которые могут быть целенаправленно сформированы.

Каждый нейрон условно обозначает определенный вид деятельности (например: чтение, запоминание, сложение и т.д.). Освоение ребенком нового вида деятельности условно обозначается добавлением доменов, нейронов и их взаимных связей.

Коммутаторы содержат таблицу коэффициентов взаимных связей нейронов и доменов и выполняют функции взаимного соединения и передачи информации между нейронами и (или) доменами. Коэффициенты взаимной связи между доменами и нейронами изменяются в диапазоне значений $[0;1]$. Таблица значений коэффициентов взаимной связи между доменами верхнего уровня условно обозначает наличие, степень формирования и развития частей личности у ребенка.

Таблица значений коэффициентов взаимной связи между нейронами и доменами нижнего уровня условно обозначает наличие и степень формирования у ребенка компонентов личности, а также навыков и знаний, необходимых для освоения определенного вида деятельности.

Развитие и совершенствование у ребенка уже имеющихся навыков деятельности условно обозначаются увеличением коэффициентов взаимных связей нейронов и доменов.

Нейросетевая модель позволяет управлять процессом формирования отдельных частей личности, развивать и совершенствовать уже имеющиеся свойства личности в процессе воспитания и обучения, включающем интеллектуальную, эмоциональную и физическую деятельность. Модель имитирует процесс развития и формирования целостной личности человека, а также может использоваться для оценки отдельных свойств и качеств личности, необходимых для дальнейшей профессиональной деятельности

Заключение

Предложена модель формирования и развития личности ребенка в процессе его обучения. Модель использует методы искусственного интеллекта, в частности, большие нейронные сети.

Предложено устройство для реализации нейросетевой модели, которое может быть использовано для определения текущего и целевого уровней интеллектуального, эмоционального, физического развития ребенка, для разработки мер по формированию и развитию у него определенных личностных качеств с ориентацией на последующее профессиональное обучение.

В статье описана новая коммутаторная технология создания нейронных сетей. Элементами коммутаторной нейронной сети являются не только нейроны, но также устройства для транспорта информации – коммутаторы. За счет декомпозиции большая нейронная сеть разделяется на ряд взаимосвязанных компонентов – доменов.

Таким образом, известную технологию создания нейронных сетей дополнили новыми принципами построения коммутаторных компьютерных сетей.

В результате была получена модель личности с принципиально новыми свойствами:

- масштабируемость нейронной сети;
- простота переноса и копирования результатов предшествующего обучения;

– возможность реализации различных моделей личности на одном аппаратном комплексе.

Все перечисленные новые свойства позволяют создавать новое поколение интеллектуальных систем, которые могут не только моделировать, но и прогнозировать развитие личности ребенка в процессе его обучения в средней школе.

Общие принципы создания нейросетевых моделей личности можно перенести на человеко-машинные системы (например, САПР, экспертные системы, дистанционное обучение и т.п.), где результат работы системы существенно зависит от интеллектуального и эмоционального уровня развития человека-оператора.

Список литературы

1. **Крысько, В. Г.** Психология и педагогика в схемах и таблицах / В. Г. Крысько. – Минск : Харвест, 1999. – 384 с.
2. **Успенский, П. Д.** Четвертый путь / П. Д. Успенский. – М. : Фаир-Пресс, 2005. – 640 с.
3. **Люгер, Д.** Искусственный интеллект / Д. Люгер. – М. : Мир, 2003. – 690 с.
4. Патент РФ № 2038819. Способ Андреева А. О. развития интеллектуальных способностей человека и устройство для его осуществления / А. О. Андреев; опубл. 10.09.1996.
5. Патент РФ № 2238765. Способ оздоровления и сопряженного взаимозависимого развития физических и интеллектуальных способностей человека и устройство для его осуществления / Черкесов Ю. Т., Афанасенко В. В., Кураев Г. А., Харенко С. А., Давыдов Ю. В., Черкесов Т. Ю., Козлов С. И.; заявл. 26.03.2001 ; опубл. 27.10.2004.
6. Патент РФ на полезную модель № 82365. Устройство для развития личности человека / Калина Л. С. Калинин В. Б.; заявл. 03.10.2008 ; опубл. 20.07.2009.
7. Патент РФ на полезную модель № 66831. Нейронная сеть / Кабак И. С., Суханова Н. В.; приоритет 02.04.2007 ; опубл. 27.09.2007, Бюл. № 27.
8. Патент РФ на полезную модель № 72084. Доменная нейронная сеть / Кабак И. С., Суханова Н. В.; приоритет 03.12.2007 ; опубл. 27.03.2008, Бюл. № 9.
9. Патент РФ на полезную модель № 75247. Модульная вычислительная система / Кабак И. С., Суханова Н. В.; приоритет 26.12.2008 ; опубл. 27.07.2008, Бюл. № 21.

References

1. Krysko V. G. *Psikhologiya i pedagogika v skhemakh i tablitsakh* [Psychology and pedagogy in schemes and tables]. Minsk: Kharvest, 1999, 384 p.
2. Uspenskiy P. D. *Chetvertyy put'* [Fourth way]. Moscow: Fair-Press, 2005, 640 p.
3. Lyuger D. *Iskusstvennyy intellekt* [Artificial intelligence]. Moscow: Mir, 2003, 690 p.
4. Patent Russian Federation No. 2038819. A. O. Andreev's way of human's intellectual abilities development and device for implementation thereof. Publ. 10 September 1996.
5. Patent Russian Federation No. 2238765. Method of health improvement and conjugated interconnected development of human's physical and intellectual abilities and device for implementation thereof. Cherkesov Yu. T., Afanasenko V. V., Kuraev G. A., Kharenko S. A., Davydov Yu. V., Cherkesov T. Yu., Kozlov S. I.; appl. 26 January 2001; publ. 27 October 2004.
6. Useful model Patent Russian Federation. No. 82365. Device for human's personality development. Kalina L. S. Kalin V. B.; appl. 3 October 2008; publ. 20 July 2009.
7. Useful model Patent Russian Federation. No. 66831. Neural network. Kabak I. S., Sukhanova N. V.; appl 2 April 2007; publ. 27 September 2007, bull. no. 27.

8. Useful model Patent Russian Federation. No. 72084. Domain neural network. Kabak I. S., Sukhanova N. V.; appl. 3 December 2007; publ. 27 March 2008, bull. no. 9.
9. Useful model Patent Russian Federation. No. 75247. Modular computing system. Kabak I. S., Sukhanova N. V.; appl. 26 December 2008; publ. 27 July 2008, bull. no. 21.

Шептунов Сергей Александрович

доктор технических наук, профессор,
директор, Институт конструкторско-
технологической информатики
Российской академии наук (Россия,
г. Москва, пер. Вадковский, 18, корп. 1А)

E-mail: ship@ikti.ru

Sheptunov Sergey Aleksandrovich

Doctor of engineering sciences, professor,
director of the Institute of engineering
and design informatics of the Russian
Academy of Sciences (building 1a,
18 Vadkovsky lane, Moscow, Russia)

Соломенцев Юрий Михайлович

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
член-корреспондент Российской
академии наук, Советник РАН,
Институт конструкторско-
технологической информатики
Российской академии наук (Россия,
г. Москва, пер. Вадковский, 18, корп. 1А)

E-mail: ship@ikti.ru

Solomentsev Yuriy Mikhaylovich

Doctor of engineering sciences, professor,
chief researcher, corresponding member
of the Russian Academy of Sciences,
RAS councillor, Institute of engineering
and design informatics of the Russian
Academy of Sciences (building 1a,
18 Vadkovsky lane, Moscow, Russia)

Кабак Илья Самуилович

кандидат технических наук, профессор,
кафедра компьютерных систем
управления, Московский
государственный технологический
университет «СТАНКИН» (Россия,
г. Москва, пер. Вадковский, 1)

E-mail: ikabak@mail.ru

Kabak Il'ya Samuilovich

Candidate of engineering sciences,
professor, sub-department of computer-
driven control systems, Moscow State
Technological University "STANKIN"
(1 Vadkovsky lane, Moscow, Russia)

Суханова Наталия Вячеславовна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра компьютерных систем
управления, Московский
государственный технологический
университет «СТАНКИН» (Россия,
г. Москва, пер. Вадковский, 1)

E-mail: n_v_sukhanova@mail.ru

Sukhanova Nataliya Vyacheslavovna

Candidate of engineering sciences,
associate professor, sub-department
of computer-driven control systems,
Moscow State Technological University
"STANKIN" (1 Vadkovsky lane,
Moscow, Russia)

Дробышева Татьяна Ивановна

директор, Лицей № 138 (Россия,
г. Москва, ул. Генерала Глаголева,
10, корп. 2)

E-mail: 138@edu.mos.ru

Drobysheva Tat'yana Ivanovna

Director, Lyceum № 138 (building 2,
10 Generala Glagoleva street,
Moscow, Russia)

УДК 004.75,004.896

Нейросетевая модель формирования и развития личности ребенка в процессе его обучения в средней школе / С. А. Шептунов, Ю. М. Соломенцев, И. С. Кабак, Н. В. Суханова, Т. И. Дробышева // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 4 (32). – С. 41–52.

А. В. Аверченков, Е. А. Леонов

АРХИТЕКТУРА И ПРИНЦИПЫ САМООБУЧЕНИЯ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ, ОСНОВАННЫХ НА ЗНАНИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОНИТОРИНГА СЕТИ ИНТЕРНЕТ

Аннотация.

Актуальность и цели. Большая часть современных интеллектуальных систем, основанных на знаниях, базируется на использовании онтологий. Качество работы таких систем во многом зависит от качества используемых онтологий – их актуальности, целостности и непротиворечивости. Составление и расширение таких онтологий является чрезвычайно трудоемким процессом, требующим максимальной автоматизации. Рассматриваются подходы к построению конструкторско-технологических экспертных систем, базирующихся на знаниях и способных наращивать собственные знания о предметной области за счет информации из сети Интернет. В рамках подхода предлагается использовать замкнутый цикл, в котором система самостоятельно обучается находить качественные документы в рамках предметной области, используя онтологию и предпочтения эксперта, а также дополняет эту онтологию знаниями, извлеченными из найденных документов.

Материалы и методы. Предлагаемый концепт системы базируется на использовании подходов к построению многоагентных систем. Для описания алгоритмов обучения подсистем метапоиска и особенностей его использования при обучении онтологий используется общая теория множеств и математика кортежей.

Результаты. Разработана концептуальная архитектура самообучающихся систем на основе знаний из сети Интернет. Предложен алгоритм обучения подсистем метапоиска с использованием активного контроля. Рассмотрены особенности применения методов обучения онтологий в рамках самообучающихся систем, взаимодействующих с Интернет через подсистемы метапоиска, а также предложена архитектура многоагентных интеллектуальных экспертных систем, основанных на знаниях из сети Интернет.

Выводы. Предлагаемые подходы позволят создавать системы, способные постоянно наращивать собственные знания, исследуя документы сети Интернет, и решать поставленные задачи с использованием актуального состояния области знания.

Ключевые слова: экспертные системы, базы знаний, расширение онтологий, мониторинг Интернет, обучение онтологий.

A. V. Averchenkov, E. A. Leonov

ARCHITECTURE AND PRINCIPLES OF SELF-LEARNING OF ENGINEERING AND DESIGN EXPERT SYSTEMS BASED ON KNOWLEDGE USING MONITORING OF INTERNET

Abstract.

Background. Most of modern intelligent systems based on knowledge use ontologies. The quality of such systems depends on the quality of the ontologies used - their relevance, integrity and consistency. Creation and extension of ontologies are

an extremely time-consuming process requiring maximum automation. The article discusses approaches to building of engineering and design expert systems based on knowledge that are capable of building their own domain knowledge using information from the Internet. Under the approach it is proposed to use the closed cycle in which the system automatically learns to find high quality documents within the domain by using ontology and preferences of the experts, as well as extends ontology by knowledge extracted from the retrieved documents.

Materials and methods. The proposed concept of the system is based on using the approaches to creation of multi-agent systems. In order to describe the learning algorithms of metasearch subsystems and features of using thereof at ontologies learning the authors used the general theory of sets and tuple mathematics.

Results. The researchers developed a conceptual architecture of self-learning systems based on knowledge taken from the Internet. The authors offered a learning algorithm for metasearch subsystems using active control and considered the application features of ontology learning methods within the self-learning systems that interact with the Internet through metasearch subsystems, as well as proposed a multi-agent architecture of intelligent expert systems based on knowledge from the Internet.

Conclusions. The proposed approach will allow to create a system that will be capable to constantly increase its own knowledge by obtaining the documents from the Internet and solve target problems by using the current actual state of a knowledge area.

Key words: expert systems, databases, extension of ontologies, monitoring of Internet, learning of ontologies.

Введение

Современные интеллектуальные системы, основанные на знаниях, имеют широкое применение в различных областях знаний. Одной из таких сфер применения являются конструкторско-технологические экспертные системы, позволяющие экспертам:

- находить оборудование и инструменты производства;
- отслеживать появление новых методов и технологий производства;
- принимать решения по разработке технологии производства изделий;
- находить типовые решения конструкторских задач;
- отслеживать рынки конкурентных производств;
- проводить маркетинговые исследования в заданной области.

Основой базы знаний таких систем являются онтологии предметной области, использование которых позволяет формализовать знания эксперта. Разработка онтологии является трудоемкой задачей, которая не может быть решена экспертом самостоятельно и для этого требуется привлечение инженера по знаниям, способного формализовать опыт эксперта и наблюдаемые прецеденты в единую жестко структурированную базу знаний. При обеспечении наибольшей объективности используемых онтологий может возникнуть необходимость в привлечении целых сообществ экспертов в рамках одной предметной области, при этом с увеличением объема онтологии возрастает сложность обеспечения ее непротиворечивости.

В связи с высокой трудоемкостью процесса создания онтологий на данный момент ведется активная разработка различных методов их автоматического формирования. В результате появилось отдельное направление ис-

следований по автоматическому расширению онтологий, получившее название «обучение онтологий». Значительная часть методов в рамках данного направления основана на использовании продукционных правил, лексических шаблонов, статистического анализа текста, а также различных методов искусственного интеллекта, а в качестве исходных данных используется текст на естественном языке.

Концепция интеллектуальных экспертных систем

Использование интеллектуальных агентов метапоиска [1] позволяет создавать гибкие механизмы наполнения предметно-ориентированных хранилищ документов. На базе данных механизмов могут быть построены системы, которые могут самостоятельно формировать поисковые задания на базе предварительно составленной онтологии. Концептуальная схема работы такой системы (рис. 1) должна иметь процедуры генерации запросов по онтологии, составленной экспертом, после чего эти запросы должны быть отправлены сторонним универсальным поисковым системам, а для каждого документа, полученного от них, должна быть произведена оценка его качества. Информативные документы, имеющие высокую степень близости с заданной предметной областью, должны заноситься в хранилище документов, которое может быть использовано для построения различных представлений информации, содержащейся в документах, а также для обнаружения новых знаний и пополнения имеющейся онтологии.

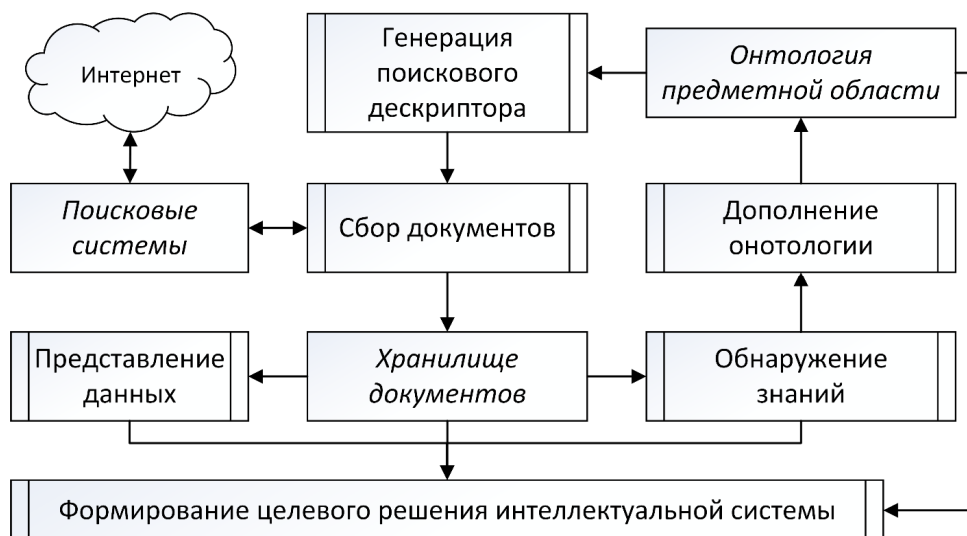


Рис. 1. Концептуальная архитектура предлагаемой системы, основанной на знаниях из Интернет

Система, построенная по предложенному принципу, сможет постоянно накапливать информацию, актуализируя знания о предметной области из сети Интернет, а решения, предлагаемые системой, могут выходить за рамки компетенции составителей базовой онтологии, из чего следует качественно иное использование систем подобного рода, так как они смогут не только воспроизводить имеющиеся знания эксперта-разработчика, но и самостоятельно

обучаться новым знаниям, используя информацию из сети Интернет. Рассмотрим более детально отдельные процедуры представленной концепции.

Самообучающийся алгоритм метапоиска с использованием активного контроля

В целях повышения качества собираемых документов предлагается ввести самообучающийся алгоритм метапоиска с обратной связью. Для формирования запроса к внешней универсальной поисковой системе используется база продукционных правил, исходными данными для которых являются узлы и связи онтологии.

Упрощенно онтологию можно представить в виде графа, описываемого следующим кортежем:

$$O = \langle E, R, I \rangle, \quad (1)$$

где E – множество сущностей (узлов) онтологии; R – множество связей между понятиями; I – соответственно предикат инцидентности между узлом и связью,

$$I(e, r) = \{0, 1\}, \quad e \in E, \quad r \in R. \quad (2)$$

При этом каждая связь может характеризоваться целым набором свойств, служащих для выражения семантики связи, полный перечень которых определяется в зависимости от типа интеллектуальной системы и методов формирования целевого вывода в ней. Таким образом, связь может быть представлена следующим образом:

$$r = \{t, P, l, w, f, c\}, \quad (3)$$

где t – тип связи; P – множество свойств связи, служащих для продукции целевого вывода системы; l – лексический эквивалент, который может быть использован при генерации запроса; w – вес связи; f – вероятность наличия связи; c – сочетаемость свойства ($c \in N$), по сути, характеризует максимальную мощность для связи данного типа.

Продукционные правила, используемые для генерации поисковых запросов, могут иметь следующий общий вид:

$$p_Q = \{S(r), L(P_{\text{вх}}, i), A: e, r \rightarrow Q_s, Q(Q_s, T_c(c))\}, \quad (4)$$

где p_Q – идентификатор продукционного правила для рассматриваемого подграфа онтологии O ; $S(r)$ – класс связи r , для которого может быть применено правило; $L(P_{\text{вх}}, i)$ – предикат активации правила, определяющий, имеется ли связь между рассматриваемыми узлами и удовлетворяют ли они заданным условиям $P_{\text{вх}}$; $A: e, r \rightarrow Q_s$ – ядро продукции, в котором производится перевод рассматриваемых узлов e и r в часть запроса Q_s ; $Q(Q_s, T_c(c))$ – постусловие, в котором производится внедрение подзапроса Q_s в общий запрос Q .

Условия активации правила зависят от заданных для него значений $P_{\text{вх}}$, которые содержат следующие элементы:

$$P_{\text{вх}} = \{E_n, T_n, w, f, T_c(c)\}, \quad (5)$$

где E_n – множество типов сущностей, для которых может быть активировано правило; T_n – множество типов связей, которыми должны быть связаны сущности; w – пороговое значение веса семантической связи для активации правила; f – пороговое значение вероятности существования связи; $T_c(c)$ – тип сочетаемости связи ($T_c(1) = 1 \vee T_c(x) = 0 \wedge c \neq 1$, 0 – множественная, 1 – уникальная). При этом для каждого типа сочетаемости используются свои продукционные правила, а также от этого параметра зависит способ внедрения полученного подзапроса в общий запрос и тип операции языка поисковой системы. Таким образом, при генерации запросов к поисковым системам участвуют лишь те узлы, которые с высокой вероятностью связаны между собой и при этом имеют сильную семантическую связь.

Каждое правило генерирует множество подзапросов из соответствующих ему узлов и связей

$$p_Q = O_s \rightarrow Q_s. \quad (6)$$

Сочетая данные подзапросы между собой, можно построить более сложные и точные запросы к поисковой системе. При объединении подзапросов с помощью функции $Q(Q_s, T_c(c))$ запрос уточняется, если связь является уникальной, а также область поиска будет расширена при дополнении запроса на базе множественной связи. Глубина совершаемого вывода, а также тип связей, используемых при общем выводе запроса, зависит от результатов, полученных от поисковой системы.

Каждый полученный подзапрос пересылается поисковой системе, в результате будет получено множество документов с заданной глубиной выборки. Для каждого полученного документа на основании заданных экспертом предпочтений производится оценка его информативности и степени близости к предметной области [2]. Для этого предварительно осуществляется выявление семантически значимой части документа, а также перевод его в текст на естественном языке [3]. После чего рассчитываются критерии, необходимые для определения качества документа. В случае, если качество ниже указанного экспертом порога, то такой запрос и правило должны быть исправлены. Для этого на первом этапе определяется характер ошибки и порядок действий по исправлению правила.

После определения характера возникшей ошибки определяется ее сила воздействия на полученный результат. Так, в случае критического смещения от ожидаемого результата правило может быть полностью отклонено, признано не применимым для данного типа онтологий. В зависимости от характера возникающей ошибки правило может не исправляться и применяться лишь над другой областью онтологии.

Особенности применения методов обучения онтологий

Для обнаружения знаний в документах на естественном языке наиболее целесообразным видится применение шаблонов в связи с возможностью вторичного использования синтаксических шаблонов для обратной конвертации

узлов онтологий в поисковые запросы с целью расширения онтологий для несвязанных узлов.

Так, если у нас имеется шаблон, использующий для обнаружения определенной структуру лексических единиц L , то упрощенно правило можно представить как функцию преобразования участка текста в часть графа онтологии:

$$P: L, w_1, w_2 \rightarrow r, e_1, e_2, \quad (7)$$

где P лексико-семантический шаблон; L – множество константных лексем, используемых для обнаружения связи r ; w_1, w_2 – слова текста, попадающие под шаблон, от которых образуются концепты онтологии e_1, e_2 . Таким образом, можно сказать, что множество лексем L характеризует связь r между концептами e_1 и e_2 , которые представлены в тексте словами w_1 и w_2 соответственно. Тогда в случае, если в онтологии имеется узел e_1 , для которого нет установленных связей или имеется необходимость расширить имеющиеся связи, можно построить продукционное правило для построения запроса с использованием слов, которыми представлен концепт онтологии и лексем, характеризующих связь:

$$p_Q(e_1, \{L, t\}) = \{S, L(P_{\text{вх}}, i), A: e_1, r \rightarrow Q_s \ni \{e_1, L\}, Q\}, e_1 \in O \wedge r \notin O, \quad (8)$$

где $\{L, t\}$ – связанная пара множества лексем и типа искомой связи, которые они характеризуют ($t \in r$); O – онтология предметной области.

При этом функция поиска, использующая данный запрос, может с высокой вероятностью возвращать документы, содержащие участки текста, соответствующие заданному шаблону P :

$$F_{SE}: Q_s \rightarrow D \ni \{L, w_1, w_2\} \in P.$$

Тогда, так как $F_{SE}: p_Q(e_1, \{L, t\}) \rightarrow \{L, w_1, w_2\} \in P \rightarrow \{r, e_1, e_2\} \in O$, то, сопоставив с каждым типом связи набор характеризующих их лексем $\{L, t\}$, на основе правил P можно с высокой степенью вероятности дополнить именно интересующую часть онтологии.

Данный метод может быть использован для повышения коэффициента, характеризующего вероятность наличия связи или опровержения имеющейся связи при разрешении противоречивости онтологии.

Архитектура интеллектуальных агентов, основанных на данных из сети Интернет

На базе предложенной концепции интеллектуальных систем могут быть построены программные комплексы, имеющие различную архитектуру. Для построения предметно-ориентированных аналитических систем, основанных на знаниях из сети Интернет, предлагается использовать многоагентную [4] архитектуру (рис. 2).

Исходными данными для работы системы являются: первичное описание источников информации; настройки пользователя и параметры системы;

цифровой образ пользователя; первичная онтология предметной области, которая в дальнейшем должна быть расширена. Основным средством управления агентами является главный агент координации. В его задачи входит формирование заданий для других агентов и их групп, распределение нагрузки между отдельными узлами системы, разрешение конфликтов, балансировка между отдельными стадиями обработки документов для формирования равномерного процесса анализа и поддержания необходимого объема хранилища данных.

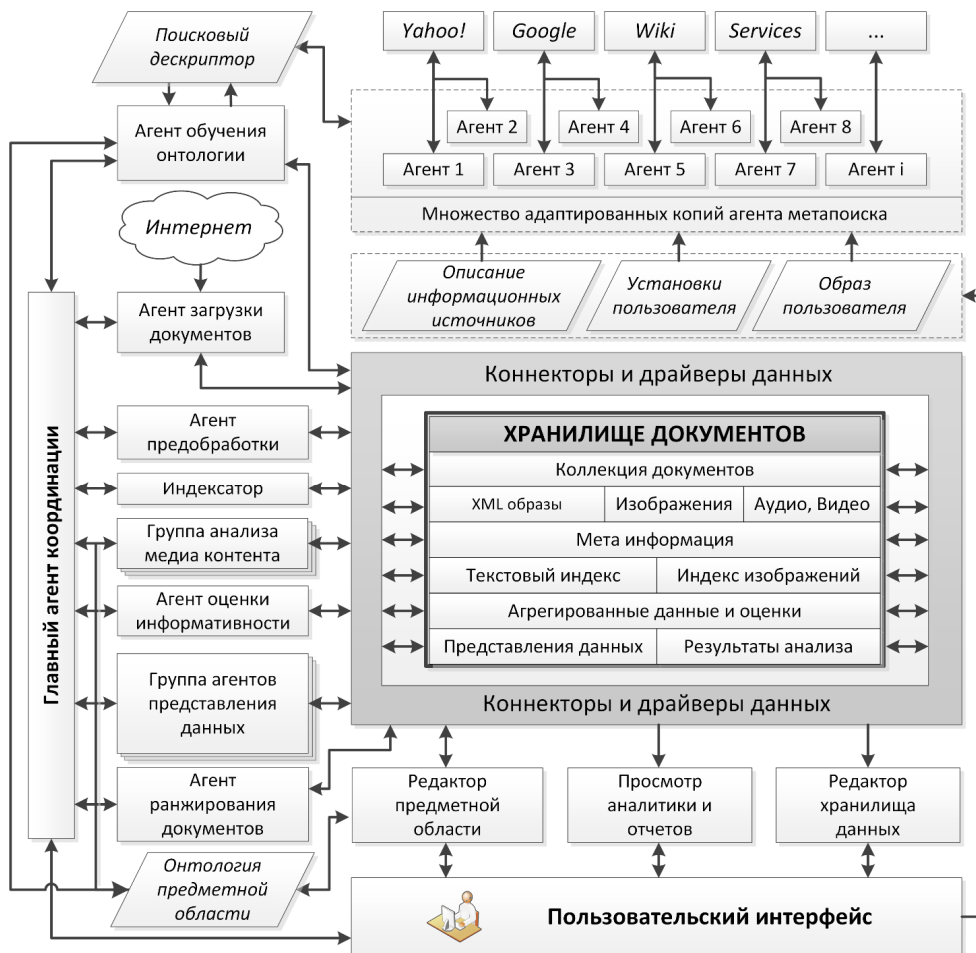


Рис. 2. Архитектура интеллектуальных экспертных систем, основанных на знаниях из сети Интернет

Основным узлом является агент обучения онтологий, в его задачи входит формирование поискового задания на базе имеющейся онтологии, формирование запросов на анализ и оценку полученных документов, а также собственно само пополнение онтологии на базе документов, имеющих высокие оценки качества. В архитектуру системы также может входить значительное количество автономных агентов, осуществляющих различные стадии обработки и анализа содержимого документа, а также формирующих целевые выводы в случае соответствующих систем или систем поддержки принятия

решений или агенты формирования аналитических отчетов и представления данных для аналитических систем. Также к таким агентам могут быть отнесены: агенты конвертирования форматов данных, выделения семантически значимой части из веб-документов, агенты формирования текста на естественном языке, агенты анализа медиаконтента, агенты оценки информативности документов и другие ранжирующие агенты. Часть данных агентов может использовать информацию о предметной области, накопленную в онтологии.

Все агенты, имеющиеся в системе, не должны иметь прямой доступ к хранилищу данных, так как все производимые в нем изменения должны быть согласованы между собой. Для этого могут быть использованы специально разработанные драйверы, коннекторы представления данных, а также брандмауэры для контроля доступа.

Заключение

Предложена концепция конструкторско-технологических экспертных и интеллектуальных систем, основанных на знаниях и использующих в качестве основного источника информации сеть Интернет, которые используют для хранения знаний специальные предметно-ориентированные онтологии. В соответствии с предложенной концепцией такие системы могут автоматически накапливать собственные знания, используя механизмы, основанные на применении интеллектуальных агентов метапоиска, задания для которых должны автоматически генерироваться на базе уже имеющейся онтологии, которая в свою очередь также должна обогащаться за счет знаний, имеющихся в найденных документах. Такой замкнутый цикл позволит постоянно в автоматическом режиме актуализировать знания системы о предметной области и соответственно обеспечивать высокое качество решения целевых задач.

Предложенная архитектура и концепция построения самообучающихся систем, основанных на знаниях, является одним из шагов на пути создания автономных самообучающихся интеллектуальных систем, использование которых позволит решать задачи по поддержке принятий решений при разработке конструкторских и технологических решений, а также выборе управленческих решений в области машиностроения, используя при этом знания, накапливаемые человечеством в сети Интернет, охватить которые не способен ни один эксперт предметной области.

Список литературы

1. **Аверченков, В. И.** Математическая модель универсальной многоагентной подсистемы метапоиска / В. И. Аверченков // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2011. – № 2 (30). – С. 101–110.
2. **Аверченков, В. И.** Формализация процесса мониторинга информации в сети Интернет при создании предметно-ориентированных хранилищ данных / В. И. Аверченков, А. В. Аверченков, Е. А. Леонов // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2012. – № 1. – С. 38–45.
3. **Аверченков, А. В.** Анализ структуры веб-документов с целью выявления уникальной семантически значимой информации в рамках задач информационного поиска / А. В. Аверченков, Е. А. Леонов // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2011. – № 11 (84). – С. 30–35.

4. **Niazi, M.** Agent-based computing from multi-agent systems to agent-based models: a visual survey / M. Niazi, A. Hussain // *Scientometrics*. – 2011. – Vol. 89, Issue 2. – P. 479–499.

References

1. Averchenkov V. I. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Bryansk State Technical University]. 2011, no. 2 (30), pp. 101–110.
2. Averchenkov V. I., Averchenkov A. V., Leonov E. A. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy* [Bulletin of computing and information technologies]. 2012, no. 1, pp. 38–45.
3. Averchenkov A. V., Leonov E. A. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Volgograd State Technical University]. 2011, no. 11 (84), pp. 30–35.
4. Niazi M., Hussain A. *Scientometrics*. 2011, vol. 89, iss. 2, pp. 479–499.

Аверченков Андрей Владимирович

доктор технических наук, доцент,
старший научный сотрудник, Институт
конструкторско-технологической
информатики Российской академии наук
(Россия, г. Москва, пер. Вадковский,
18, корп. 1А)

E-mail: mahar@mail.com

Averchenkov Andrey Vladimirovich

Doctor of engineering sciences, associate
professor, senior staff scientist, Institute
of engineering and design informatics
of the Russian Academy of Sciences
(building 1a, 18 Vadkovsky lane,
Moscow, Russia)

Леонов Евгений Алексеевич

кандидат технических наук, старший
научный сотрудник, Институт
конструкторско-технологической
информатики Российской академии наук
(Россия, г. Москва, пер. Вадковский,
18, корп. 1А)

E-mail: johnleonov@gmail.com

Leonov Evgeniy Alekseevich

Candidate of engineering sciences, senior
staff scientist, Institute of engineering
and design informatics of the Russian
Academy of Sciences (building 1a,
18 Vadkovsky lane, Moscow, Russia)

УДК 004.93'12

Аверченков, А. В.

Архитектура и принципы самообучения конструкторско-технологических экспертных систем, основанных на знаниях с использованием мониторинга сети Интернет / А. В. Аверченков, Е. А. Леонов // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. – 2014. – № 4 (32). – С. 53–61.

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

УДК 629.7.072.8

А. В. Пинишин, Н. В. Мясникова, В. Н. Пинишин

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ И КАЧЕСТВА ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМ СТЕНДОМ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования являются системы подвижности авиационного тренажера. Предметом исследования являются передаточные функции гидроприводов динамического стенда. Цель работы – обеспечение равенства передаточных функций гидроприводов динамического стенда, их частотных характеристик и переходных процессов при любых статических и динамических изменениях неуравновешенности нагрузки.

Материалы и методы. Исследования системы подвижности авиационного тренажера выполнялись путем анализа контура регулирования с применением имитационного моделирования.

Результаты. Введение вычислителя системы подвижности обеспечивает идентичность передаточных функций гидроприводов, равенство и апериодический характер переходных процессов.

Выводы. За счет введения коррекции по скорости, ускорению или дифференциалу ошибки повышается точность отработки задаваемых параметров движения подвижной платформы, устраняются фоновые движения, улучшается качество воспроизведения динамическим стендом управляющих воздействий и, соответственно, увеличиваются обучающие возможности тренажера в целом.

Ключевые слова: авиационный тренажер, система подвижности, динамический стенд, гидропривод, следящая система, неуравновешенность, частотные характеристики, переходной процесс.

A. V. Pinishin, N. V. Myasnikova, V. N. Pinishin

IMPROVING PLAYBACK ACCURACY AND QUALITY OF A DYNAMIC CONTROL ACTIONS STAND

Abstract.

Background. The research object is the system of mobility of an aircraft simulator. The research subjects are the transfer functions of a dynamic hydraulic stand. The objective is to ensure equality between the transfer functions of a dynamic hydraulic stand, their frequency characteristics and transients under all static and dynamic changes of load unbalance.

Materials and methods. The research of the mobility system of an aircraft simulator was performed by analyzing the control loop using simulation modeling.

Results. The introduction of a computer motion system ensures identity of the transfer functions of hydraulic actuators, equality and aperiodic nature of the transients.

Conclusions. Introduction of velocity, acceleration or error differential correction enhances the accuracy of the set motion parameters' adjustment of the moving platform, eliminates background traffic, improves the quality of dynamic stand's control actions and, accordingly, increases the learning opportunities of a simulator in whole.

Key words: aircraft simulator, mobility system, dynamic stand, hydraulic actuator, monitoring system, unbalance, frequency characteristic, transient.

Введение

В настоящее время достигнутый уровень технического совершенства систем подвижности (СП) практически снял вопросы о целесообразности ее использование в комплексных авиационных тренажерах.

Установлено, что СП позволяет естественным образом приближать психофизиологическое состояние тренирующегося к присущему реальному полету, что особенно необходимо в освоении техники пилотирования реальным воздушным судном (самолетом, вертолетом). Особенно важно, что физические ощущения являются первым во времени сигналом для пилота о реакции самолета или вертолета на изменение положения органов управления, а следовательно, это и первый сигнал к оценке необходимости изменения этого воздействия. Далее пилот дополнительно оценивает изменение положения летательного аппарата – по изменению видимого через остекления кабины изображения местности, а еще позднее пилот видит изменение показания приборов, характеризующих изменение скорости, высоты, угловых положений и т.д. Только правильная имитация на тренажере совокупности всей этой информации (в том числе и во времени) обеспечивает получение обучаемым правильных навыков пилотирования.

Улучшение качества воспроизведения акселерационной информации зависит в первую очередь от точности и синхронности работы гидроприводов динамического стенда СП, представляющих собой следящие системы. Поскольку в отработке сигнала перемещения по каждой степени свободы и их сочетании участвуют все гидроцилиндры, то в случае неточного отслеживания задаваемых входных сигналов возникают паразитные смещения по другим степеням свободы. В результате у тренирующегося экипажа возникают ложные ощущения, препятствующие привитию правильных навыков пилотирования реальным воздушным судном.

Кинематическая схема динамического стенда, перемещающего кабину авиационного тренажера в пространстве по шести (трем угловым и трем линейным) степеням свободы, приведена на рис. 1.

Динамический стенд с шестью степенями свободы состоит из платформы 1, на которой располагается полезная нагрузка (кабина авиационного тренажера), и нескольких одинаковых следящих гидроприводов по количеству силовых гидроцилиндров 2, штоки которых с помощью верхних шарниров 3 попарно присоединены к платформе, а корпуса гидроцилиндров через нижние шарниры 4 прикреплены к фундаменту 5. Каждый гидропривод состоит из последовательно соединенных элементов – датчика положения штока гид-

роцилиндра, сумматора, усилителя мощности, гидроусилителя и силового гидроцилиндра.

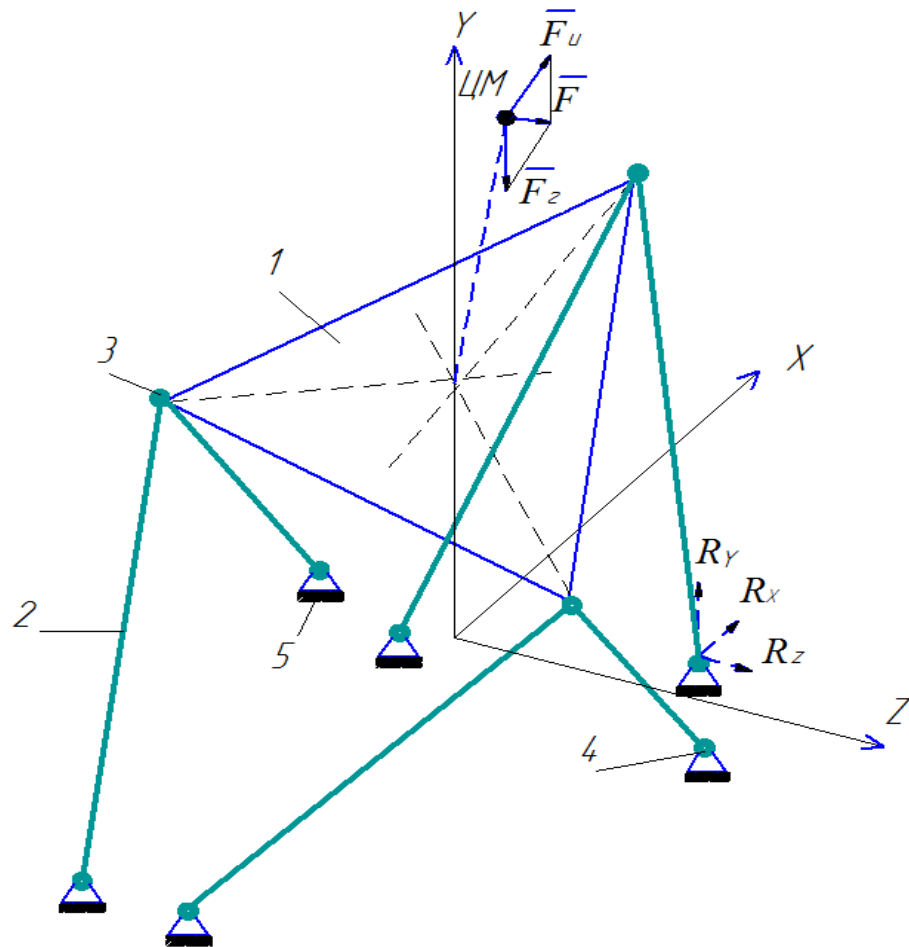


Рис. 1. Кинематическая схема динамического стенда

Поэтому одним из главных условий качественной работы комплекса следящих гидроприводов динамического стенда является высокое качество регулирования, точность и синхронность их работы, что обеспечивается равенством частотных характеристик гидроприводов и их реакций на управляющие и возмущающие воздействия за счет введения корректирующих устройств. При этом требуется не только равенство переходных процессов гидроприводов, но и апериодический характер их протекания с высоким качеством регулирования для исключения возможности появления переходных процессов с перерегулированием и автоколебаниями, а также излишней длительности их протекания при скачках управляющего воздействия вверх и вниз для каждого гидропривода.

Выполнение этих условий осложняется тем, что каждый гидропривод динамического стенда находится под воздействием существенной неуравновешенности, обусловленной весом платформы с кабиной тренажера, приходящимися на каждый силовой гидроцилиндр. При имитации движений ре-

ального воздушного судна неуравновешенность, воздействующая на каждый силовой гидроцилиндр, постоянно меняется в зависимости от угловых положений платформы динамического стенда и ее линейных перемещений в горизонтальной плоскости.

Для улучшения частотных характеристик следящих приводов и выравнивания параметров переходных процессов при движении штоков силовых гидроцилиндров в структуру каждого гидропривода вводят коррекцию по скорости, ускорению или дифференциалу ошибки. Чем больше коэффициенты передачи контуров обратных связей по скорости и ускорению, тем меньше разница в переходных процессах. Технические решения, частично обеспечивающие выполнение этих условий, использовались в динамических стендах комплексных тренажеров самолетов ТУ-204¹ и ИЛ-96-300². Однако невысокое качество регулирования и ограничения, накладываемые условиями устойчивости контуров привода, не позволяли обеспечить такие коэффициенты передачи контуров следящей системы, которые позволили бы полностью уравнивать переходные процессы и придать им апериодический характер протекания при движении штоков силовых гидроцилиндров вверх и вниз.

Более существенную компенсацию влияния действующей на шток каждого силового гидроцилиндра неуравновешенности, обусловленной весом платформы с кабиной тренажера, удалось получить в динамическом стенде нового поколения ДС6-1НП [1, 2] по сравнению с динамическими стендами ТУ-204, ИЛ-96-300, что позволило заметно выровнять переходные процессы гидроприводов. Устройство компенсации действующей на гидроцилиндр неуравновешенности, присутствующее в структуре каждого гидропривода, производит увеличение или уменьшение коэффициента усиления гидропривода в зависимости от взаимного положения силовых гидроцилиндров в пространстве и по сигналу вычислительного устройства каждого гидропривода, учитывающего изменение момента неуравновешенности, действующего на данный гидропривод. Однако в динамическом стенде ДС6-1НП при выравнивании переходных процессов следящих гидроприводов при их движении по и против неуравновешенности учитываются лишь текущие положения штоков гидроцилиндров, без учета величины и направления их векторов скоростей и ускорений и не обеспечивается необходимого качества регулирования. Вследствие этого даже при относительном равенстве переходных процессов следящих гидроприводов возможно и перерегулирование с автоколебаниями, и необоснованно большая длительность переходных процессов. Такое движение штоков силовых гидроцилиндров приводит либо к паразитному «раскачиванию» платформы с кабиной тренажера, либо к запаздываниям в обработке управляющих сигналов, в результате у тренирующегося экипажа возникают неадекватные ощущения, препятствующие привитию правильных навыков пилотирования.

Поэтому решение задач достижения равенства передаточных функций гидроприводов, их частотных характеристик и переходных процессов с апериодическим характером протекания при любых статических и динамических изменениях неуравновешенности нагрузки на каждый гидропривод динами-

¹ КТС ТУ-204, Техническое описание, ПКБМ, г. Пенза.

² КТС ИЛ-96-300, Техническое описание, ПКБМ, г. Пенза.

ческого стенда СП при любых перемещениях кабины авиационного тренажера позволит значительно повысить точность и качество воспроизведения акселерационной информации.

Качественные параметры каждого гидропривода определяются как функция входящих в него составляющих: гидроцилиндра, гидроусилителя, датчиков, элементов электрической схемы управления и т.д. Все перечисленные звенья имеют неизменяемую в процессе работы передаточную функцию, и только гидроцилиндр имеет передаточную функцию $W_{\text{гц}}(p)$, изменяющуюся в зависимости от текущего положения его в пространстве, неуравновешенности нагрузки, действующей на него и параметров движения его штока:

$$W_{\text{гц}}(p) = \frac{k_{\text{гц}}}{p(T_{\text{г}} T_{\text{м}} p^2 + T_{\text{м}} p + 1)}, \quad (1)$$

или

$$W_{\text{гц}}(p) = \frac{k_{\text{гц}}}{p(\tau^2 p^2 + 2\xi p + 1)},$$

где $k_{\text{гц}}$ – коэффициент усиления гидроцилиндра; $\tau = \sqrt{T_{\text{г}} T_{\text{м}}}$ – обобщенная постоянная времени; $\xi = \frac{T_{\text{м}}}{2\sqrt{T_{\text{г}} T_{\text{м}}}}$ – коэффициент затухания; p – оператор Лапласа; $T_{\text{г}}$ – гидравлическая постоянная времени; $T_{\text{м}}$ – механическая постоянная времени.

При этом $T_{\text{г}} = \text{const}$, так как зависит от неизменяющихся величин – объемного модуля упругости рабочей жидкости, ее объема и т.п.

Механическая постоянная времени определяется по формуле

$$T_{\text{м}} = \frac{R_i r_{\text{ж}}}{g F_{\text{п}}}, \quad (2)$$

где $R_i = \text{var}$ – реакция i -го нижнего шарнира; $r_{\text{ж}} = \text{const}$ – приведенное значение утечек рабочей жидкости; $F_{\text{п}} = \text{const}$ – площадь поршня гидроцилиндра; $g = \text{const}$ – ускорение свободного падения.

Таким образом, для компенсации несинхронностей, действующих на каждый силовой гидроцилиндр, необходимо в реальном масштабе времени определять возникающие фактические значения реакций R_i нижних шарниров, которые зависят от величины и направления суммарного усилия $\bar{F}$, приложенного к центру масс (ЦМ) (рис. 1) и представляющего собой геометрическую сумму:

$$\bar{F} = \bar{F}_{\text{и}} + \bar{F}_{\text{г}},$$

где $\bar{F}_{\text{и}} = m \bar{a}_{\text{и}} = \text{var}$ – инерциальная сила, $\bar{a}_{\text{и}} = \text{var}$ – ускорение, действующее в ЦМ, $\bar{F}_{\text{г}} = m \bar{g} = \text{const}$ – гравитационная сила тяжести; g – ускорение свободного падения, $\bar{F} = m(\bar{a}_{\text{и}} + \bar{g})$.

Решения обозначенных выше проблем удалось добиться введением в динамический стенд, структурная схема которого приведена на рис. 2, последовательно соединенных блока констант, вычислительного устройства, блока частотных характеристик, а в каждый гидропривод – регулируемого узла коррекции.

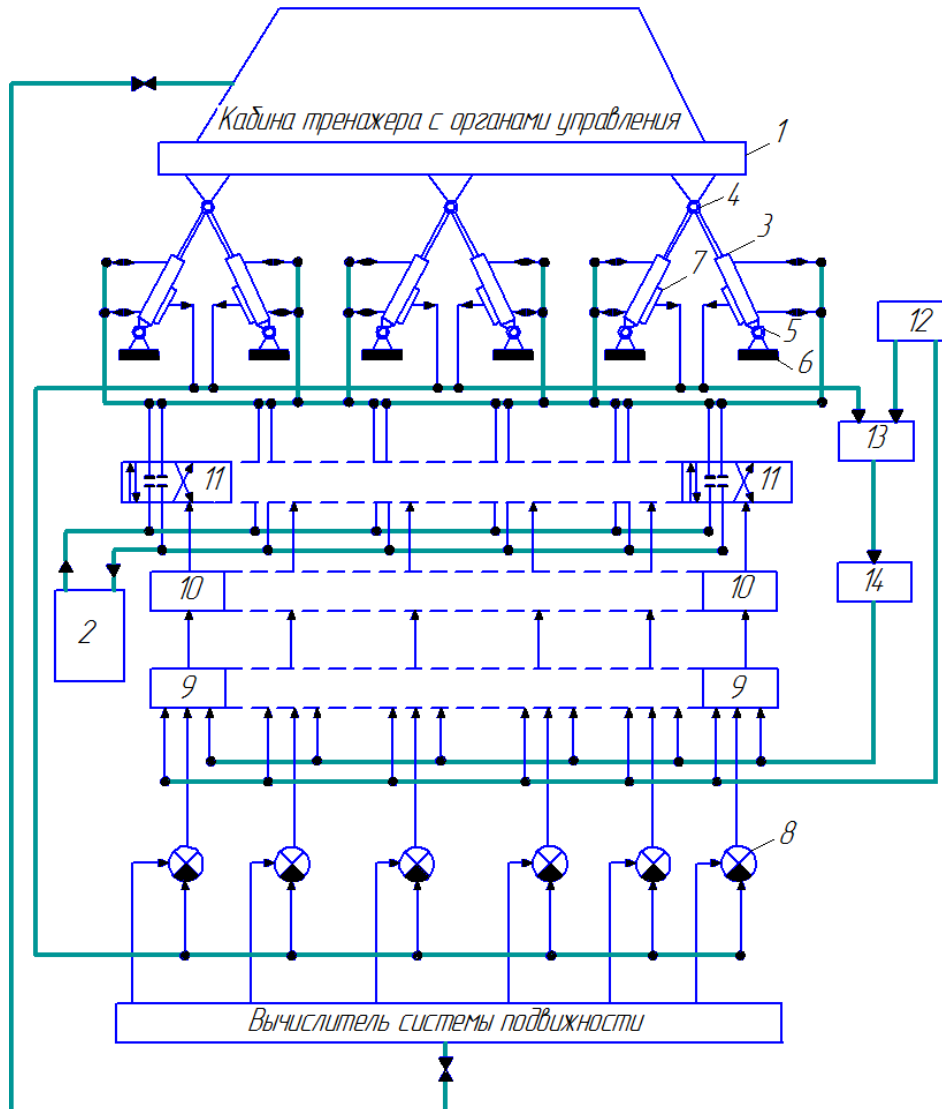


Рис. 2. Структурная схема динамического стенда

Динамический стенд, структурная схема которого приведена на рис. 2, содержит подвижную платформу 1, источник гидроснабжения 2 и несколько одинаковых следящих гидроприводов по количеству силовых гидроцилиндров 3, штоки которых с помощью верхних шарниров 4 попарно присоединены к платформе 1, а корпуса гидроцилиндров 3 через нижние шарниры 5 прикреплены к фундаменту 6. Каждый гидропривод состоит из последовательно соединенных датчика 7 положения штока гидроцилиндра 3, сумматора

ра 8, регулируемого узла коррекции 9, усилителя мощности 10, гидроусилителя 11 и силового гидроцилиндра 3. В состав динамического стенда также входят последовательно соединенные блоки – блок констант 12, вычислительное устройство 13 и блок частотных характеристик 14.

При перемещении подвижной платформы динамического стенда в каждый момент времени с блока констант 12 на соответствующие входы вычислительного устройства 13 поступают значения координат нижних шарниров 5 и расстояний между верхними шарнирами 4, а на остальные входы – текущие значения сигналов с датчиков 7 положения штоков гидроцилиндров 3. Вычислительное устройство 13 вычисляет фактическое положение гидроцилиндров 3 и положение подвижной платформы относительно начальной системы координат, а также линейные и угловые ускорения верхних шарниров 4 и величины реакций нижних шарниров 5. Вычисленные параметры с выхода вычислительного устройства 13 поступают на входы блока частотных характеристик 14, моделирующего имеющиеся амплитудные и фазовые частотные характеристики каждого гидропривода в реальном масштабе времени, которые с его выходов поступают на соответствующий вход регулируемого узла коррекции 9 каждого гидропривода. При этом на другой вход каждого регулируемого узла коррекции 9 поступают с выхода блока констант 12 желаемые амплитудно-фазовые частотные характеристики. По результатам сравнения параметров имеющейся и желаемой амплитудно-фазовых частотных характеристик соответствующего гидропривода моделируются параметры (индивидуальные для каждого гидропривода) частотных характеристик регулируемого узла коррекции 9. Таким образом, вычислительное устройство 13, блок констант 12 и блок частотных характеристик 14, взаимодействуя с регулируемым узлом коррекции 9 каждого гидропривода, в каждый момент времени обеспечивают высокое качество регулирования, демпфируя «разгруженный» гидропривод и увеличивая добротность «перегруженного» гидропривода. Тем самым обеспечивается желаемая идентичность передаточных функций гидроприводов, равенство и апериодический характер переходных процессов. При этом наиболее полно учитывается влияние неуравновешенности, действующей на каждый силовой гидроцилиндр динамического стенда СП, изменяющейся в зависимости от текущего положения гидроцилиндра в пространстве, скоростей, ускорений движения его штока, определяемых по совокупности изменения величин перемещений, скоростей и ускорений штоков всех силовых гидроцилиндров с учетом направления их движения.

Результирующие частотные характеристики каждого гидропривода приобретают устойчивый вид, приведенный на рис. 3, а график переходного процесса имеет апериодический характер, идентичный для всех гидроприводов динамического стенда.

Заключение

За счет введения коррекции по скорости, ускорению или дифференциалу ошибки повышается точность отработки задаваемых параметров движения подвижной платформы, устраняются фоновые движения, улучшается качество воспроизведения динамическим стендом управляющих воздействий и, соответственно, увеличиваются обучающие возможности тренажера в целом.

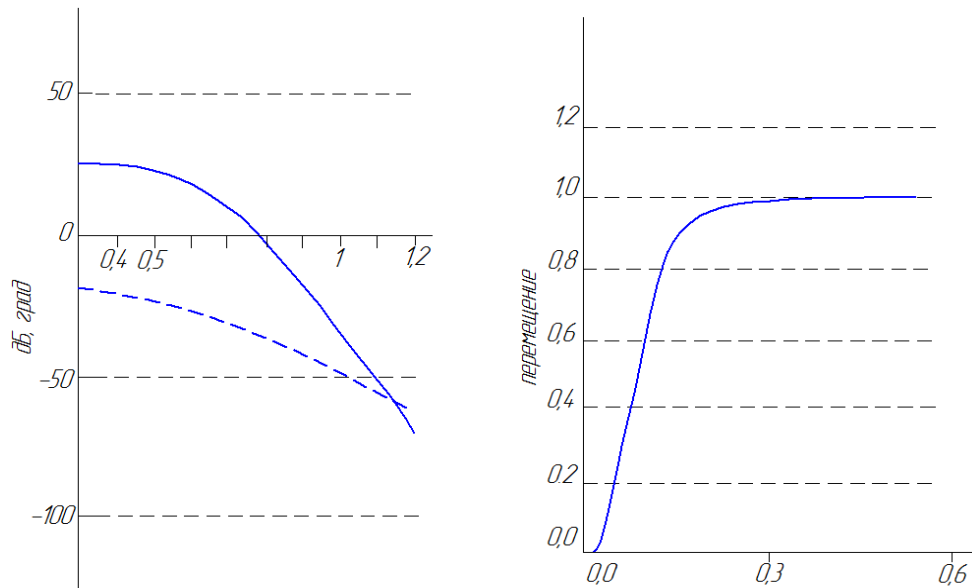


Рис. 3. Частотные характеристики и переходной процесс гидроприводов динамического стенда

Список литературы

1. Патент РФ № 2129305. G09B9/08. Динамический многостепенный стенд / Жуков А. А., Смирнов Б. А., Тимаков В. М., Федоров В. С. ; патентообл. Всероссийский научно-исследовательский институт «Сигнал». – № 96124554/06; заявл. 27.12.1996 ; опубл. 20.04.1999.
2. Патент РФ № 2259597. G09B9/08. Динамический многостепенный стенд / Адеский Л. Б., Новоселов Б. В., Смирнов Б. А., Тимаков В. М., Федоров В. С., Пинишин В. Н. ; патентообл. Открытое акционерное общество «Пензенское конструкторское бюро моделирования». – № 2004110448/28 ; заявл. 06.04.2004 ; опубл. 27.08.2005.

References

1. Patent Russian Federation No. 2129305. G09V9/08. Dynamic multiphase stand. Zhukov A. A., Smirnov B. A., Timakov V. M., Fedorov V. S.; applicant and patentee All-Russian Scientific-Research Institute "Signal". No. 96124554/06; appl. 27 December 1996; publ. 20 April 1999.
2. Patent Russian Federation No. 2259597. G09V9/08. Dynamic multiphase stand. Adesskiy L. B., Novoselov B. V., Smirnov B. A., Timakov V. M., Fedorov V. S., Pinishin V. N.; Public company "Penza simulation design and engineering center". No. 2004110448/28; appl. 6 April 2004; publ. 27 August 2005.

Пинишин Алексей Владимирович
аспирант, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: avitel@pnzgu.ru

Pinishin Aleksey Vladimirovich
Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Мясникова Нина Владимировна

доктор технических наук, профессор,
кафедра автоматизации и телемеханики,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: superlobzik@ya.ru

Myasnikova Nina Vladimirovna

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of automation
and remote control, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Пинишин Владимир Николаевич

пенсионер, бывший сотрудник
ОАО «Пензенское конструкторское
бюро моделирования» (Россия, г. Пенза,
ул. Гоголя, 60)

E-mail: avitel@pnzgu.ru

Pinishin Vladimir Nikolaevich

Retired employee of the Public company
“Penza simulation design and engineering
center” (60 Gogolya street, Penza, Russia)

УДК 629.7.072.8

Пинишин, А. В.

**Повышение точности и качества воспроизведения динамическим
стендом управляющих воздействий / А. В. Пинишин, Н. В. Мясникова,
В. Н. Пинишин // Известия высших учебных заведений. Поволжский реги-
он. Технические науки. – 2014. – № 4 (32). – С. 62–70.**

И. В. Гринь, Р. А. Ершов, О. А. Морозов, В. Р. Фидельман

ОЦЕНКА КООРДИНАТ ИСТОЧНИКА РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ЛИНЕАРИЗОВАННОЙ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНОГО МЕТОДА¹

Аннотация.

Актуальность и цели. Одним из наиболее распространенных методов определения координат источника радиоизлучения в пассивных системах местоопределения является разностно-дальномерный метод. В качестве навигационного параметра разностно-дальномерного метода используется разность расстояний от источника до разнесенных в пространстве синхронизированных приемников, определяемая по взаимной временной задержке принятых сигналов. Определение координат источника излучения производится на основе решения системы нелинейных уравнений и требует значительных вычислительных затрат. Применение разностно-дальномерного метода в спутниковых системах местоопределения связано с необходимостью измерения навигационных параметров в условиях изменения частотных характеристик принятых сигналов вследствие влияния эффекта Доплера, возникающего при распространении сигнала в спутниковой системе, и низкого отношения сигнал/шум. Основной целью работы является повышение вычислительной эффективности метода определения координат источника радиоизлучения разностно-дальномерным методом, что достигается за счет начальной оценки координат, полученной из решения линеаризованной системы уравнений, и применения вычислительно эффективного алгоритма определения взаимных временных задержек принятых сигналов при наличии доплеровского смещения спектров сигналов в условиях низкого отношения сигнал/шум.

Материалы и методы. Результаты, представленные в работе, получены путем компьютерного моделирования обработки сигналов в пассивной спутниковой системе местоопределения источника излучения на процессорах общего назначения и с использованием технологии распараллеливания вычислений на графических процессорах.

Результаты. Разработан алгоритм местоопределения источника излучения, использующий начальную оценку координат источника на основе решения линеаризованных уравнений разностно-дальномерного метода для применения в спутниковой системе местоопределения. Исследованы характеристики предложенного алгоритма.

Выводы. Показано, что при использовании предложенного подхода достигается значительный прирост производительности расчета координат источника радиоизлучения. Важной особенностью предложенного алгоритма является возможность его использования при обнаружении и определении местоположения источников радиоизлучения в режиме реального времени.

Ключевые слова: разностно-дальномерный метод, взаимная временная задержка, определение координат.

¹ Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки России образовательным организациям высшего образования в сфере научной деятельности ФТ-1 – 01201459263.

EVALUATION OF RADIO SOURCE'S COORDINATES BASED ON SOLUTION OF LINEARIZED SYSTEM OF EQUATIONS BY RANGE-DIFFERENCE METHOD

Abstract.

Background. One of the most common methods for determining the coordinates of a radio source in passive systems of positioning is the range-difference method. As a navigation parameter the range-difference method uses the difference of distances from the source to the spaced synchronized receivers determined by mutual time delay of the received signals. Determination of the radio source's coordinates is based on solving a system of nonlinear equations, and requires significant computational costs. The field of application of the range-difference method is associated with the need to measure the navigational parameters under changing frequency characteristics of the received signals due to the influence of the Doppler Effect arising during the signal propagation in satellite systems, and under low signal-to-noise ratio, which significantly increases the computational complexity of the problem to be solved. The main purpose is to enhance the computational efficiency of the algorithm of determining the radio source's coordinates by the range-difference method, which is achieved by initial assessment of coordinates obtained from the solution of the linearized system of equations and by using a computationally efficient algorithm for determining the mutual time delay of the received signals in the presence of the Doppler shift of signals under a low signal-to-noise ratio.

Materials and methods. The results presented in this paper were obtained by computer simulation of signal processing in the passive satellite system of radio source positioning on the general-purpose processor (CPU), and using parallelization of computations on the GPUs.

Results. The authors developed an algorithm for radio source positioning, using an initial estimate of the source's coordinates based on the solution of the linearized equations of the range-difference method to be applied in a satellite positioning system. The characteristics of the proposed algorithm were also investigated.

Conclusions. It is shown that the use of the proposed approach has achieved significant performance gains in calculation of radio source's coordinates. An important feature of the proposed algorithm is that it can be used for detecting and determining the location of radio sources in real time.

Key words: range-difference method, mutual time delay, determination of coordinates.

Введение

Переход к многопозиционным системам и использованию в качестве элементов таких систем искусственных спутников Земли (ИСЗ) является одной из основных тенденций развития современной радионавигации [1, 2]. Многопозиционные пассивные системы обладают рядом преимуществ, такими как высокая точность определения пространственного положения объектов, повышенная разрешающая способность и др., что связано с большим количеством фиксируемой информации об источнике радиоизлучения.

К достоинствам спутниковых многопозиционных систем можно отнести глобальность рабочей зоны и непрерывность производимых измерений. Одними из важнейших приложений многопозиционных пассивных методов

определения местоположения и параметров траектории различных объектов являются навигация и идентификация положения источника на основе регистрации излучаемых сигналов [2–4].

Среди методов определения местоположения источника радиоизлучения по типу измеряемой величины традиционно выделяют угломерные и дальномерные методы [5]. Однако в силу конструктивных особенностей спутниковых систем угломерные методы практически не используются, наибольший интерес вызывает использование разностно-дальномерных методов из-за возможности применения помехоустойчивых корреляционных алгоритмов измерения временных задержек сигналов.

Разностно-дальномерный метод (РДМ) требует оценки взаимных временных задержек распространения сигнала и предполагает синхронизированный во времени прием в нескольких разнесенных в пространстве точках излученного источником сигнала [1, 2, 5]. В общем случае оценка временных задержек производится на основе корреляционного анализа принятых реализаций сигналов. При использовании в качестве приемников многопозиционных систем ИСЗ требуется применение методов компенсации искажений спектров сигналов, связанных с влиянием эффекта Доплера. Среди существующих методов компенсации можно отметить метод построения функции неопределенности [5] и адаптивную цифровую фильтрацию [6, 7].

В работе рассмотрен алгоритм оценки координат источника сигнала на основе формирования линеаризованной системы уравнений разностно-дальномерного метода, проведено моделирование обработки сигналов пассивной многопозиционной спутниковой системы определения местоположения источника радиоизлучения с его использованием. Исследована устойчивость решения линеаризованной системы уравнений РДМ к малым отклонениям измеряемых параметров.

1. Применение алгоритма линеаризации системы уравнений РДМ в многопозиционных спутниковых системах

Определение местоположения источника радиоизлучения разностно-дальномерным методом основано на формировании системы уравнений, связывающих координаты источника излучения с координатами приемников многопозиционной системы и временными задержками распространения сигналов (рис. 1)

$$\begin{cases} \Delta R_{ij} = R_{iM} - R_{jM} = c(\tau_{iM} - \tau_{jM}) = c\Delta\tau_{ij}, \\ R_{iM} = \sqrt{(x_i - x_M)^2 + (y_i - y_M)^2 + (z_i - z_M)^2}, \\ R_{jM} = \sqrt{(x_j - x_M)^2 + (y_j - y_M)^2 + (z_j - z_M)^2}, \end{cases} \quad (1)$$

где ΔR_{ij} – разности расстояний между точкой излучения (x_M, y_M, z_M) и несколькими точками (ИСЗ) приема сигнала (x_i, y_i, z_i) , определяемые через измерения взаимных временных задержек распространения сигналов τ_{ij} , c – скорость света.

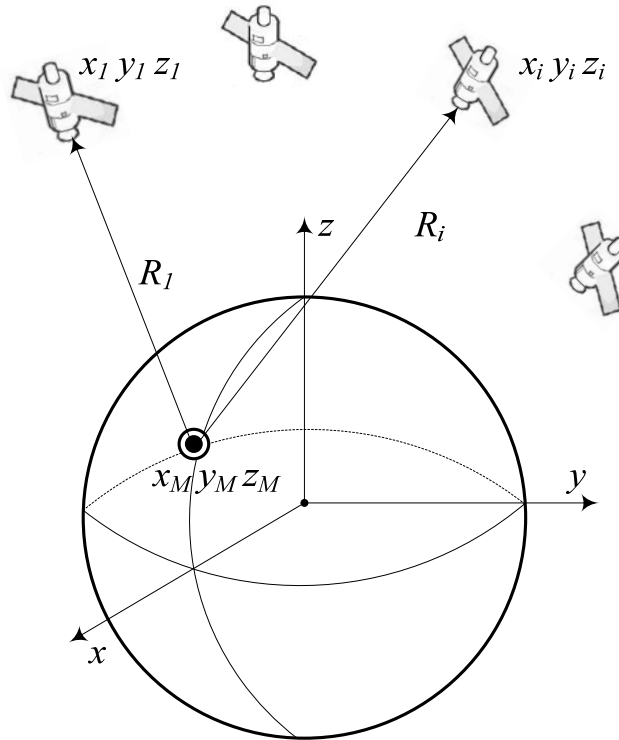


Рис. 1. Многопозиционная спутниковая система определения местоположения источника излучения

Для оценки местоположения источника излучения в пространстве (без использования уравнения земной поверхности) требуется минимум четыре синхронизированных приемника излучения. При этом координаты источника излучения находятся из решения системы нелинейных уравнений (1).

Для решения систем нелинейных уравнений наиболее часто применяют итерационные методы наименьших квадратов [2] или методы многомерной оптимизации [8], сводящие задачу решения системы нелинейных уравнений (1) к оптимизации функционала суммы квадратов ошибок:

$$F(x, y, z) = \sum_{i=2}^N (R_1(x, y, z) - R_i(x, y, z) - c\Delta\tau_{1i})^2, \quad (2)$$

где $R_i(x, y, z) = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}$ – расстояние от i -го приемника до источника излучения.

При реализации данных подходов актуальным является вопрос о выборе начального приближения. В частности, это связано с тем, что функционал (2) является многоэкстремальным, а задача отыскания глобального минимума подобных функционалов нетривиальна и требует либо сложного алгоритма оптимизации [8], либо выбора начального приближения, близкого к глобальному оптимуму.

Для многопозиционных систем малой дальности в работе [9] предложен алгоритм линеаризации системы уравнений РДМ. Путем введения до-

полнительного уравнения (и, следовательно, приемника) систему уравнений (1) можно представить в виде

$$\begin{cases} (x_1 - x_M)^2 + (y_1 - y_M)^2 + (z_1 - z_M)^2 = R^2, \\ (x_2 - x_M)^2 + (y_2 - y_M)^2 + (z_2 - z_M)^2 = (R + \Delta r_{12})^2, \\ (x_3 - x_M)^2 + (y_3 - y_M)^2 + (z_3 - z_M)^2 = (R + \Delta r_{13})^2, \\ (x_4 - x_M)^2 + (y_4 - y_M)^2 + (z_4 - z_M)^2 = (R + \Delta r_{14})^2, \\ (x_5 - x_M)^2 + (y_5 - y_M)^2 + (z_5 - z_M)^2 = (R + \Delta r_{15})^2, \end{cases} \quad (3)$$

где R – расстояние от источника до первого приемника; $\Delta r_{ij} = r_i - r_j$ – разность расстояний от источника до i -го и j -го приемников. Путем несложных преобразований система (3) может быть сведена к линейной [9]:

$$2 \begin{pmatrix} x_1 - x_2 & y_1 - y_2 & z_1 - z_2 & -c\Delta t_{12} \\ x_1 - x_3 & y_1 - y_3 & z_1 - z_3 & -c\Delta t_{13} \\ x_1 - x_4 & y_1 - y_4 & z_1 - z_4 & -c\Delta t_{14} \\ x_1 - x_5 & y_1 - y_5 & z_1 - z_5 & -c\Delta t_{15} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_M \\ y_M \\ z_M \\ R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1^2 - r_2^2 + (c\Delta t_{12})^2 \\ r_1^2 - r_3^2 + (c\Delta t_{13})^2 \\ r_1^2 - r_4^2 + (c\Delta t_{14})^2 \\ r_1^2 - r_5^2 + (c\Delta t_{15})^2 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где $r_i(x, y, z) = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}$ – расстояние от i -го приемника до начала координат декартовой системы; $\Delta t_{ij} = \Delta r_{ij} / c$ – временные задержки распространения сигналов.

Таким образом, координаты источника радиоизлучения могут быть оценены как решение системы линейных алгебраических уравнений. Однако данный подход, основанный на переходе к системе линейных уравнений и хорошо зарекомендовавший себя при использовании в лабораторной многопозиционной системе ближнего действия [9], имеет свои ограничения при использовании с многопозиционными спутниковыми системами местоопределения. Наличие зоны видимости источника излучения со стороны ИСЗ приводит к невозможности использования конфигураций с расположением приемников (ИСЗ) в произвольной точке околоземного пространства. Невозможность создания произвольной конфигурации приемников приводит к ухудшению обусловленности матрицы системы уравнений (4), соответственно, неточности определения координат приемников, и измерения временных задержек могут привести к существенным отклонениям решения системы от реального местоположения источника излучения [10]:

$$\frac{\|\Delta \mathbf{x}\|}{\|\mathbf{x}\|} \leq \frac{\text{cond}(\mathbf{A})}{1 - \text{cond}(\mathbf{A})} \cdot \left(\frac{\|\Delta \mathbf{A}\|}{\|\mathbf{A}\|} + \frac{\|\Delta \mathbf{b}\|}{\|\mathbf{b}\|} \right), \quad (5)$$

где $\|\Delta \mathbf{x}\| / \|\mathbf{x}\|$ – относительная ошибка решения системы; $\|\Delta \mathbf{b}\| / \|\mathbf{b}\|$ – относительная ошибка правой части; $\|\Delta \mathbf{A}\| / \|\mathbf{A}\|$ – относительная погрешность коэф-

фициентов системы, $\text{cond}(\mathbf{A})$ – число обусловленности матрицы коэффициентов.

2. Оценка местоположения источника радиоизлучения на основе линейного приближения

Исследование матрицы коэффициентов (4), полученной для случайных средне- и высокоорбитальных ИСЗ, с учетом ограниченности угла видимости спутников показало, что обусловленность (cond) исследуемой матрицы принимает значения из широкого диапазона, существенно превышающие 500, и имеет тенденцию к увеличению при увеличении радиуса орбиты спутников.

Подобное поведение обусловленности матрицы можно объяснить «геометрической беднотой» рассматриваемых конфигураций спутников (расположение спутников на одной линии или в тесной группе), поскольку все они сосредоточены в достаточно узком конусе прямой видимости источника излучения. Незначительное улучшение обусловленности рассматриваемой матрицы наблюдается при использовании высокоэллиптических орбит спутников.

Для сравнения на рис. 2, 3 приведены зависимости среднеквадратичной погрешности определения координат источника радиоизлучения S от неточности задаваемых параметров (координат спутников Δr и временных задержек Δt). Для исследования выбирались случайные конфигурации пяти спутников на орбите 8500 км, обусловленность матрицы коэффициентов которых принимала значение около 300, при этом среднее расстояние между парами спутников (база) составило ~ 1500 км. Кривая 1 соответствует оценке местоположения источника на основе решения системы линейных уравнений (4), кривая 2 – оценке на основе решения исходной системы нелинейных уравнений методом оптимизации.

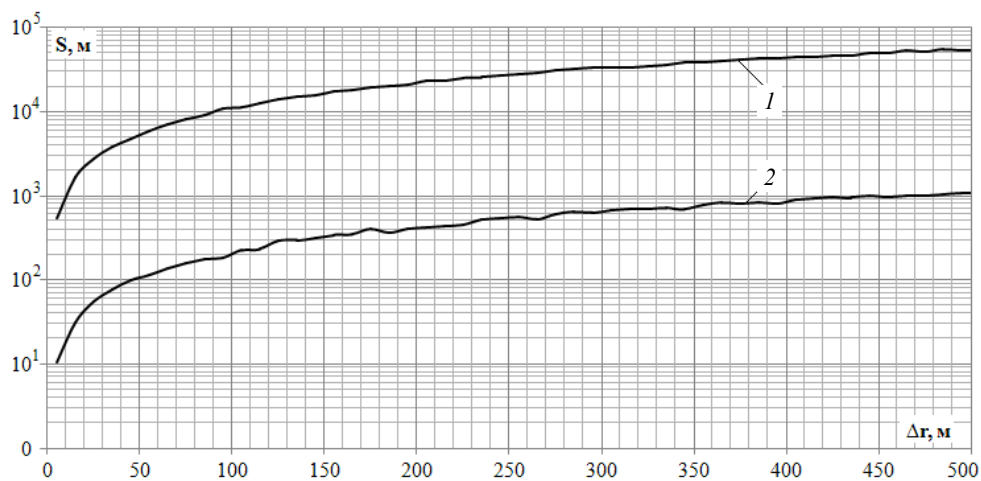


Рис. 2. Зависимость СКО оценки координат от погрешности определения координат спутников

Для решения системы линейных уравнений (4) применялся метод, основанный на вычислении псевдообратной матрицы с использованием алгоритма сингулярного разложения (SVD) [11]. Решение нелинейной системы

уравнений (1) сводилось к оптимизации функционала (2) методом многомерной оптимизации с начальным приближением в точке $\bar{\mathbf{P}}$, расположенной внутри области пересечения зон прямой видимости спутников

$$\bar{\mathbf{P}} = \frac{\bar{\mathbf{r}}_c}{|\bar{\mathbf{r}}_c|} R_3, \quad (6)$$

где R_3 – радиус Земли; $\bar{\mathbf{r}}_c$ – радиус-вектор точки, полученной усреднением координат центров зон видимости спутников.

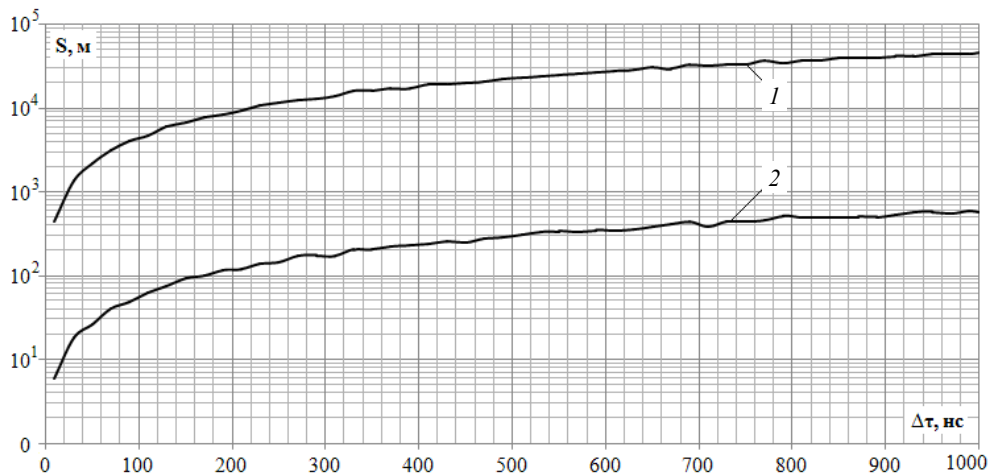


Рис. 3. Зависимость СКО оценки координат от погрешности измерения временных задержек

Среднеквадратичная погрешность S оценки местоположения источника радиоизлучения, полученной из решения системы линейных уравнений, существенно больше погрешности оценки, полученной из решения системы нелинейных уравнений, в соответствии с соотношением (5).

Как уже отмечалось выше, эффективность методов решения нелинейной системы уравнений (1) существенно повышается при наличии начального приближения, близкого к глобальному оптимуму в задаче многомерной оптимизации (2).

В качестве начального приближения для процедуры оптимизации можно взять оценку местоположения источника излучения, полученную из решения системы линейных уравнений (5), и использовать метод поиска локального оптимума, например, метод Хука-Дживса [8]. При этом наблюдается ускорение работы алгоритма определения местоположения источника излучения по сравнению с алгоритмом, использующим метод оптимизации с начальным приближением в центре пересечения зон прямой видимости спутников (табл. 1). Коэффициент ускорения определяется как отношение среднего времени работы алгоритма решения задачи местоопределения источника излучения на основе метода оптимизации функционала (2) с начальным приближением в точке пересечения зон прямой видимости спутников (6) и с использованием начальной оценки, полученной из решения линейной системы уравнений РДМ (4).

Относительное ускорение работы алгоритма

Погрешность определения координат спутников, м	Коэффициент ускорения	Погрешность измерения временных задержек, нс	Коэффициент ускорения
0	75,79	0	68,94
10	24,75	10	32,57
100	11,18	100	18,27
1000	4,57	1000	7,11

Ускорение работы алгоритма вызвано близостью начального приближения, полученного из решения линейной системы уравнений (4), к глобальному оптимуму функционала (2). Следует заметить, что решение системы линейных уравнений размерностью 4×4 не требует значительных затрат машинного времени, а следовательно, позволяет получить выигрыш в вычислительной эффективности по сравнению с довольно трудоемкой процедурой оптимизации. Значения, приведенные в табл. 1, наглядно иллюстрируют тот факт, что чем ближе начальное приближение к глобальному оптимуму функционала, тем меньше итераций оптимизационного метода требуется совершить для достижения требуемой точности. Приближения, полученные при реальных погрешностях исследуемых параметров (погрешность определения координат спутников ~ 100 м, погрешность измерения временных задержек ~ 100 нс), позволяют сократить время работы алгоритма в ~ 10 – 15 раз.

3. Оценка взаимной временной задержки принятых сигналов

Наиболее общим алгоритмом определения взаимных временных задержек при наличии шума и смещении спектров сигналов является обобщенный метод максимального правдоподобия, сводящийся к построению и анализу взаимной функции неопределенности пары исследуемых сигналов [5]:

$$\psi(\tau, F_d) = \left| \sum_{n=0}^{N-1} s_1[n] s_2^*[n + \tau] \exp(-j2\pi F_d n T) \right|, \quad (7)$$

где s_1 – первый сигнал из пары; s_2^* – комплексно сопряженный второй сигнал; τ – взаимная временная задержка; F_d – величина взаимного доплеровского смещения спектров сигналов; $T_s = 1/f_s$ – период дискретизации.

В задаче оценки временных задержек функция неопределенности позволяет компенсировать частотное смещение в спектрах сигналов, причиной которого служит эффект Доплера. Координаты максимума функции неопределенности соответствуют взаимной временной задержке во временной области и доплеровскому смещению в частотной.

Поскольку полное вычисление функции неопределенности – вычислительно трудоемкая задача, даже с учетом использования алгоритма быстрого преобразования Фурье требует значительных затрат машинного времени и объема памяти, разработан вычислительно-эффективный алгоритм [12], который может быть подвергнут распараллеливанию, следовательно, может быть реализован на современных графических процессорах общего назначения.

Алгоритм заключается в использовании низкочастотной фильтрации с децимацией и переходе к построению сечений функции неопределенности.

Применение параллельной реализации метода оценки взаимной временной задержки принятых сигналов [12] на основе построения сечений функции неопределенности (7) позволяет анализировать сигналы значительной длительности (16384, 32768 и более отсчетов) в условиях низкого отношения сигнал/шум (ОСШ для BPSK сигналов до –20 Дб, для MSK сигналов до –15 Дб) на современных графических процессорах NVIDIA с использованием технологии CUDA распараллеливания вычислений за время ~100 мс.

Получаемая точность оценки взаимных временных задержек узкополосных сигналов достаточна для определения местоположения источника радиоизлучения с погрешностью до нескольких сотен метров.

Использование метода предварительной оценки координат источника радиоизлучения на основе решения линеаризованной системы уравнений разностно-дальномерного метода в качестве начального приближения для оптимизационного метода решения нелинейной системы уравнений позволяет получать координаты источника радиоизлучения за несколько миллисекунд.

Полное время единичного измерения местоположения источника радиоизлучения с использованием группировки из пяти спутников будет составлять доли секунды, что означает возможность использования описанного алгоритма в режиме, близком к режиму реального времени.

Заключение

В работе проведено моделирование алгоритмов обработки сигналов в многопозиционной пассивной системе определения местоположения источника радиоизлучения и исследование устойчивости решения линеаризованной системы уравнений разностно-дальномерного метода определения местоположения источника радиоизлучения к малым отклонениям измеряемых параметров. Выполнен анализ вычислительной эффективности и возможности применения данной системы с реальными спутниковыми системами.

Компьютерным экспериментом подтверждена эффективность применения полученной оценки решения линеаризованной системы уравнений в качестве начального приближения для процедуры оптимизации, к которой сводится решение системы нелинейных уравнений РДМ.

Список литературы

1. **Черняк, В. С.** Многопозиционная радиолокация / В. С. Черняк. – М. : Радио и связь, 1993. – 416 с.
2. **Ворошилин, Е. П.** Определение координат источников радиоизлучения разностно-дальномерным методом с использованием группировки низкоорбитальных малых космических аппаратов / Е. П. Ворошилин, М. В. Миронов, В. А. Громов // Доклады ТУСУРа. – 2010. – № 1 (21), ч. 2. – С. 23–28.
3. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. – М. : Радиотехника, 2010. – 800 с.
4. **Козлов, А. В.** Развитие спутниковой системы позиционирования и сбора данных ARGOS / А. В. Козлов, А. В. Пестряков // Телекоммуникации и транспорт. – 2012. – № 2. – С. 36–39.
5. **Гришин, Ю. П.** Радиотехнические системы / Ю. П. Гришин, Ю. М. Казаринов, П. В. Ипатов. – М. : Высш. шк., 1990. – 496 с.

6. **Морозов, О. А.** Определение временной задержки сигналов методом адаптивной цифровой фильтрации / О. А. Морозов, Е. А. Солдатов, В. Р. Фидельман // *Автометрия*. – 1995. – № 2. – С. 108–113.
7. **Логинов, А. А.** Комбинированная цифровая фильтрация гармонического заполнения фазоманипулированных сигналов в задаче определения временной задержки / А. А. Логинов, О. А. Морозов, Е. А. Солдатов, С. Л. Хмелев // *Известия вузов. Радиофизика*. – 2007. – Т. 50, № 3. – С. 255–264.
8. **Жиглявский, А. А.** Методы поиска глобального экстремума / А. А. Жиглявский, А. Г. Жилинскас. – М. : Наука, Физматлит, 1991. – 247 с.
9. **Канакон, В. А.** Исследование характеристик многопозиционной локационной системы малой дальности для диагностики динамических процессов / В. А. Канакон, В. В. Горда // *Известия вузов. Радиофизика*. – 2013. – Т. 56, № 2. – С. 124–134.
10. **Канатников, А. Н.** Линейная алгебра / А. Н. Канатников, А. П. Крищенко. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 336 с.
11. **Каханер, Д.** Численные методы и математическое обеспечение / Д. Каханер, К. Моулер, С. Нэш. – М. : Мир, 1998. – 575 с.
12. **Логинов, А. А.** Алгоритм вычисления функции неопределенности в задаче одновременной оценки частотно-временных характеристик сигналов / А. А. Логинов, Д. С. Марычев, О. А. Морозов, В. Р. Фидельман // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. – 2013. – № 3 (27). – С. 62–74.

References

1. Chernyak V. S. *Mnogopozitsionnaya radiolokatsiya* [Multipositional radiolocation]. Moscow: Radio i svyaz', 1993, 416 p.
2. Voroshilin E. P., Mironov M. V., Gromov V. A. *Doklady TUSURa* [Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics]. 2010, no. 1 (21), part 2, pp. 23–28.
3. *GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya* [GLONASS. Principles of construction and functioning]. Eds. A. I. Perov, V. N. Kharisov. Moscow: Radiotekhnika, 2010, 800 p.
4. Kozlov A. V., Pestryakov A. V. *Telekommunikatsii i transport* [Telecommunication and transport]. 2012, no. 2, pp. 36–39.
5. Grishin Yu. P., Kazarinov Yu. M., Ipatov P. V. *Radiotekhnicheskie sistemy* [Radio engineering systems]. Moscow: Vyssh. shk., 1990, 496 p.
6. Morozov O. A., Soldatov E. A., Fidel'man V. R. *Avtometriya* [Autometrics]. 1995, no. 2, pp. 108–113.
7. Loginov A. A., Morozov O. A., Soldatov E. A., Khmelev S. L. *Izvestiya vuzov. Radiofizika* [University proceedings. Radio physics]. 2007, vol. 50, no. 3, pp. 255–264.
8. Zhiglyavskiy A. A., Zhilinskis A. G. *Metody poiska global'nogo ekstremuma* [Methods of global extremum search]. Moscow: Nauka, Fizmatlit, 1991, 247 p.
9. Kanakov V. A., Gorda V. V. *Izvestiya vuzov. Radiofizika* [University proceedings. Radio physics]. 2013, vol. 56, no. 2, pp. 124–134.
10. Kanatnikov A. N., Krishchenko A. P. *Lineynaya algebra* [Linear algebra]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N. E. Bauman, 2002, 336 p.
11. Kakhaner D., Mouler K., Nesh S. *Chislennyye metody i matematicheskoe obespechenie* [Numerical methods and software]. Moscow: Mir, 1998, 575 p.
12. Loginov A. A., Marychev D. S., Morozov O. A., Fidel'man V. R. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2013, no. 3 (27), pp. 62–74.

Гринь Илья Владимирович

магистрант, Нижегородский
государственный университет
имени Н. И. Лобачевского (Россия,
г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23)

E-mail: yelowt@mail.ru

Grin' Il'ya Vladimirovich

Undergraduate student, Nizhny Novgorod
State University named after
N. I. Lobachevsky (23 Gagarina avenue,
Nizhny Novgorod, Russia)

Ершов Роман Александрович

аспирант, Нижегородский
государственный университет
имени Н. И. Лобачевского (Россия,
г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23)

E-mail: yelowt@mail.ru

Ershov Roman Aleksandrovich

Postgraduate student, Nizhny Novgorod
State University named after
N. I. Lobachevsky (23 Gagarina avenue,
Nizhny Novgorod, Russia)

Морозов Олег Александрович

доктор физико-математических наук,
профессор, кафедра информационных
технологий в физических исследованиях,
Нижегородский государственный
университет имени Н. И. Лобачевского
(Россия, г. Нижний Новгород,
пр. Гагарина, 23)

E-mail: oa_morozov@nifti.unn.ru

Morozov Oleg Aleksandrovich

Doctor of physical and mathematical
sciences, professor, sub-department
of information technologies
in physical research, Nizhny Novgorod
State University named after
N. I. Lobachevsky (23 Gagarina avenue,
Nizhny Novgorod, Russia)

Фидельман Владимир Романович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой информационных
технологий в физических исследованиях,
Нижегородский государственный
университет имени Н. И. Лобачевского
(Россия, г. Нижний Новгород,
пр. Гагарина, 23)

E-mail: fidelman@nifti.unn.ru

Fidel'man Vladimir Romanovich

Doctor of engineering sciences, professor,
head of sub-department of information
technologies in physical research,
Nizhny Novgorod State University
named after N. I. Lobachevsky
(23 Gagarina avenue, Nizhny Novgorod,
Russia)

УДК 621.396

Гринь, И. В.

**Оценка координат источника радиоизлучения на основе решения
линеаризованной системы уравнений разностно-дальномерного метода /**
И. В. Гринь, Р. А. Ершов, О. А. Морозов, В. Р. Фидельман // Известия выс-
ших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. –
№ 4 (32). – С. 71–81.

ПОСТРОЕНИЕ ИНТЕРФЕЙСА ЧЕЛОВЕК–КОМПЬЮТЕР ДЛЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования являются человеко-машинные интерфейсы для систем управления многопараметрическими объектами. Предметом исследования являются научные принципы эффективного взаимодействия оператора с системой управления сложным объектом. Целью работы является представление научных принципов построения интерфейса человек–компьютер на основе совмещения интегрального и детального отображения параметров сложных объектов.

Материалы и методы. Общими принципами проектирования интерфейсного пространства являются: эргономичность, иерархичность, комплексность, объектная направленность и когнитивность.

Результаты. Применение предложенных принципов построения интерфейсного пространства позволяет оператору сложного объекта для решения каждой прикладной задачи выбрать подходящий по детальности уровень пространственной иерархии интерфейса. В области вывода создается информационное пространство, включающее как элементы виртуальной реальности, так и элементы на основе других способов инженерно-психологического кодирования. Иерархия трехмерных моделей объектов интерфейса повышает его информативность и не требует дополнительного пространства в области вывода. Применение перечисленных принципов позволяет строить эргономичные интерфейсы для систем управления техническими, социально-экономическими, медико-биологическими и иными объектами.

Выводы. Предлагаемый подход позволяет в рамках одного интерфейса сочетать интегральную индикацию состояния многопараметрического объекта, необходимую для оперативной оценки его состояния в целом, с детальным отображением процессов, необходимым для их количественного регулирования.

Ключевые слова: человеко-машинный интерфейс, система управления, мониторинг, многопараметрический объект, эргономичность, иерархия, комплексность, объектный подход, когнитивность, интегральная индикация, мнемосхема, детальность представления

Yu. N. Kosnikov

BUILDING OF THE “HUMAN-COMPUTER” INTERFACE FOR THE SYSTEM OF COMPLEX OBJECTS AUTOMATIC CONTROL

Abstract.

Background. The research object is the human-computer interfaces for the system of multiparameter objects management. The research subject is the scientific principles of effective interaction between an operator and the system of complex object control. The aim of the article is to present the scientific principles of the “human-computer” interface building on the basis of a combination of integral and detailed displaying of complex objects’ parameters.

Materials and methods. The common principles of interface space designing are the following: usability, hierarchical form, composite nature, objective orientation and cognitive nature.

Results. Application of the suggested principles of interface space building enables a complex object's operator to choose a proper-detail level of interface spatial hierarchy in order to solve each applied problem. In the output there is created an information space including both the virtual reality elements and the elements based on the other methods of engineering-psychological encoding. The hierarchy of 3D models of interface objects increases interface's self-descriptiveness and requires no additional space in the output area. Application of the above-mentioned principles allows to build usable interfaces for the systems controlling technical, socioeconomic, biomedical and other objects.

Conclusions. In the framework of a single interface the suggested approach allows to combine integral indexing of a multiparameter object's condition, required for quick estimation of its condition in general, with detailed displaying of processes, necessary for their quantitative adjustment.

Key words: human-computer interface, control system, monitoring, polyvalent object, usability, hierarchy, complexity, object approach, cognitivity, integrated indication, mimic, detailed presentation.

Введение

Сложные объекты мониторинга и управления характеризуются большим числом контролируемых параметров. К таким объектам относятся технические и технологические системы (доменная печь, электростанция, плотина, химический комбинат, транспортный узел...), организационно-экономические системы (субъект федерации, министерство, корпорация, учебное заведение...), медико-биологические системы (человек, бригада шахтеров, команда спасателей...) и иные системы.

При управлении такими объектами велико значение человеческого фактора. Именно он во многих случаях становится причиной аварийных ситуаций. По данным статистики наиболее высокий процент несчастных случаев, связанных с человеческим фактором, отмечен в химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности (до 79 %), в угольной промышленности (более 70 %), в нефтегазодобывающей промышленности (64 %), на магистральных трубопроводах (53 %) [1]. Особенно велико значение человеческого фактора в тех областях, где работа человека протекает в режиме реального времени: это управление технологическими процессами, мониторинг охраняемых объектов, диспетчирование транспортных средств, контроль медико-биологического состояния групп людей в чрезвычайных ситуациях.

Компьютеризация различных областей деятельности человека сводит многие функции управления сложными объектами к работе с компьютером. На экране монитора состояние контролируемого объекта представляется средствами интерфейса человек-компьютер. В этом случае от выбора интерфейса во многом зависит эффективность автоматизированной системы контроля и управления в целом.

1. Современное направление развития интерфейсов

В настоящее время действует тенденция унификации интерфейсов, однако она может быть реализована лишь в традиционных WIMP-интерфейсах,

которые представляют информацию в виде окон (**w**indows), иконок (**i**cons), меню (**m**enus) и указателей (**p**ointing devices). Для контроля сложных технологических и организационных объектов приходится отыскивать уникальные решения.

В настоящее время научные принципы проектирования эффективных интерфейсов в полной мере не сформулированы. Имеются рекомендации по оформлению окна вывода, его цветовым и композиционным решениям, по навигации в его пространстве и взаимодействию с ним пользователя, по программным продуктам, облегчающим построение интерфейса [2–4]. Отдавая должное этим важным вопросам, следует все же отметить, что в реальном мире человек взаимодействует с реальными объектами, на реальных объектах нарабатывает опыт поведения и сенсомоторные навыки. Это означает, что наиболее подходящим для взаимодействия с человеком является интерфейсное пространство, максимально приближенное к реальности. Реалистичный вид объектов интерфейсного пространства улучшает их восприятие человеком и повышает эффективность его работы в составе системы управления. Подтверждением этого является все повышающийся интерес к трехмерным интерфейсам, в том числе и интерфейсам на основе реалистичного представления объектов (так называемое виртуальное окружение) [5–8].

Однако разработчиками интерфейсов недостаточно проработаны такие важные вопросы, как организация интерфейсного пространства, выбор его мерности и детальности, методы моделирования конфигурации объектов интерфейса, рациональное распределение функций между этими объектами, формы сочетания в них реалистичности и «нереалистичности», повышение информативности объектов с одновременным ограничением требований к производительности системы управления.

2. Общие принципы построения эффективного интерфейса

Анализ достижений в области 3D-интерфейсов и требований к взаимодействию человека с системой управления позволяет сформулировать основные принципы, которые могут быть положены в основу построения интерфейса человек–компьютер. К ним можно отнести эргономичность, иерархичность, комплексность, объектную направленность и когнитивность.

Оператор системы управления зачастую принимает решения в условиях дефицита времени. Следовательно, для снижения психоэмоциональной нагрузки оператора интерфейс его взаимодействия с системой должен быть максимально **эргономичным**. В большинстве приложений интерфейс компьютерной системы по назначению отличается от систем виртуальной реальности. Его цель – не погрузить оператора в некоторый компьютерный мир, а предоставить средства для эффективного решения прикладной задачи. Это означает, что в пространстве интерфейса наряду с реалистическим представлением могут (и должны) быть применены и другие эргономичные способы отображения состояния объектов или процессов.

В плане детальности отображаемой информации к интерфейсу предъявляются противоречивые требования. С одной стороны, он должен представлять количество информации, достаточное для принятия обоснованного решения, и для этого он должен иметь высокую детальность. С другой стороны, для широкого охвата контролируемой ситуации в целом интерфейс дол-

жен максимизировать число представляемых информационных объектов, что возможно только на основе снижения их детальности. Выходом для снятия противоречия является **иерархическая структура** интерфейсного пространства. Для решения каждой прикладной задачи оператор должен иметь возможность выбрать подходящий уровень детальности представления объекта управления, а для этого – выбрать соответствующий уровень иерархии интерфейса.

Прикладные задачи компьютерной системы мониторинга могут быть весьма разнообразными – моделирование, вычисления, принятие решения. Визуальное сопровождение каждой задачи должно позволять эффективно решать задачу и в то же время не быть избыточным. Это означает, что в области вывода должно создаваться информационное пространство, включающее как элементы виртуальной реальности, так и элементы на основе других способов инженерно-психологического кодирования: текста, цвета, формуляров, мнемосимволов и пр. Кроме того, на каждом уровне иерархии интерфейса можно использовать различную мерность пространства: 2D, 2.5D, 3D. Для этого интерфейс компьютерной системы должен иметь **комплексный характер**.

Для представления сцены в естественном для оператора виде необходимо использовать привычные для него образы и способы взаимодействия с ними. Взаимодействуя с объектами реального мира, человек не отделяет в них признаки формы от признаков поведения и состояния. Подобное представление объектов интерфейса обеспечивает цельность их восприятия. Ее можно обеспечить с помощью **объектно ориентированного подхода**. Он предполагает построение отображаемой сцены как совокупности графических объектов, которые наделяются набором свойств, верно отражающих их состояние в пространстве и влияющих на их внешний вид. Эти свойства включают геометрические и визуальные характеристики объектов. К первым относятся верная геометрическая форма и реалистическая динамика в пространстве заданной мерности, ко вторым – наличие характерного узора (текстуры) и теней от освещения. Использование объектно ориентированного подхода на всех уровнях интерфейса позволяет упростить его изменение при возникновении такой необходимости.

Целью оператора является не восприятие отдельных графических объектов, а получение знания об отображаемых ими свойствах и характеристиках. Следовательно, вид и поведение объектов должны давать такое знание. Это свойство интерфейса можно назвать его **когнитивностью**.

Пять указанных свойств – эргономичность, комплексность, иерархичность, объектная ориентация и когнитивность – являются основополагающими принципами проектирования интерфейса человек–компьютер на любом уровне автоматизированной системы управления: эргономическом, математическом, алгоритмическом, программном, информационном, техническом, лингвистическом. Перечисленные принципы хорошо сочетаются между собой. Так, иерархичность интерфейса предполагает разбиение его на несколько слоев, предъявляемых оператору по вызову или внешнему сигналу. Каждый слой представляет объекты интерфейса с различной детальностью и в различной форме, начиная от схематичного вида и заканчивая реалистическим представлением (комплексность). В этом случае каждый уровень иерар-

хии позволяет оператору получать в рамках решаемой задачи знания разного уровня (когнитивность): верхний уровень – знание о состоянии всей совокупности объектов в целом, нижний – о детальном состоянии одного выбранного объекта.

3. Задачи проектирования интерфейса человек–компьютер

На основе пяти описанных принципов становятся понятными задачи проектирования интерфейса:

- выделение объектов управления и сопоставление им объектов интерфейса;
- выявление задач управления, определение их когнитивной нагрузки и распределение их по уровням иерархии и объектам интерфейсного пространства;
- определение геометрической организации интерфейсного пространства на каждом уровне иерархии: выбор количества и мерности геометрических базисов пространства, числа степеней свободы объектов;
- выбор средств геометрического моделирования (задания формы) объектов и сцен: видов геометрических моделей, аппарата геометрических преобразований, способов композиции сложных пространственных конструкций;
- обоснование степени реалистичности для каждого уровня иерархии пространства интерфейса, разделение объектов интерфейса по степени реалистичности отображения;
- придание объектам желаемой степени реалистичности: выбор компонентов реалистичности, эффективных способов придания реалистичности;
- выбор способов инженерно-психологического кодирования объектов, не требующих реалистического представления.

Можно показать применение перечисленных принципов при проектировании средств контроля многопараметрических объектов.

4. Выбор изобразительных средств интерфейса

Сложные объекты управления могут быть локализованными и рассредоточенными в пространстве. Прямой мониторинг их параметров (например, с помощью индикаторных и регистрирующих устройств, датчиков положения и средств слежения) не дает возможности быстро оценить состояние объектов в целом. Это иллюстрирует рис. 1, на котором показаны вид пульта мониторинга АЭС [9] и фрагмент экрана диспетчера транспортного предприятия [10].

Количество индикаторов на них столь велико, что быстро составить представление о состоянии объектов в целом невозможно.

Для снижения напряженности труда человека применяют формы отображения объектов, более приспособленные к особенностям восприятия (например, мнемонические схемы – мнемосхемы). Однако мнемосхемы многопараметрических объектов также весьма сложны, например, на рис. 2 показан фрагмент мнемосхемы нефтеперегонной установки [11]. Ее информационная насыщенность такова, что для оценки состояния объекта в целом потребуется довольно много времени.

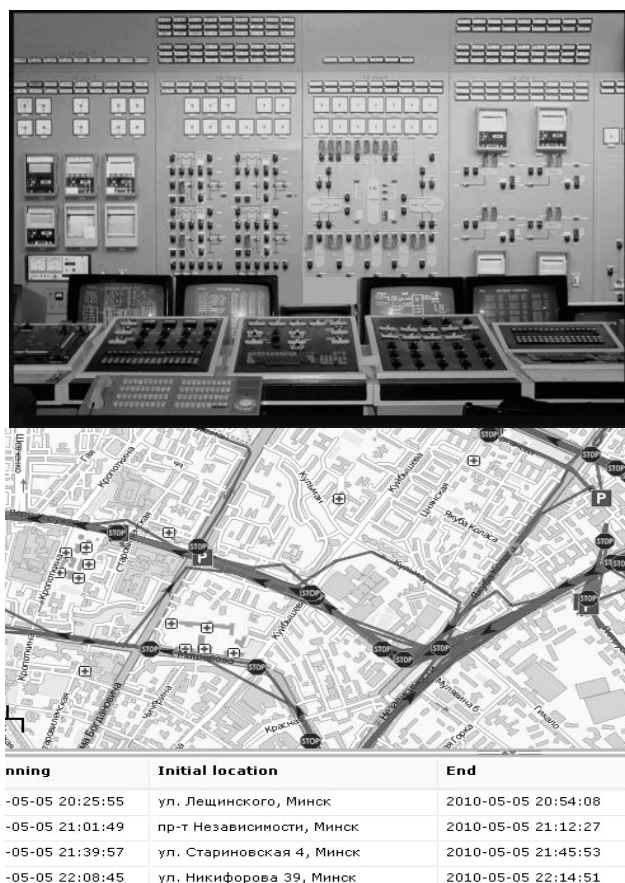


Рис. 1. Пульт оператора АЭС и экран диспетчера

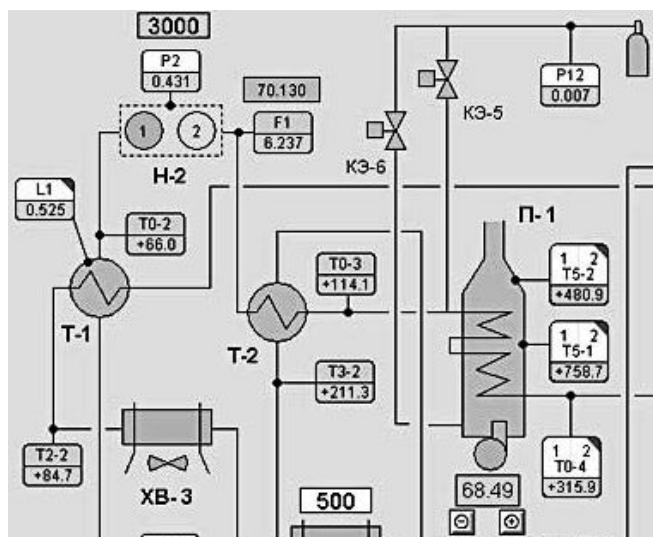


Рис. 2. Фрагмент мнемосхемы на экране монитора

Состояние сложного объекта в целом можно оценить по его интегральной (обобщенной) характеристике. Для ее представления служит интеграль-

ный индикатор. Выбор эффективной формы интегрального индикатора – сложная технико-эргономическая задача, так как эта форма должна быть привычной для оператора и удобной для одномоментного восприятия. В качестве такого индикатора может использоваться, например, так называемое лицо Чернова. Его суть в том, что состояние групп параметров объекта «привязывается» к мимике человеческого лица. При изменении параметров лицо «гримасничает», и по его виду оператор может судить о состоянии объекта в целом. Простейший вариант индикации в виде лица показан на рис. 3 [12].

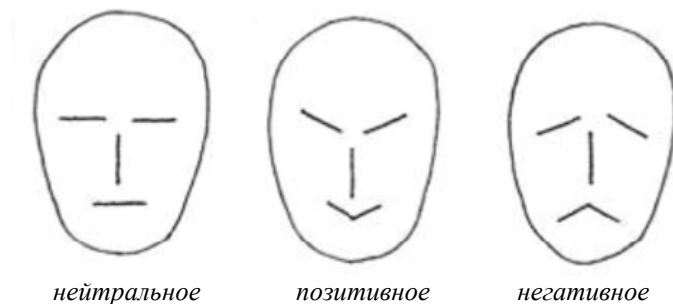


Рис. 3. Индикатор «Лицо Чернова»

Однако давая одномоментное представление о состоянии объекта в целом, интегральный индикатор не позволяет определить конкретные параметры, на которые следует воздействовать в случае необходимости. Эффективным решением в таком случае является иерархическое представление состояния сложного объекта на нескольких уровнях. На верхнем уровне следует применить интегральный индикатор (для объектов высокой сложности – группу индикаторов). Целесообразно строить верхний уровень интерфейса на основе средств 3D-графики, так как пространственное представление более информативно, чем плоское. Например, в случае использования трехмерного аналога лица Чернова – «головы Чернова» – в качестве дополнительных информационных признаков можно использовать повороты, наклоны и деформации головы. В то же время 3D-представление не занимает больше места на экране, чем плоское. Такой интегральный индикатор выполняется как графический объект, что соответствует объектному подходу.

Детальное отображение параметров объекта возлагается на нижние уровни интерфейса. Компактное представление множества параметров возможно средствами 3D-графики. Тогда параметры образуют тематические слои, например, привязанные к отдельным компонентам объекта, по которым можно перемещаться, используя третье измерение интерфейса (глубину). При этом слои имеют внутреннюю иерархию: по мере продвижения по ним представление становится все более детальным. В частности, для реализации нижнего уровня иерархии интерфейса можно эффективно использовать возможности трехмерной (многослойной) мнемосхемы, имеющей свои уровни иерархии по детализации [13]. Оператор сможет движением манипулятора (клавиатура, мышь, джойстик) переходить от одного слоя мнемосхемы к следующему, относящемуся к другому блоку отображаемого объекта. Такое представление структуры объекта поможет обойтись для отображения одним

экраном. Выбор определенного мнемознака манипулятором позволит развернуть фрагмент мнемосхемы с большей детальностью. Более детальное представление одного мнемознака, являющегося графическим объектом, тоже будет иметь иерархическую структуру, позволяющую перейти к еще более детальному представлению вплоть до отдельных параметров. На нижних уровнях иерархии в соответствии с принципом комплексности может широко применяться текстовое или двумерное графическое представление контролируемых параметров. Уровни иерархического интерфейса для контроля объекта, локализованного в пространстве, схематично показаны на рис. 4.

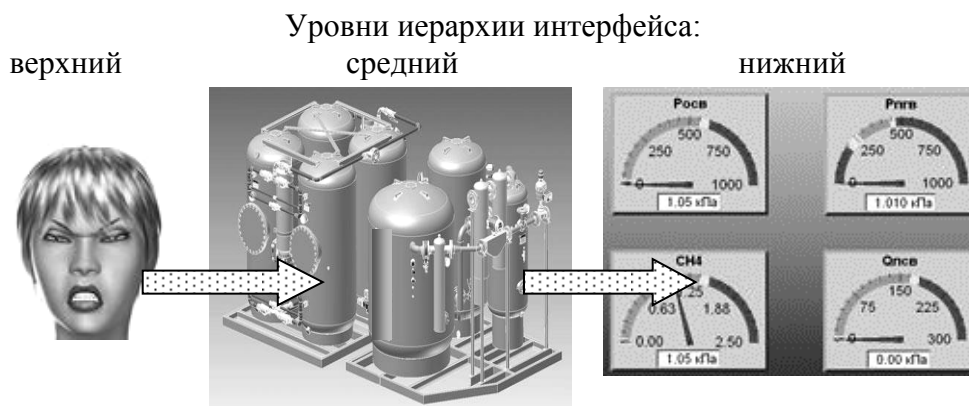


Рис. 4. Уровни иерархического интерфейса для контроля многопараметрического объекта

На описанных принципах строятся и интерфейсы контроля объектов, распределенных в пространстве [14, 15]. Фрагмент такого интерфейса показан на рис. 5, где слева отображается обобщенное, а справа – детальное состояние подвижных объектов (изображения получены аспирантом В. Власовым).

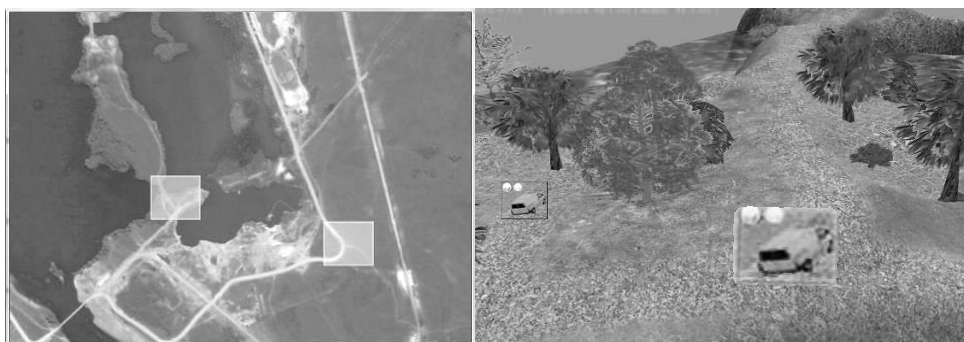


Рис. 5. Уровни интерфейса подвижных объектов

Заключение

Предлагаемый иерархический подход позволяет в рамках одного интерфейса сочетать интегральную индикацию состояния многопараметриче-

ского объекта, необходимую для оперативной оценки его состояния в целом, с детальным отображением процессов, необходимым для их количественного регулирования. Выбирая работу с тем или иным уровнем иерархии, оператор системы управления задает уровень знаний о состоянии объекта (уровень когнитивности). Представление объектов интерфейса как информационных объектов (объектно ориентированное описание) объединяет их геометрические и визуальные свойства и благодаря этому облегчает программную реализацию. Применение различных форм инженерно-психологического кодирования свойств объектов интерфейса (комплексное представление) экономит вычислительные ресурсы системы управления.

Список литературы

1. В России снижается число техногенных катастроф, но растет масштаб их последствий. – URL: <http://www.pravda.ru/accidents/factor/catastrof/16-06-2004/47522-tehnokatastr-0> (Дата обращения: 10.03.2014).
2. ГОСТ Р МЭК 60073–2000. Интерфейс человекомашинный. Маркировка и обозначения органов управления и контрольных устройств. Правила кодирования информации. – М. : Госстандарт России, 2000.
3. Графический интерфейс // SCADA-системы [Электронный ресурс]. – URL: <http://gendocs.ru/v26269/?cc=2> (Дата обращения: 24.02.2014).
4. **Раскин, Д.** Интерфейс: новые направления в проектировании компьютерных систем / Д. Раскин. – М. : Символ-Плюс, 2005. – 149 с.
5. **Галкин, Д. В.** Эволюция пользовательских интерфейсов: от терминала к дополненной реальности / Д. В. Галкин, В. А. Сербин // Гуманитарная информатика : междисциплинарный сб. ст. [Электронный ресурс]. – URL: http://huminf.tsu.ru/jurnal/vol7-2/galkin_serbin/ (Дата обращения: 24.02.2014).
6. Трехмерные интерфейсы. Looking Glass, Metisse, SphereXP и другие // Компьютерра. Раздел: Софтверра (Дата: 12 ноября 2004 года) [Электронный ресурс]. – URL: <http://old.computerra.ru/softerra/36651/page2.html> (Дата обращения: 24.02.2014).
7. **Борисов, В.** Системы трехмерной визуализации данных / В. Борисов, А. Игнатенко // Компьютерная графика и мультимедиа. – 2006. – № 4 (3). – URL: <http://cgm.computergraphics.ru> (Дата обращения: 12.03.2014).
8. Актуальные информационные технологии: визуализация информации, виртуальное окружение, неогеография, осязаемые изображения / А. Алешин, В. Афанасьев, П. Брусенцев, Е. Еремченко, А. Клименко, С. Клименко, И. Никитин, Л. Никитина, В. Пестриков, А. Сурин, О. Сурина // Научная визуализация. – 2013. – Т. 5, № 4. – С. 1–17. [Электронный ресурс]. – URL: <http://sv-journal.com/index.php?lang=ru> (Дата обращения: 15.03.2014).
9. **Анохин, А. Н.** Опыт и новые возможности в проектировании человекомашинного интерфейса БПУ новых АЭС с ВВЭР / А. Н. Анохин, В. П. Сивоконь, О. Л. Боженков, Е. Н. Алонцева // Ядерные измерительно-информационные технологии. – 2010. – № 4 (36). – С. 62–72.
10. Спутниковый мониторинг транспорта // Википедия [Электронный ресурс]. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Спутниковый_мониторинг_транспорта (Дата обращения: 28.08.2014).
11. Нефтеперегонная установка НПУ-50 // Linas Technology [Электронный ресурс]. – URL: <http://linas.ru/npu50.htm> (Дата обращения: 24.02.2014).
12. **Лившиц, В.** Индикаторы эмоций и Лица Чернова – Chernoff Faces / В. Лившиц // Проза.ру [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.proza.ru/2010/05/04/973> (Дата обращения: 24.02.2014).

13. **Косников, Ю. Н.** Отображение производственных процессов в виде трехмерных мнемосхем / Ю. Н. Косников // Информационные технологии в промышленности (ITI–2008) : тезисы докладов V Междунар. науч.-техн. конф. (22–24 октября 2008 г., Минск). – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2008. – С. 83–84.
14. **Власов, В. С.** Визуализация результатов мониторинга мобильных объектов: концепция виртуального интерфейса / В. С. Власов, Ю. Н. Косников // Новые промышленные технологии. – 2010. – № 6. – С. 45–49.
15. **Финогеев, А. Г.** Оперативный дистанционный мониторинг в системе городского теплоснабжения на основе беспроводных сенсорных сетей / А. Г. Финогеев, В. Б. Дильман, В. А. Маслов, А. А. Финогеев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2010. – № 3 (15). – С. 27–36.

References

1. *V Rossii snizhaetsya chislo tekhnogennykh katastrof, no rastet masshtab ikh posledstviy* [In Russia the number of anthropogenic disaster decreases, but the scales of the aftermath grow]. Available at: <http://www.pravda.ru/accidents/factor/catastrof/16-06-2004/47522-tehnokatastr-0> (accessed 10 March 2014).
2. GOST R MEK 60073–2000. *Interfeys chelovekomashinnyy. Markirovka i oznacheniya organov upravleniya i kontrol'nykh ustroystv. Pravila kodirovaniya informatsii* [Human-computer interface. Marking and designation of control units and monitors. Information encoding rules]. Moscow: Gosstandart Rossii, 2000.
3. *Graficheskii interfeys. SCADA-sistemy* [Graphic interface. SCADA-systems]. Available at: <http://gendocs.ru/v26269/?cc=2> (accessed 24 February 2014).
4. Raskin D. *Interfeys: novye napravleniya v proektirovanii komp'yuternykh sistem* [Interface: new trends in computer systems design]. Moscow: Simvol-Plyus, 2005, 149 p.
5. Galkin D. V., Serbin V. A. *Gumanitarnaya informatika: mezhdistsiplinarnyy sb. st.* [Informatics of humanities: interdisciplinary collected articles]. Available at: http://huminf.tsu.ru/jurnal/vol7-2/galkin_serbin/ (accessed 24 February 2014).
6. *Komp'yuterra. Razdel: Softerra* [Computerra. Section: Softerra]. (Date: 12 November 2004). Available at: <http://old.computerra.ru/softerra/36651/page2.html> (accessed 24 February 2014).
7. Borisov V., Ignatenko A. *Komp'yuternaya grafika i mul'timedia* [Computer graphics and multimedia]. 2006, no. 4 (3). Available at: <http://cgm.computergraphics.ru> (accessed 12 March 2014).
8. Aleshin A., Afanas'ev V., Brusentsev P., Eremchenko E., Klimenko A., Klimenko S., Nikitin I., Nikitina L., Pestrikov V., Surin A., Surina O. *Nauchnaya vizualizatsiya* [Scientific visualization]. 2013, vol. 5, no. 4, pp. 1–17. Available at: <http://sv-journal.com/index.php?lang=ru> (accessed 15 March 2014).
9. Anokhin A. N., Sivokon' V. P., Bozhenkov O. L., Alontseva E. N. *Yadernye izmeritel'no-informatsionnye tekhnologii* [Nuclear information-measuring technologies]. 2010, no. 4 (36), pp. 62–72.
10. *Sputnikovyy monitoring transporta* [Satellite monitoring of transport]. Vikipediya. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Sputnikovyy_monitoring_transporta (accessed 28 August 2014).
11. *Nefteperegonnaya ustanovka NPU-50* [Oil-refining plant NPU-50]. Linas Technology. Available at: <http://linas.ru/npu50.htm> (accessed 24 February 2014).
12. Livshits V. *Indikatory emotsiy i Litsa Chernova* – Chernoff Faces. Proza.ru. Available at: <http://www.proza.ru/2010/05/04/973> (accessed 24 February 2014).
13. Kosnikov Yu. N. *Informatsionnye tekhnologii v promyshlennosti (ITI–2008): tezisy dokladov V Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (22–24 oktyabrya 2008 g., Minsk)* [Information technologies in the industry (ITI-2008): report theses of V International scien-

- tific and technical conference (22-24 October 2008, Minsk)]. Minsk: OIPI NAN Belarusi, 2008, pp. 83–84.
14. Vlasov V. S., Kosnikov Yu. N. *Novye promyshlennye tekhnologii* [New industrial technologies]. 2010, no. 6, pp. 45–49.
15. Finogeev A. G., Dil'man V. B., Maslov V. A., Finogeev A. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2010, no. 3 (15), pp. 27–36.

Косников Юрий Николаевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой информационно-
вычислительных систем, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: jkos@pnzgu.ru

Kosnikov Yuriy Nikolaevich

Doctor of engineering sciences, professor,
head of sub-department of data-processing
systems, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 004.5

Косников, Ю. Н.

Построение интерфейса человек–компьютер для системы автоматизированного управления сложными объектами / Ю. Н. Косников // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 4 (32). – С. 82–92.

В. Е. Шикина

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКОГО ПЕРВИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ МАССОВОГО РАСХОДОМЕРА ЖИДКОСТЕЙ

Аннотация.

Актуальность и цели. В настоящее время измерение расхода (массового и объемного) занимает второе место после температуры и составляет 15 % от всех измерений в промышленности. Массовые расходомеры являются более точными по сравнению с объемными и становятся необходимыми в ряде отраслей. Измерительные преобразователи для массовых расходомеров, как правило, выполняются из нержавеющей стали, титана или сплавов на основе никеля. В рамках данной работы интерес представляет использование в качестве материала измерительной трубки пьезокерамики цирконата-титаната свинца типа ЦТС-19 и определение массового расхода, исходя из свойств пьезоэлектриков на основе обратного пьезоэффекта. Целью является определение возможности изготовления подобного преобразователя с заданными характеристиками на производстве.

Результаты. Рассмотрены изгибные колебания полой цилиндрической пьезокерамической трубки, которая является первичным преобразователем массового расходомера. Определена схема подключения преобразователя и направление поляризации трубки для получения требуемых колебаний. Представлена технология изготовления преобразователей на производстве, состоящая из пяти основных этапов, начиная от создания материала пьезокерамики и заканчивая нанесением выходных электродов на внешнюю поверхность трубки для регистрации ее колебаний. Описан состав проливной установки для проведения первичных экспериментов.

Выводы. Разработанные и изготовленные опытные образцы подтверждают возможность использования пьезоэлектрического материала в качестве основы для первичного преобразователя массового расходомера. Технология их изготовления может быть улучшена и уменьшена по времени при условии проведения полной поляризации образца в едином цикле (при наличии данной возможности на производстве). Следует отметить, что подобная работа проводилась в производстве впервые.

Ключевые слова: изгибные колебания, пьезокерамический первичный преобразователь, пьезоэлектрический трансформатор, поляризация, электроды.

V. E. Shikina

PRODUCTION OF CYLINDRICAL PIEZOCERAMIC PRIMARY CONVERTER FOR MASS FLOWMETER FOR LIQUIDS

Abstract.

Background. At the present time flow measurement (mass and volume) takes the second place after the temperature and totals 15 % of all measurements in the industry. Mass flowmeters are more accurate than volumetric ones and are required in a number of industries. Measuring converters for mass flowmeters, as a rule, are made

of stainless steel, titanium or alloys based on nickel. As to this research, the author is interested in application of piezoelectric ceramics of lead zirconate titanate-19 as a material of the measuring tube, and in definition of massflow rate in terms of the properties of piezoelectric materials based on the inverse piezoelectric effect. The aim is to determine the possibility of manufacturing a transducer with predetermined characteristics at production.

Results. The author considered flexural vibrations of a hollow cylindrical piezoelectric tube, which is the primary converter of a mass flowmeter, and defined a connection diagram of the converter and the polarization direction of the tube to obtain the required oscillation. The article presents the converter manufacturing technology at production consisting of five main stages, starting from a piezoelectric material and ending with application of output electrodes on the outer surface of the tube for reception of its oscillations. The work describes a setup structure for initial experiments.

Conclusions. The designed and manufactured prototypes confirm the possibility of using a piezoelectric material as the basis for production of the mass flowmeter converter. The manufacturing technology can be improved and reduced in time by using full polarization of the sample in a single cycle (subject to availability at production). It should be noted that such work was carried out in production for the first time.

Key words: flexural vibrations, piezoceramic primary converter, piezoelectric transformer, polarization, electrodes.

Введение

Измерения, выполняемые в научных исследованиях, промышленности, энергетике, сельском хозяйстве, при добыче и транспортировке природных энергоносителей, часто связаны с измерениями расхода, количества, давления и уровня веществ. Для контроля расходов используются различные типы расходомеров, основанные на различных принципах действия и имеющие различные конструкции. Кроме расходомеров, измеряющих объем жидкости, выпускаются расходомеры, определяющие массу расходуемой жидкости. Подобные приборы используются в химической, нефтехимической, пищевой, целлюлозно-бумажной, фармацевтической, косметической и других отраслях. Наиболее распространены массовые расходомеры жидкостей, основанные на эффекте Кориолиса, которые измеряют расход напрямую и нечувствительны к изменению условий процесса измерения и состава протекающей среды. Они также могут использоваться в системах очистки воды, поскольку не имеют в потоке подвижных частей, которые изнашиваются и выходят из строя, и исключают риск загрязнения системы очистки.

Как известно, при протекании жидкости трубопровод совершает изгибные колебания [1]. Данные колебания воспринимаются первичными преобразователями массовых расходомеров, усиливаются и регистрируются. Параметры колебаний связаны с измеряемой величиной – массой протекающей жидкости. Конструкции расходомеров достаточно разнообразны, однако все они, как правило, имеют металлическую измерительную трубку, внешний виброгенератор и приемники колебаний.

Целью работы являлось исследование возможности использования в качестве первичного измерительного преобразователя массового расходомера цилиндрической трубки, выполненной из кристаллического или поликристаллического пьезоэлектрика. Нанесенные на внешнюю поверхность такого цилиндра электроды обеспечивают возбуждение и съем колебаний. Та-

ким образом, упрощается конструкция первичного преобразователя и уменьшаются его массо-габаритные характеристики.

Среди материалов для изготовления первичного измерительного преобразователя были рассмотрены пьезоэлектрические монокристаллы (кварц, дигидрофосфаты калия и аммония, сегнетова соль, ниобат лития, силикоселенит и германоселенит), пьезоэлектрическая керамика и полимерные материалы в виде пленок, текстурированные путем вытяжки и поляризованные в постоянном электрическом поле. Анализ свойств данных материалов показал, что с учетом необходимости контакта чувствительного элемента с измеряемой средой наиболее предпочтительно использовать пьезокерамику из цирконат-титаната свинца $Pb(Ti, Zr)O_3$ ЦТС-19 [2], которая относится к сегнетомягким материалам. Жесткость материала определяет возможность и качество его поляризации, следовательно, выбранную пьезокерамику поляризовать с получением хорошего результата проще.

1. Изгибные колебания цилиндрической трубки

Для возбуждения в цилиндрическом пьезоэлементе низкочастотных колебаний изгиба необходимы две системы электродов [3]. В этом случае пьезоэлемент представляет собой пьезоэлектрический трансформатор. Часть его, подключенная к источнику электрического сигнала, считается возбудителем, часть, подключенная к нагрузке, – генератором [4].

По способу преобразования энергии в возбудителе и генераторе пьезотрансформаторы подразделяют на: продольно-продольные, поперечно-поперечные, продольно-поперечные и поперечно-продольные. Поскольку цилиндр является частью трубопровода, располагать электроды на его торцевых поверхностях невозможно. Следовательно, для подобного пьезоэлемента рассматривать продольно-поперечную и поперечно-поперечную поляризацию нельзя. Возможна только продольно-продольная поляризация (рис. 1).

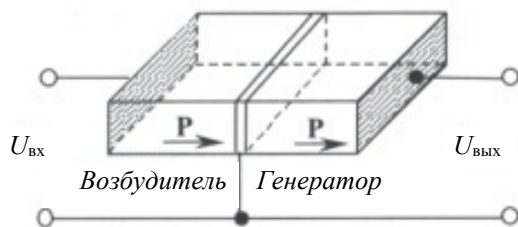


Рис. 1. Пьезотрансформатор с продольно-продольной поляризацией

Направление поляризации для возбуждения в цилиндрическом пьезоэлементе изгибных колебаний показано на рис. 2.

Электроды, расположенные на краях цилиндра, первоначально необходимы для осуществления процесса поляризации, а затем выполняют роль входных рабочих электродов, обеспечивая изгибные колебания цилиндра.

Для проверки работоспособности в ОАО «НИИ «Элпа» (г. Зеленоград) были созданы экспериментальные образцы первичного измерительного преобразователя массового расходомера в виде цилиндрической трубки.

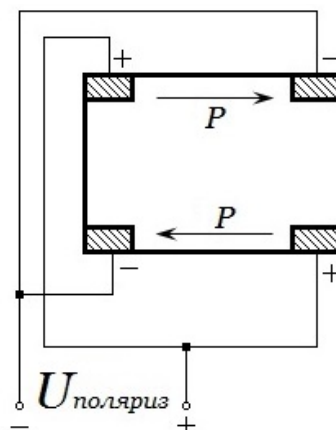


Рис. 2. Схема поляризации цилиндрического пьезоэлемента

2. Технология изготовления цилиндрических первичных преобразователей для расходомера

Процесс изготовления опытных образцов состоял из нескольких этапов.

1. Создание материала пьезокерамики путем смешивания в требуемых пропорциях всех компонентов и их измельчение. Необходимая пьезокерамика – ЦТС-19. Определение характеристик полученного материала до и после проведения первичного процесса поляризации с целью установления его качества. Согласно [5] необходимо измерить следующие характеристики до поляризации: емкость C_0 , $\tan \delta$. Условия первичной поляризации: температура $+140\text{ }^{\circ}\text{C}$; напряжение поляризации 2 кВ; продолжительность поляризации 30 мин (15 мин необходимо, чтобы выйти на заданную температуру, 15 мин пьезокерамика находится под поляризующим полем). После проведения первичной поляризации через 1 ч измеряются следующие характеристики: емкость C_0 , $\tan \delta$, частоты резонанса и антирезонанса f_r^t , f_a^t , относительный резонансный промежуток δf^t . По результатам измерений делается вывод, что данная пьезокерамика является керамикой ЦТС-19 и поляризуется нормально.

2. Изготовление опытных образцов требуемой формы.

Способ формования заготовок – прессование порошка [6]. Необходимая форма – цилиндр $\phi 11 \times 9 \times 10$ мм. Размеры выбраны, исходя из возможности поляризации образцов. Чем длиннее будет цилиндр, тем сложнее его поляризовать, однако на практике более важным является соотношение длины и диаметра цилиндра, т.е. при увеличении длины следует увеличивать и диаметр. На рис. 3 показан эскиз цилиндрического преобразователя с входными электродами.

Материалы на основе цирконата-титаната свинца спекаются при температуре $1200\text{--}1300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для получения изделий с хорошей микроструктурой требуется относительно короткое время выдержки. Поры в заготовке закрываются под действием температуры при спекании. Пористость материала составляет $\approx 5\%$, поры закрытые, жидкости не впитываются. Прочность на растяжение данной керамики около 200 кг/см^2 .

На данном этапе были получены несколько идентичных пьезокерамических цилиндров.

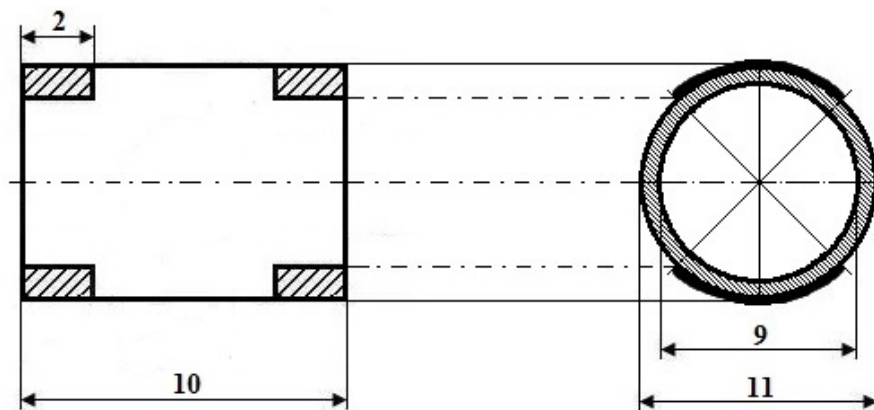


Рис. 3. Геометрические размеры первичного преобразователя

3. Нанесение входных электродов. Электроды представляют собой слой металлического серебра, наносимый в виде пасты, подвергаемой последующему вжиганию, в результате чего образуется непрерывный проводящий слой, непосредственно сцепленный с поверхностью керамики. Электроды (4 шт.) наносятся согласно эскизу по трафарету на внешнюю поверхность с захватом торцов, чтобы удобнее было проводить поляризацию. При необходимости с торцов электроды после поляризации можно полностью удалить. В данном случае электроды для поляризации будут являться в дальнейшем рабочими входными электродами первичного преобразователя. На рис. 4 показаны образцы первичного измерительного преобразователя расходомера в виде цилиндрической трубки из пьезокерамики с нанесенными электродами.



Рис. 4. Экспериментальные образцы

Электроды наносятся тонкой кисточкой, затем вжигаются при температуре $+800\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 2 ч. Непосредственно внутри печи образцы находятся около 30 мин. На рис. 5 показан процесс вжигания электродов.

После вжигания электродов (через 24 ч) проверяется качество нанесенных электродов и измеряются характеристики образца: емкость C_0 , $\text{tg } \delta$.

4. Процесс поляризации образцов для получения в них изгибных колебаний. Поляризация осуществляется приложением сильного постоянного электрического поля к металлизированным керамическим образцам. Из-за низкой диэлектрической проницаемости воздуха используются ванны с маслом. Процесс проходит в два цикла: сначала поляризуется одна пара электродов (по длине цилиндра), затем следующая пара электродов – в обратном направлении.

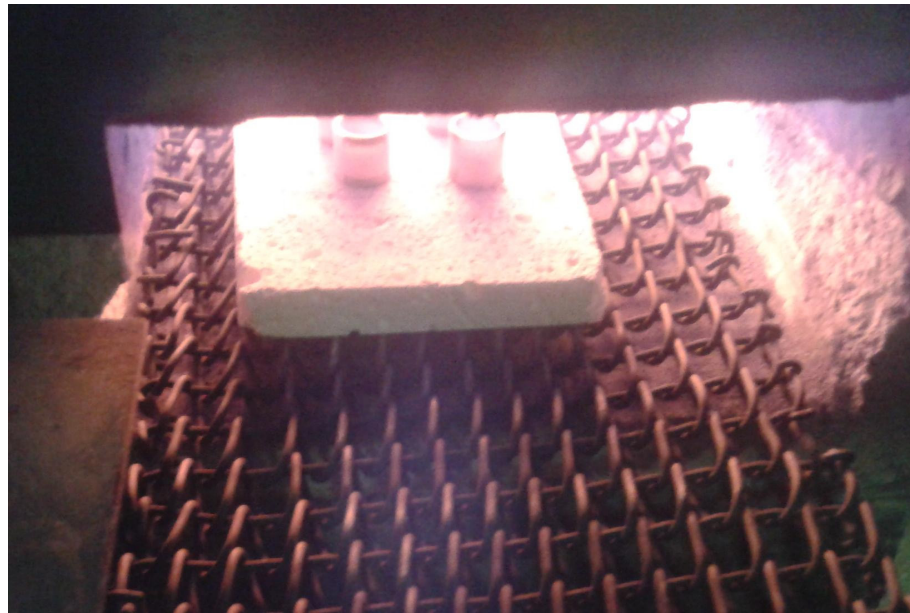


Рис. 5. Процесс вжигания электродов

Условия поляризации: температура $+160\text{ }^{\circ}\text{C}$; напряжение 10 kV ; длительность поляризации 45 мин (15 мин необходимо, чтобы выйти на заданную температуру, 30 мин образцы находятся под воздействием поля). Поляризация проходит в полиэтилсилаксановой жидкости (ПЭС-5). После проведения первого цикла поляризации измеряются характеристики, описанные в п. 1, а также пьезомодуль d_{33} с положительной и отрицательной сторон. Ввиду старения керамики существует правило выдерживать временной интервал между процессом поляризации и измерением для оценки свойств. После поляризации емкость образцов должна увеличиться примерно на 30% , $\text{tg } \delta$, как правило, уменьшается. На рис. 6 и 7 показаны процессы измерения емкости, $\text{tg } \delta$ и пьезомодуля соответственно.

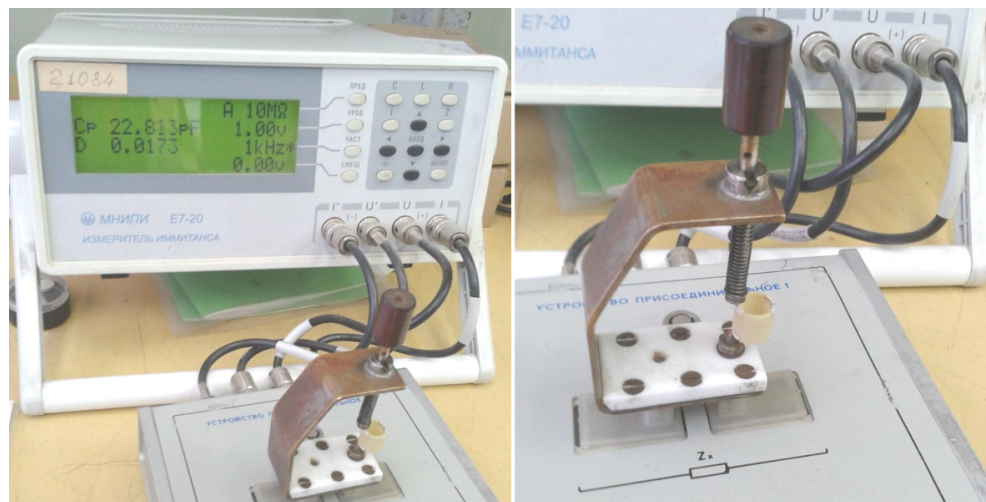


Рис. 6. Измерение емкости и $\text{tg } \delta$



Рис. 7. Измерение пьезомодуля

В среднем по образцам пьезомодуль равен 400. Со стороны, не подвергшейся поляризации, пьезомодуль должен быть равен 0, однако при измерении получены значения пьезомодуля около 200. Это означает, что вторая половина также слабо поляризовалась.

Далее проводится второй цикл поляризации с другой стороны с теми же условиями. После второй поляризации еще раз измеряются все перечисленные характеристики.

Эксперименты показали, что поляризация пьезомодулей практически выравнивается с обеих сторон и пьезомодуль имеет значения порядка 360. Это означает, во-первых, что поля пересеклись и в центре цилиндра при наличии выходных электродов можно регистрировать выходной сигнал, и, во-вторых, полученные образцы обладают сильными пьезоэлектрическими свойствами, что немаловажно при использовании их в качестве первичных преобразователей для расходомера жидкостей.

5. Нанесение выходных электродов. Центральные (выходные) электроды наносятся после проведения поляризации, поскольку в противном случае образец при поляризации может разорвать внутренним напряжением (пробой). Возможно несколько способов нанесения: тонкой кисточкой серебростержащим контактолом, предварительно удалив слой поляризационного масла и жира с помощью наждачной бумаги или прокипятив образец в бензине; приклеивание электродной площадки клеем через контактол для увеличения чувствительности. В данном случае был использован второй метод нанесения выходных электродов.

Следует отметить, что наиболее сложным среди перечисленных этапов является поляризация, поскольку элемент имеет цилиндрическую форму, а также в связи с тем, что электроды не покрывают поверхность целиком и их площадь незначительна. Кроме того, для получения изгибных колебаний поляризация осуществляется за два цикла с разных сторон цилиндра, что не является обычным. Специалистами ОАО «Элпа» подобная работа производилась впервые.

Таким образом, после выполнения всех этапов были получены опытные образцы и разработана установка для проведения экспериментов по проливу различных жидкостей. Данная установка состоит из следующих элементов:

- емкость, в которой находится измеряемая жидкость (объем 20 л);
- отводной гибкий шланг с краном для изменения подачи жидкости и, следовательно, скорости ее течения;
- исследуемый первичный преобразователь массового расхода, входные электроды которого подключены к генератору, настроенному на собственную частоту, а выходные – к цифровому частотомеру и осциллографу для визуализации сигнала и фиксации значения выходной частоты; датчик жестко соединен с обеих сторон с пластиковой трубкой, которая, в свою очередь, соединена с гибким отводным шлангом;
- емкость для слива жидкости;
- счетчик жидкости, установленный горизонтально и используемый в качестве образцового средства измерения для контроля расхода.

На рис. 8 представлены фрагменты описанной установки.



Рис. 8. Фрагменты экспериментальной установки для исследования датчика расхода

На описанной установке были проведены исследования по проливу воды, молока, пива и тосола-40. Частично их результаты приведены в [7].

По результатам проведенных работ можно сделать вывод, что возможно изготовление чувствительного элемента (измерительной трубки) массового расходомера в виде цилиндра, выполненного из пьезокерамического материала. Чувствительный элемент разработанной конструкции обладает физическими свойствами, позволяющими использовать его для измерения массового расхода жидкости, протекающей через него. Для защиты от возможного негативного воздействия протекающей среды внутреннюю поверхность цилиндрического чувствительного элемента необходимо покрыть органическим лаком или эмалью.

Список литературы

1. Прямое измерение массового расхода расходомером «MASSFLO» Danfoss // Приборы и системы управления. – 1995. – № 5. – С. 35–36.
2. **Шикина, В. Е.** Использование пьезоэлектрического материала для изготовления датчика массового расходомера жидкости / В. Е. Шикина // Вестник Ульянов-

- ского государственного технического университета (Вестник УлГТУ). – 2013. – № 3. – С. 72–74.
3. Малов, В. В. Пьезорезонансные датчики / В. В. Малов. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 272 с.
 4. Шарапов, В. М. Пьезоэлектрические датчики / В. М. Шарапов, М. П. Мусиенко, Е. В. Шарапова. – М. : Техносфера, 2006. – 632 с.
 5. ОСТ 11 0444-87. Материалы пьезокерамические. Технические условия. – М., 1987.
 6. Яффе, Б. Пьезоэлектрическая керамика / Б. Яффе, У. Кук, Г. Яффе. – М. : Мир, 1974. – 288 с.
 7. Шикина, В. Е. Расчет частоты колебаний пьезокерамического первичного преобразователя для массового расходомера жидкостей / В. Е. Шикина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 1 (29). – С. 54–63.

References

1. *Pribory i sistemy upravleniya* [Control devices and systems]. 1995, no. 5, pp. 35–36.
2. Shikina V. E. *Vestnik Ul'yanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (Vestnik UIGTU)* [Bulletin of Ulyanovsk State Technical University]. 2013, no. 3, pp. 72–74.
3. Malov V. V. *P'ezorezonansnye datchiki* [Piezoelectric resonators]. Moscow: Energoatomizdat, 1989, 272 p.
4. Sharapov V. M., Musienko M. P., Sharapova E. V. *P'ezoelektricheskie datchiki* [Piezoelectric sensors]. Moscow: Tekhnosfera, 2006, 632 p.
5. *OST 11 0444-87. Materialy p'ezokeramicheskie. Tekhnicheskie usloviya* [Piezoceramic materials. Engineering specifications]. Moscow, 1987.
6. Yaffe B., Kuk U., Yaffe G. *P'ezoelektricheskaya keramika* [Piezoelectric ceramics]. Moscow: Mir, 1974, 288 p.
7. Shikina V. E. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2014, no. 1 (29), pp. 54–63.

Шикина Виктория Евгеньевна
старший преподаватель, кафедра
измерительно-вычислительных
комплексов, Ульяновский
государственный технический
университет (Россия, г. Ульяновск,
ул. Северный Венец, 32)

E-mail: shik7789@gmail.com

Shikina Viktoriya Evgen'evna
Senior lecturer, sub-department
of measuring-computing complexes,
Ulyanovsk State Technical University
(32 Severny Venets street, Ulyanovsk,
Russia)

УДК 681.586

Шикина, В. Е.

Изготовление цилиндрического пьезокерамического первичного преобразователя для массового расходомера жидкостей / В. Е. Шикина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 4 (32). – С. 93–101.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 629.34

А. С. Вашури́н, Л. Н. Орлов, М. К. Чегуров

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ПАССИВНУЮ БЕЗОПАСНОСТЬ ВАХТОВЫХ АВТОБУСОВ

Аннотация.

Актуальность и цели. Известно, что одним из наиболее опасных видов ДТП с автобусами является опрокидывание. К силовой структуре кузовов многоместных пассажирских транспортных средств предъявляются требования, регламентированные Правилами ЕЭК ООН № 66. Отдельную специфическую группу составляют вахтовые автобусы на шасси грузовых автомобилей, предназначенные для эксплуатации в жестких природно-климатических условиях. Поэтому возникает актуальная задача оценки их пассивной безопасности во всем температурном диапазоне эксплуатации автобусов. В работе обоснован выбор диапазона температурных условий эксплуатации автобусов данного типа.

Материалы и методы. Расчетные исследования по оценке пассивной безопасности кузовов автобусов выполнены методом конечных элементов. Экспериментальные зависимости получены на современном поверженном оборудовании.

Результаты. Получены экспериментальные зависимости прочностных характеристик применяемых в кузовах материалов от температуры. Разработаны подробные конечно-элементные модели кузовов рассматриваемых вахтовых автобусов. Получены результаты исследования пассивной безопасности их кузовов в диапазоне температур эксплуатации автобуса.

Выводы. Доказана необходимость проведения оценки пассивной безопасности во всем температурном диапазоне эксплуатации автобуса.

Ключевые слова: пассивная безопасность, автобус, кузов из многослойных панелей, влияние температурных условий.

A. S. Vashurin, L. N. Orlov, M. K. Chegurov

ESTIMATION OF TEMPERATURE CONDITIONS' INFLUENCE ON PASSIVE SAFETY OF SHIFT-BUSES

Abstract.

Background. It is well known that one of the most dangerous types of road accidents with buses is a rollover. UNECE Regulation № 66 stipulates the requirements that must be satisfied by the structure of a multipassenger vehicle's body. The specific shift-buses on truck chassis present a separate group of buses and are designed to be used in harsh climatic conditions. Therefore there is an urgent task consisting in assessment of buses' passive safety in the entire temperature range at operating conditions. The paper justifies the choice of a range of temperature conditions for this type of buses that must be taken into account during structure design thereof.

Materials and methods. Research of shift-buses passive safety was made by the finite element method. Experimental dependences were obtained on the modern calibrated equipment.

Results. The authors obtained experimental dependencies of strength characteristics of the materials that are used in shift-buses structures on the temperature. The article presents the developed detailed finite-element models of shift-buses structures. The work includes the results of the study of passive body safety in the temperature range at operating conditions.

Conclusions. The authors proved the necessity of estimating the passive safety of shift-buses' structures in the entire temperature range at operating conditions.

Key words: passive safety, bus, body made of sandwich panels, effect of temperature conditions.

Введение

Повышение пассивной безопасности автобусов является одной из важных задач при разработке новых конструкций или модернизации существующих. Пассивная безопасность автобуса во многом определяется конструкцией его кузова. Оценка пассивной безопасности автобуса может проводиться как по результатам натурных экспериментальных исследований, так и по результатам компьютерного моделирования условий аварийного нагружения. Натурные разрушающие испытания автобусов на пассивную безопасность являются достаточно дорогостоящими, поэтому в настоящее время все большее внимание уделяется расчетным методам оценки их работоспособности в аварийных ситуациях.

Среди существующих конструкций автобусов отдельную группу составляют вахтовые автобусы на шасси грузовых автомобилей. Данные транспортные средства, как правило, эксплуатируются в жестких климатических условиях при широком диапазоне температур. Известно, что характеристики многих конструкционных материалов зависят от температуры. Поэтому выполненная работа является актуальной, а полученные результаты имеют важное значение.

1. Постановка задачи исследования

Пассивная безопасность многоместных пассажирских транспортных средств, в том числе и специальных вахтовых автобусов, регламентируется требованиями Правил ЕЭК ООН № 66. В соответствии с ними при опрокидывании автобуса с уступа высотой 0,8 м кузов должен сохранять регламентированное остаточное жизненное пространство внутри салона.

Автобусы, в соответствии с ГОСТ 15150–69, как правило, изготавливаются в климатическом исполнении для умеренного климата (У) с предельным рабочим диапазоном температур от +45 до –50 °С. Но для наружных поверхностей, подвергаемых нагреву солнцем, верхние значения температуры должны приниматься выше на 15–30 °С. Учитывая то, что вахтовые автобусы эксплуатируются в жестких климатических условиях, целесообразно оценивать их пассивную безопасность в диапазоне температур от +60 до –60 °С. Натурные испытания автобусов в различных климатических условиях потребовали бы наличия нескольких образцов, что связано с определенными трудностями. Кроме того, проведение испытаний автобусов в широком диапазоне

температур достаточно затруднительно. Поэтому наиболее целесообразно, используя Приложение 9 Правил ЕЭК ООН № 66, проводить оценку их пассивной безопасности по результатам компьютерного моделирования [1], которое предполагает использование современных расчетных пакетов программ, основанных на методе конечных элементов.

2. Экспериментальные исследования

В кузовах вахтовых автобусов применяются плакированные и оцинкованные стали, алюминиевые сплавы, композитные материалы, фанера. Для адекватного и полного отображения в расчетных моделях характеристик материалов необходимо проводить испытания образцов материалов. Характеристики материалов получают по результатам гостированных испытаний стандартных образцов.

В зависимости от вида, природы и строения материалы имеют разные прочностные характеристики при той или иной температуре. У металлов чувствительность механических характеристик к изменению температуры зависит от типа кристаллической решетки, присущей данному материалу [2]. У полимерных материалов температурная зависимость механических свойств определяется классом полимера (термопластичные или термореактивные), химическим строением, физической организацией полимеров, морфологией их надмолекулярной структуры, видом и интенсивностью межмолекулярных связей [3].

Поэтому для определения и задания в расчетную модель необходимых механических характеристик материалов во всем исследуемом диапазоне температур были проведены испытания образцов материалов и соединительных элементов, использующихся в кузовах вахтовых автобусов, при различных условиях нагружения. Все испытания проводились на разрывной машине и оборудовании ЦКП «Транспортные системы» НГТУ им. Р. Е. Алексеева. Для обеспечения необходимой температуры образцов были разработаны и изготовлены специальные криостаты, один из которых защищен патентом на полезную модель [4]. Фрагмент испытания образцов материалов при пониженной или повышенной температуре приведен на рис. 1. Установлено, что среди подвергнутых испытанию материалов наиболее чувствительными к температуре окружающей среды оказались композитные материалы. На рис. 2 приведен график зависимости модуля Юнга от температуры. Из графика видно, что при повышении температуры до $t = +60\text{ }^{\circ}\text{C}$ модуль Юнга одного из исследуемых композитных материалов падает более чем на 30 % относительно значений при нормальных условиях, а при температуре $t = -60\text{ }^{\circ}\text{C}$ возрастает примерно на 17 %.

Чувствительными к изменению температуры являются и клеевые композиции, применяемые в вахтовых автобусах. При $t = +60\text{ }^{\circ}\text{C}$ их разрушающее усилие уменьшается до $f_{+60} = 0,547\text{ Н/мм}$ от $f_{+20} = 1,014\text{ Н/мм}$, полученного при $t = +20\text{ }^{\circ}\text{C}$, т.е. оно падает на 46 %. При $t = -60\text{ }^{\circ}\text{C}$ прочность клеевого соединения существенно возрастает. В этом случае при испытаниях разрушение происходит даже не по клеевому слою, а по склеиваемой детали из композита.

У образцов из стали повышение температуры в обозначенном пределе почти не сказывается на прочностных характеристиках. При понижении температуры повышается предел прочности и предел текучести, но снижается

относительное удлинение при разрыве. В зависимости от марки исследуемой стали предел пропорциональности $\sigma_{ПЦ}$ возрастает в пределах 10–32 %, а предел прочности σ_B – на 9,6–12,4 %. Относительное удлинение при этом уменьшается на 14,6–31,3 %. Для используемой фанеры понижение температуры до $t = -60^\circ\text{C}$ вызывает снижение предела прочности более чем на 20 %.



Рис. 1. Фрагмент испытаний на трехточечный изгиб при пониженных температурах

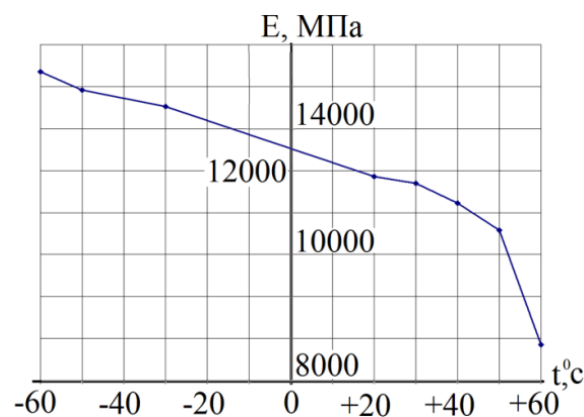


Рис. 2. График зависимости модуля Юнга от температуры для композитного материала

Полученные изменения прочностных свойств материалов соответственно скажутся и на пассивной безопасности кузовов. Поэтому были проведены расчетные исследования по оценке пассивной безопасности в этом

температурном диапазоне для кузовов, имеющих как стальные, так и композитные обшивки многослойных панелей.

3. Компьютерное моделирование

Для получения достоверных результатов при конечно-элементном моделировании опрокидывания автобусов необходимо создавать модели кузовов, максимально учитывающие все особенности конструкций (массово-габаритные параметры, способы соединения элементов конструкций и др.). Поэтому кузов вахтового автобуса из трехслойных панелей был представлен подробной конечно-элементной моделью, состоящей из одномерных стержневых, двумерных оболочечных и трехмерных объемных элементов. Разработанная модель кузова исследуемого автобуса показана на рис. 3, она имеет более 3 000 000 узлов и элементов. Многослойные панели моделировались с помощью оболочечных и объемных элементов соединенных «узел в узел». Клеевое соединение моделировалось с использованием специального связанного контакта с возможностью его разрушения. Заклепки представлялись одномерными разрывными элементами типа WELD с величиной разрывного усилия, равной значению, полученному экспериментально. При моделировании аварийного нагружения кузова воспроизводились условия, аналогичные тем, которые возникают при опрокидывании автобуса.

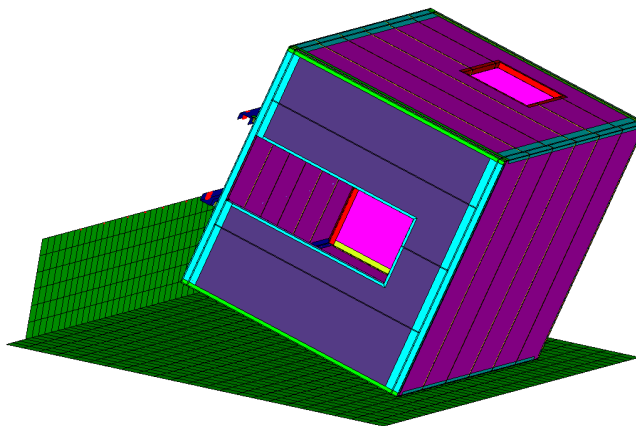


Рис. 3. Общий вид конечно-элементной модели

Результаты компьютерного моделирования условий нагружения кузова вахтового автобуса со стальными обшивками приведены на рис. 4.

На рис. 5 приведены графики изменения разрушающей нагрузки при нормальных условиях 1 и при температуре $t = -60\text{ }^{\circ}\text{C} - 2$. Из графиков видно, что при отрицательной температуре пики в начальный момент удара выше примерно на 11 %, а далее кривые практически совпадают. Из рис. 3 и 4 видно, что для кузовов со стальными обшивками многослойных панелей зависимость пассивной безопасности от температуры выражена слабо.

Результаты моделирования опрокидывания вахтового автобуса с кузовом из панелей с композитными обшивками приведены на рис. 6 и 7. Как было показано выше, композитные материалы более чувствительны к изменению окружающей температуры. Это сказалось и на разном характере разрушения модели кузова в рассматриваемом диапазоне температур.

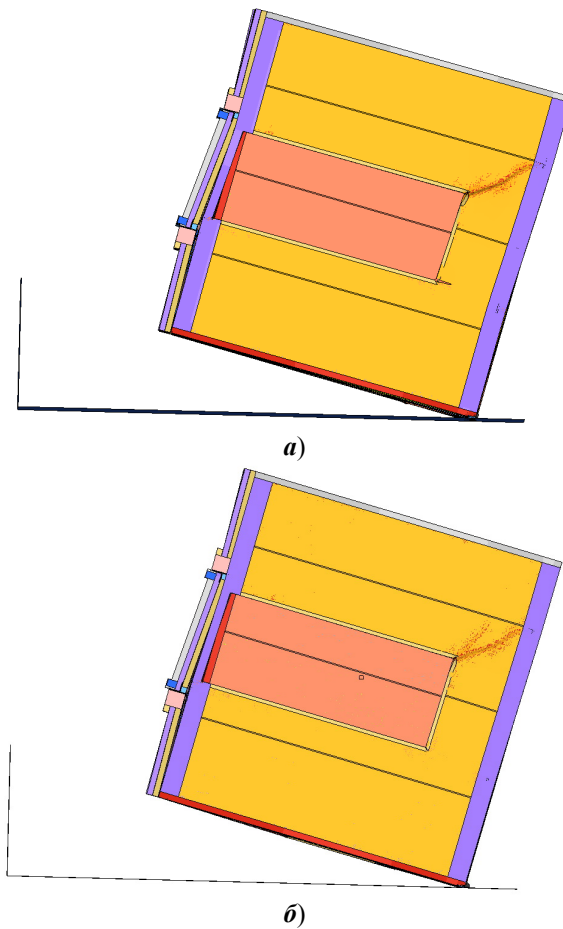


Рис. 4. Деформированный вид модели кузова со стальными обшивками панелей:
 а – при нормальных условиях; б – при температуре $t = -60\text{ }^{\circ}\text{C}$

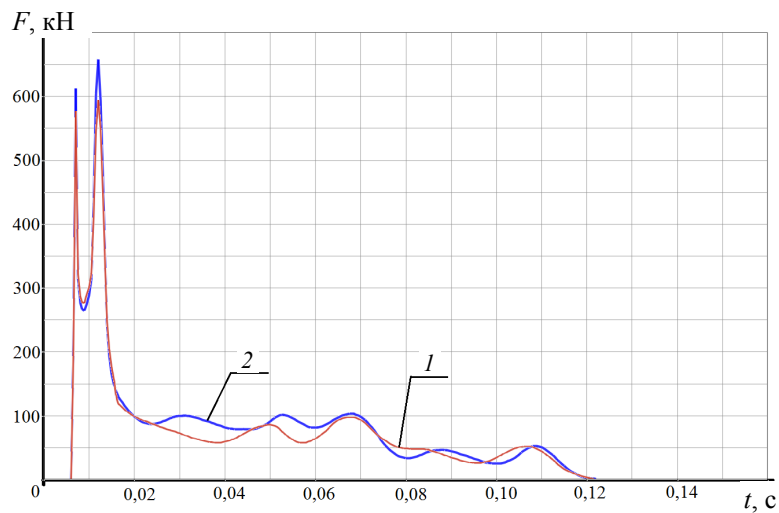


Рис. 5. Графики изменения разрушающей нагрузки для модели кузова со стальными наружными слоями многослойной панели:
 1 – при нормальных условиях; 2 – при температуре $t = -60\text{ }^{\circ}\text{C}$

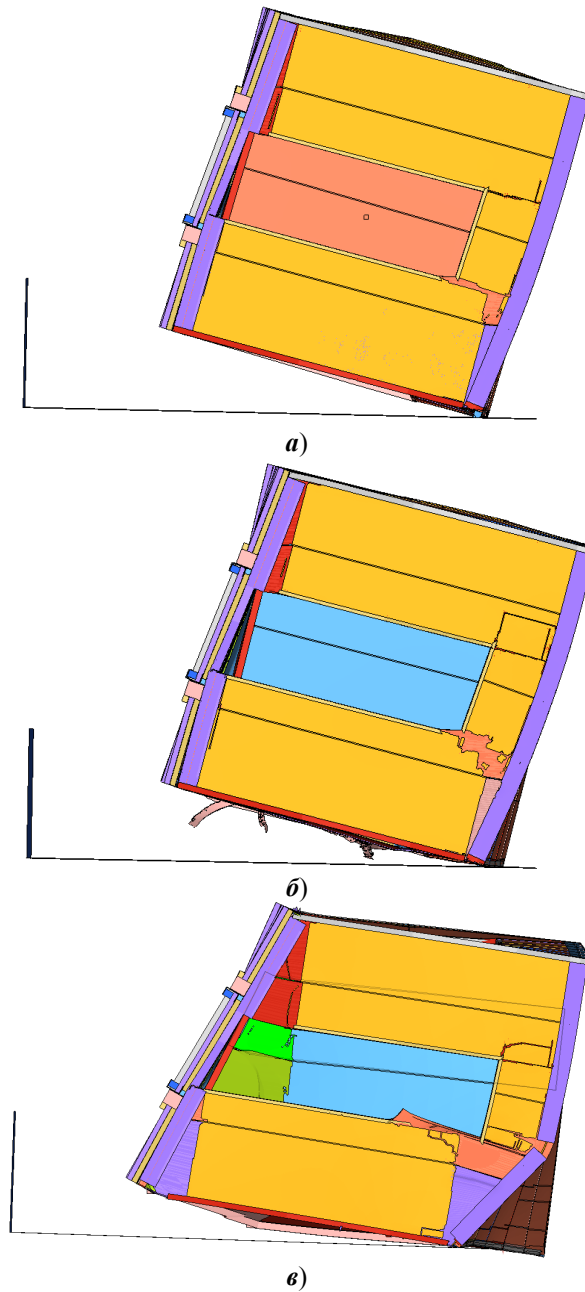


Рис. 6. Деформированные виды модели кузова № 1
с композитными обшивками многослойных панелей:
a – при температуре $t = -60\text{ }^{\circ}\text{C}$; *б* – $t = +20\text{ }^{\circ}\text{C}$; *в* – $t = +60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Как видно из рис. 6 и 7 при нормальных ($t = +20\text{ }^{\circ}\text{C}$) условиях и при $t = -60\text{ }^{\circ}\text{C}$ кузов выдержал ударное нагружение, он полностью поглотил энергию удара, сохранив структурную целостность. А при $t = +60\text{ }^{\circ}\text{C}$ кузов потерял структурную целостность. Разрушилась задняя панель, произошло отсоединение передней панели, фактически кузов разрушился, поглотив только 82 % энергии удара, что подтверждают и графики изменения ударных нагру-

зок, приведенные на рис. 7. Из сравнения графиков видно, что пиковые значения ударной нагрузки при $t = +60\text{ }^{\circ}\text{C}$ меньше на 27 %, а при $t = -60\text{ }^{\circ}\text{C}$ больше на 7 %, чем при $t = +20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

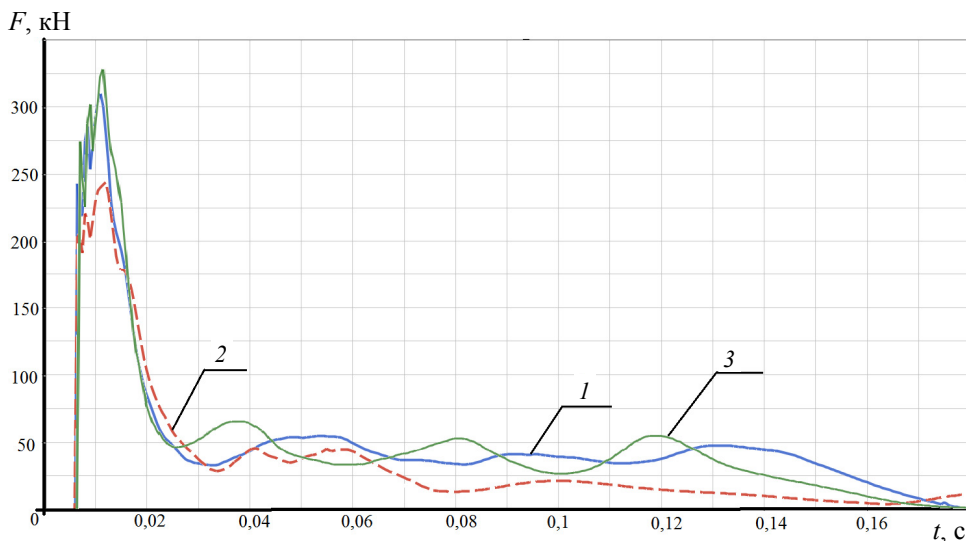


Рис. 7. Графики изменения ударной нагрузки: 1 – при нормальных условиях; 2 – при температуре $t = +60\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – при температуре $t = -60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Закключение

Таким образом, полученные результаты показывают, что оценку пассивной безопасности кузовов необходимо проводить во всем температурном диапазоне эксплуатации автобусов. Выполнение требований Правил ЕЭК ООН № 66 только в нормальных условиях ($t = +20\text{ }^{\circ}\text{C}$) еще не может гарантировать пассивную безопасность автобусов во всем температурном диапазоне. При этом наиболее целесообразно для оценки пассивной безопасности автобусов применять расчетно-экспериментальные методы, позволяющие получать необходимые результаты при меньших материальных затратах, в сравнении с экспериментальными методами.

Список литературы

1. **Вашурин, А. С.** Разработка методики и оценка пассивной безопасности кузовов из многослойных панелей вахтовых автобусов : дис. ... канд. тех. наук. 05.05.03 / Вашурин Андрей Сергеевич. – Н. Новгород, 2014. – 225 с.
2. **Херцберг, Р. В.** Деформация и механика разрушения конструкционных материалов / Р. В. Херцберг ; под. ред. М. Л. Бернштейна, С. П. Ефименко. – М. : Металлургия, 1989. – 576 с.
3. **Крыжановский, В. К.** Технические свойства полимерных материалов : справочник / В. К. Крыжановский, В. В. Бурлов, А. Д. Паниматченко, Ю. В. Крыжановская. – 2-е изд., доп. – СПб. : Профессия, 2005. – 248 с.
4. Патент на полезную модель RU135136U1 МПК G01N3/02. Устройство для испытаний конструкционных материалов на изгиб при нормальных, криогенных и повышенных температурах / Вашурин А. С., Чегуров М. К. – 2013129131/28 ; заявл. 25.06.2013 ; опубл. 27.11.2013.

References

1. Vashurin A. S. *Razrabotka metodiki i otsenka passivnoy bezopasnosti kuzovov iz mnogosloynnykh paneley vakhtovykh avtobusov: dis. kand. tekhn. nauk* [Methodology development and passive safety estimation for shidt-buses' vehicle bodies made of multi-layer panels: dissertation to apply for the degree of the candidate of engineering sciences]. Nizhny Novgorod, 2014, 225 p.
2. Khertsberg R. V. *Deformatsiya i mekhanika razrusheniya konstruktsionnykh materialov* [Deformation and fracture mechanics of structural materials]. Moscow: Metallurgiya, 1989, 576 p.
3. Kryzhanovskiy V. K., Burlov V. V., Panimatchenko A. D., Kryzhanovskaya Yu. V. *Tekhnicheskie svoystva polimernykh materialov: spravochnik* [Technical properties of polymeric materials: reference book]. Saint Petersburg: Professiya, 2005, 248 p.
4. Useful model patent of the Russian Federation RU135136U1 MPK G01N3/02. Device for angular testing of structural materials at normal, cryogenic and high temperatures]. Vashurin A. S., Chegurov M. K. 2013129131/28; appl. 25 June 2013; publ. 27 November 2013.

Вашурин Андрей Сергеевич

старший преподаватель, кафедра автомобилей и тракторов, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева (Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24)

E-mail: andreyctg@gmail.com

Vashurin Andrey Sergeevich

Senior lecturer, sub-department of automobiles and tractors, Nizhny Novgorod State Technical University named after R. Y. Alekseev (24 Minina street, Nizhny Novgorod, Russia)

Орлов Лев Николаевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автомобилей и тракторов, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева (Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24)

E-mail: ait.ngtu@gmail.com

Orlov Lev Nikolaevich

Doctor of engineering sciences, professor, head of sub-department of automobiles and tractors, Nizhny Novgorod State Technical University named after R. Y. Alekseev (24 Minina street, Nizhny Novgorod, Russia)

Чегуров Михаил Константинович

кандидат технических наук, доцент, кафедра материаловедения, технологии материалов и термической обработки металлов, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева (Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24)

E-mail: mkchegurov@mail.ru

Chegurov Mikhail Konstantinovich

Candidate of engineering sciences, associate professor, sub-department of materials science, materials technology and thermal treatment, Nizhny Novgorod State Technical University named after R. Y. Alekseev (24 Minina street, Nizhny Novgorod, Russia)

УДК 629.34

Вашурин, А. С.

Оценка влияния температурных условий эксплуатации на пассивную безопасность вахтовых автобусов / А. С. Вашурин, Л. Н. Орлов, М. К. Чегуров // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 4 (32). – С. 102–111.

Д. Б. Крюков, А. В. Прыщак, М. С. Гуськов

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНФИГУРАЦИИ УПРОЧНЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА МОДЕЛЕЙ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМЫ ТИТАН-АЛЮМИНИЙ

Аннотация.

Актуальность и цели. Описывается проблема получения композиционных материалов, обладающих повышенным комплексом физико-механических свойств. Также раскрывается актуальность модернизации существующих схем упрочнения материалов системы титан-алюминий.

Материалы и методы. Для изучения влияния геометрических параметров упрочняющих элементов на свойства композиционного материала было принято решение о разработке математической модели материала. Создание модели и задание граничных условий производилось в программе SolidWorks, а моделирование проводилось с использованием интегрированного пакета прикладных программ CosmosWorks. Исследуемые образцы слоистого композиционного материала подвергали моделированию процесса одноосного разрушения.

Результаты. Полученные результаты и эпюры напряженно-деформированного состояния подтвердили предположения, выдвинутые в начале исследования. Наиболее важные из которых: использование перфорированных пластин в качестве упрочняющего слоя является предпочтительнее, чем использование пластин без перфораций; величина прочности слоистого композиционного материала с перфорированным армирующим слоем с коническими отверстиями составила 591 МПа, что на 19 % выше, чем у технически чистого титана аналогичной толщины.

Выводы. На основании результатов можно сделать вывод о необходимости проведения дальнейших исследований, связанных с проверкой полученных результатов компьютерного моделирования на натурных образцах.

Ключевые слова: интерметаллид титана Ti_3Al , слоистый композиционный материал, армирование, упрочняющий перфорированный слой.

D. B. Kryukov, A. V. Pryshchak, M. S. Gus'kov

RESEARCH OF HARDENERS' CONFIGURATION INFLUENCE ON STRENGTH PROPERTIES OF TITANIUM-ALUMINUM COMPOSITE MATERIALS' MODELS

Abstract.

Background. The article describes the problem of obtaining the composite materials, featuring the increased complex of physical-mechanical properties. The work also reveals the relevance of modernization of the existing schemes of titanium-aluminum materials hardening.

Materials and methods. In order to study the influence of geometrical parameters of hardeners on composite material's properties, the authors made a decision to develop a mathematical model of the material. The model was created and the boundary conditions were set in the SolidWorks program. Simulation was conducted in the

CosmosWorks integrated application package. The samples of the layered composite material under investigation were subject to uniaxial modeling of destruction.

Results. The received results and diagrams of the stress-strain state confirmed the assumptions made at the beginning of research. The most important of which are the following: usage of perforated plates as a reinforcing layer is preferable compared to plates without perforation; the ultimate strength of the layered composite material with a reinforcing layer, perforated with conical holes, was 591 MPa, which is 19% higher than in technically pure titanium of similar thickness.

Conclusions. On the basis of the results it is possible to draw a conclusion on the need of carrying out further researches relating to verification of the received results of computer modeling on natural samples.

Key words: titanium intermetallic Ti_3Al , layered composite material, reinforcing, perforated reinforcing layer.

Введение

Развитие современного машиностроения тесным образом связано с новыми достижениями и разработками в области материаловедения, а именно в отрасли создания новых конструкционных материалов. Зачастую комплекс требований, предъявляемый к современным конструкционным материалам, не может быть реализован на базе существующих сегодня металлов и сплавов. В связи с чем уже на протяжении нескольких десятилетий происходит постепенный переход и замена монометаллов композиционными материалами, в которых в качестве упрочняющих элементов используются направленные кристаллы, нити (волокна), слои материалов, обладающие повышенным комплексом физико-механических свойств. Однако данные упрочняющие композиционный материал элементы, наряду с высокими прочностными свойствами, имеют низкие показатели пластичности и в чистом виде имеют повышенную хрупкость. Примером этого может послужить интерметаллид титана Ti_3Al , который широко используется в качестве упрочняющего материала в изделиях судостроения, авиастроения и общего машиностроения [1]. В настоящее время продолжается разработка новых схем армирования и поиск материалов, обладающих повышенным комплексом механических свойств и лишенных недостатков, присущих уже известным композиционным материалам. В этой связи актуальной задачей является задача модернизации существующих схем получения композиционных материалов на основе Ti_3Al .

1. Методы и материалы исследования

Для изучения влияния геометрических параметров армирующих элементов на конечные свойства композиционного материала в целом было принято решение о создании адекватной математической модели нового композиционного материала, учитывающей физико-механические свойства отдельных элементов.

Таким образом, была использована комплексная методика разработки модели композиционного армированного материала и компьютерного моделирования, включающая создание моделей с различной геометрией упрочняющего слоя на основе алюминид титана в программе SolidWorks, задание граничных условий нагружения, компьютерное моделирование процесса

одноосного разрушения для всех исследуемых образцов в приложении CosmosWorks. Кроме того, был проведен комплексный анализ полученных результатов компьютерного моделирования процесса одноосного разрушения для всех типов образцов. Было установлено, что программа SolidWorks позволяет полностью моделировать не только геометрию образца и задать марку материала, но воспроизвести в модели приложение нагрузки к рабочим поверхностям композита, а также учесть глобальный и локальный контакт между поверхностями листовых материалов внутри композиционного материала, что является весьма важным критерием с точки зрения динамики деформационных процессов разрушения. Процесс моделирования одноосного растяжения также производился с использованием интегрированного пакета прикладных программ CosmosWorks. Данный продукт обладает обширной библиотекой конечных элементов, которая включает плоские, пространственные элементы, балки, пластины, многослойные анизотропные элементы и т.д., а также позволяет решать задачи с упругими, вязко-упругими, упруго-пластичными, анизотропными и другими моделями материалов [2].

Для создания моделей заготовок были выбраны следующие материалы: технически чистый титан марки Вt1-0, алюминий марки Ад1, интерметаллический упрочняющий слой – алюминид титана Ti_3Al . Исследуемые заготовки не отличались геометрическими размерами и маркой материалов и представляли собой слоистый композиционный материал (СКМ) без перфораций в упрочняющем слое рис. 1.

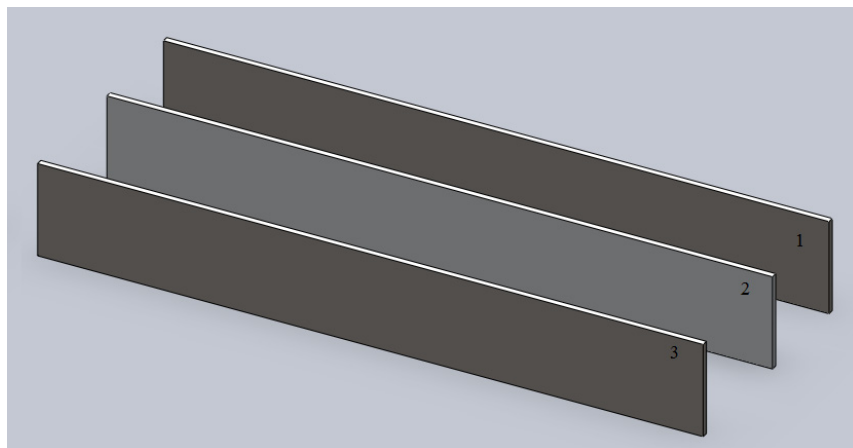


Рис. 1. Составляющие элементы слоистого композиционного материала:
1, 3 – внешние титановые пластины; 2 – упрочняющий интерметаллический слой без перфораций

Геометрические параметры для всех пластин, изготовленных из титана, составили $1,3 \times 20 \times 140$ мм, для слоя из алюминида титана – $0,4 \times 20 \times 140$ мм. У образцов первой партии крайние пластины были изготовлены из технически чистого титана, а промежуточный слой – из алюминида титана. Основное отличие образцов второй партии заключалось в наличии цилиндрических перфораций в промежуточном слое. Размеры перфораций составили $\varnothing 10$ мм, межосевое расстояние 20 мм. Модель заготовки с выполненными в ней цилиндрическими перфорациями представлена на рис. 2.

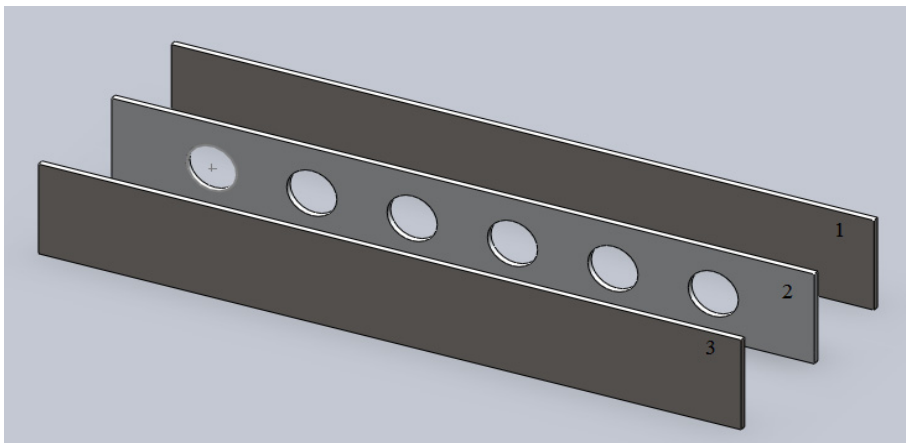


Рис. 2. Составляющие элементы слоистого композиционного материала:
1, 3 – внешние титановые пластины; 2 – упрочняющий
интерметаллический слой с цилиндрическими перфорациями

У образцов третьей партии перфорации в упрочняющем слое выполнялись конической формы, противоположно направленными и расположенными в шахматном порядке. Размеры перфораций составили: $\varnothing 10$ мм – меньшее основание, $\varnothing 15$ мм – большее основание, межосевое расстояние – 20 мм. Модель заготовки с выполненными в ней коническими перфорациями представлена на рис. 3.

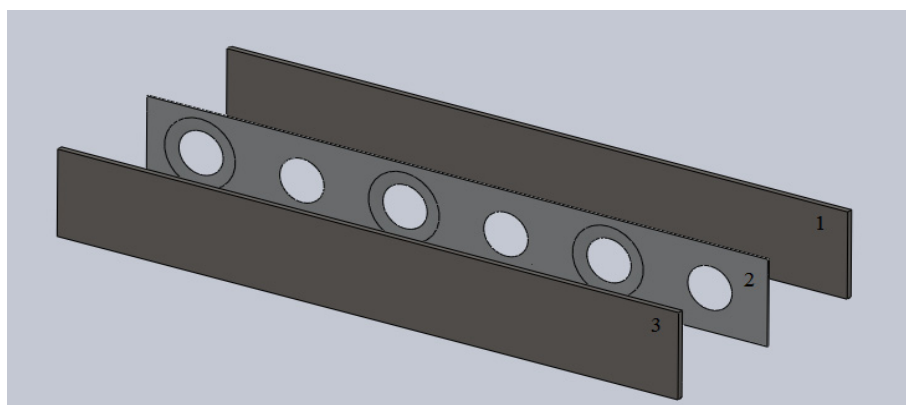


Рис. 3. Составляющие элементы слоистого композиционного материала:
1, 3 – внешние титановые пластины; 2 – упрочняющий
интерметаллический слой с коническими перфорациями

С учетом того, что геометрические параметры и конфигурация промежуточного армирующего слоя также оказывает влияние на изменение прочностных свойств композиционного материала, авторами был проведен анализ на предмет перераспределения внутренних напряжений в композиционном материале с использованием предложенного ими перфорированного промежуточного армирующего слоя.

Основными целями компьютерного моделирования было получение прочностных характеристик всех исследуемых композиционных материалов,

получение эпюр напряженно-деформированного состояния в композитах, а также выявление наиболее вероятных мест разрушения. Величина минимальной нагрузки при одноосном растяжении выбиралась исходя из справочных данных и увеличивалась до того момента, пока нагрузка не достигнет значений, равных пределу прочности материала. В экспериментах с многослойным композиционным армированным материалом ориентиром служило значение прочности наиболее прочного материала [3]. Как только образец достигает данной величины, эксперимент останавливается, а значение фиксируется. Дополнительным критерием разрушения служил коэффициент запаса прочности.

2. Результаты экспериментов и их обсуждение

В результате моделирования были получены данные по пределу и запасу прочности. Данные результаты, а также необходимые результаты для дальнейших расчетов сведены в табл. 1.

Таблица 1
Исходные и полученные данные для расчета прочностных свойств

Материал	Плотность, г/см ³	Величина нагрузки, Н	Предел прочности, МПа	Запас прочности	Удельная прочность, кМ
Слоистый композиционный материал Вт1-0 – Ti ₃ Al – Вт1-0	4,47	31000	529	0,75	11,8
Слоистый композиционный материал с цилиндрическими перфорациями Вт1-0 – Ti ₃ Al – Вт1-0	4,36	33500	560	0,9	12,8
Слоистый композиционный материал с коническими перфорациями Вт1-0 – Ti ₃ Al – Вт1-0	4,34	35500	591	0,81	13,6

Данные, полученные в ходе компьютерного моделирования образцов из слоистых композиционных материалов, армированных упрочняющим интерметаллическим слоем, а также эпюр напряженно-деформированного состояния, позволили подтвердить выдвинутые предположения авторов об увеличении прочностных свойств композиционных материалов с интерметаллическим слоем. Результаты моделирования подтверждают теорию, развитую в работе [4] о том, что композиционные материалы с упрочняющим слоем проявляют свои повышенные прочностные свойства лишь в диапазоне от 5 до 80 % объема наполнителя. В первую очередь это связано с тем, что образование сплошного хрупкого слоя интерметаллических соединения типа Ti_nAl_m является средой для распространения трещин. И при незначительной нагрузке исследуемый образец будет разрушен именно по данной хрупкой прослойке.

Однако за счет использования в качестве армирующего элемента перфорированного слоя предотвращается развитие сплошных трещин, так как на границах раздела фаз алюминий–титан происходит химическое взаимодействие алюминия и титана, в результате чего образуется интерметаллид Ti_3Al , который в виде дисперсных частиц образует твердый каркас по границам дендритных ячеек. В местах контакта металла-основы и армирующего металла образуются слои, состоящие из твердых высокопрочных интерметаллидов, которые способствуют увеличению модуля упругости композиционного материала [5]. Контакт двух металлов не является сплошным, площадь контакта равна разности общей площади листа и суммарной площади каналов, выполненных в армирующем металле. При этом зона контакта равномерно распределена по площади листов и представляет собой локальные участки. Отмеченные локальные участки твердых интерметаллических слоев способствуют увеличению прочности сварного соединения алюминия и титана [6]. Промежутки между локальными участками интерметаллических слоев заполняются более мягким титаном, который противодействует распространению микротрещин по всему материалу в случае, если они по каким-либо причинам возникают в интерметаллических слое.

Кроме того, форма и распределение перфорирующих элементов также оказывают влияние на конечные физико-механические свойства. В работе [7] приведены основные существующие конфигурации упрочняющих элементов. Приняв исследуемую модель за двоякопериодическую решетку и исключив краевые эффекты, задачу свели к расчету напряженно-деформированного состояния. Данные расчеты бигармонических уравнений показывают, что наиболее рациональным является использование цилиндрических отверстий.

Но при больших толщинах упрочняющего слоя (более 2 мм) возникает проблема равномерного распределения материала матрицы в пустотах армирующей пластины. В связи с этим было принято решение о модернизации формы отверстий из цилиндрической в коническую, которая способствует более полному заполнению отверстий. Учитывая силу реакции опоры, конические отверстия выполняли противоположно-направленными и располагали в шахматном порядке.

Заключение

На основании полученных в ходе моделирования значений и зависимостей можно сделать следующие выводы:

1. Использование перфорированных пластин в качестве упрочняющего слоя в слоистых композиционных материалах является предпочтительнее, чем использование пластин без перфораций.

2. Изменение конфигурации перфораций с цилиндрических на конические повышает объем проникновения металла матрицы в армирующий металл и тем самым увеличивает значение удельной прочности на 5–7 %.

3. В ходе компьютерного моделирования были получены значения прочности всех исследуемых композиционных материалов. Наилучшие прочностные характеристики показал слоистый композиционный материал с перфорированным армирующим слоем с коническими отверстиями. Величина прочности для него составляет 591 МПа, что на 19 % выше, чем у технически чистого титана аналогичной толщины.

На основании вышеприведенных результатов можно сделать заключение о необходимости проведения дальнейших исследований, связанных с проверкой полученных результатов компьютерного моделирования на натуральных образцах.

Список литературы

1. **Анциферов, В. Н.** Волокнистые композиционные материалы на основе титана / В. Н. Анциферов, Ю. В. Соколкин, А. А. Ташкинов. – М. : Наука, 1990. – 136 с.
2. **Алямовский, А. А.** *CosmosWorks. Основы расчета конструкций в среде SolidWorks* / А. А. Алямовский. – М. : ДМК Пресс, 2010. – 784 с.
3. Heat-Resistant Composite Materials by Explosive Welding and Micro-Arc Oxidation / D. B. Kryukov, A. O. Krivenkov, S. N. Chugunov, E. W. Vorob'ev, M. S. Gus'kov, A. V. Khorin, and M. A. Okin // *Explosive Produktion of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovations* / ed. by A. A. Deribas and Yu. B. Scheck. – Cracow, Poland, 2014. – P. 114–115.
4. *Материаловедение : учебник для вузов* / Б. Н. Арзамасов, В. И. Макарова, Г. Г. Мухин, Н. М. Рыжов, В. И. Силаева. – 8-е изд. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 646 с.
5. Моделирование деформационного процесса в задачах армирования и сварки взрывом с применением программы LS-DYNA / А. В. Хорин, А. Е. Розен, И. С. Лось, А. Ю. Муйземнек, Е. А. Журавлев // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. – 2010. – № 1 (13). – С. 123–133.
6. Заявка на изобретение РФ № 2013119389/02. Способ получения композиционного материала / Розен А. Е., Крюков Д. Б., Киринов Е. М., Гуськов М. С., Хорин А. В., Усатый С. Г., Любомирова Н. А. – 26.04.2013.
7. **Григолюк, Э. И.** Перфорированные пластины и оболочки / Э. И. Григолюк, Л. А. Фильштинский. – М. : Наука, 1970. – 556 с.

References

1. Antsiferov V. N., Sokolkin Yu. V., Tashkinov A. A. *Voloknistye kompozitsionnye materialy na osnove titana* [Fibrous titanium-based composite materials]. Moscow: Nauka, 1990, 136 p.
2. Alyamovskiy A. A. *CosmosWorks. Osnovy rascheta konstruktсий v srede SolidWorks* [CosmosWorks. Fundamentals of design calculation in SolidWorks environment]. Moscow: DMK Press, 2010, 784 p.
3. Kryukov D. B., Krivenkov A. O., Chugunov S. N., Vorob'ev E. W., Gus'kov M. S., Khorin A. V. and Okin M. A. *Explosive Produktion of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovations*. Ed. by A. A. Deribas and Yu. B. Scheck. Cracow, Poland, 2014, pp. 114–115.
4. Arzamasov B. N., Makarova V. I., Mukhin G. G., Ryzhov N. M., Silaeva V. I. *Materialovedenie: uchebnik dlya vuzov* [Materials science: textbook for universities]. Moscow: MGTU im. N. E. Bauman, 2008, 646 p.
5. Khorin A. V., Rozen A. E., Los' I. S., Muiyemnek A. Yu., Zhuravlev E. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2010, no. 1 (13), pp. 123–133.
6. Invention application RF № 2013119389/02. Method of the composite material production. Rozen A. E., Kryukov D. B., Kirin E. M., Gus'kov M. S., Khorin A. V., Usatyy S. G., Lyubomirova N. A., publ. 26 April 2013.
7. Grigolyuk E. I., Fil'shtinskiy L. A. *Perforirovannye plastiny i obolochki* [Perforated plates and shells]. Moscow: Nauka, 1970, 556 p.

Крюков Дмитрий Борисович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра сварочного, литейного
производства и материаловедения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: demonisimus@yandex.ru

Прыщак Алексей Валерьевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра сварочного, литейного
производства и материаловедения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: demonisimus@yandex.ru

Гуськов Максим Сергеевич

аспирант, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: aspirantSLPiM@yandex.ru

Kryukov Dmitriy Borisovich

Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of welding,
foundry production and materials science,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Pryshchak Aleksey Valer'evich

Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of welding,
foundry production and materials science,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Gus'kov Maksim Sergeevich

Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

УДК 669.018.2

Крюков, Д. Б.

Исследование влияния конфигурации упрочняющих элементов на прочностные свойства моделей композиционных материалов системы титан-алюминий / Д. Б. Крюков, А. В. Прыщак, М. С. Гуськов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 4 (32). – С. 112–119.

В. Н. Ашанин, А. А. Мельников, С. А. Цуриков

ИЗМЕРИТЕЛЬ МГНОВЕННОГО МАССОВОГО РАСХОДА ВОЗДУХА ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ АВТОМОБИЛЯ

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования являются датчики массового расхода воздуха для электронных систем управления двигателем автомобиля. Предметом исследования является микропроцессорный измеритель мгновенного массового расхода воздуха, в котором реализован ультразвуковой способ измерения. Целью работы является расширение функциональных возможностей и повышение точности измерителя мгновенного массового расхода воздуха за счет использования способа измерения фазового сдвига ультразвуковых волн, распространяющихся по и против воздушного потока.

Материалы и методы. Исследования метрологических характеристик разработанного средства измерения с реализацией натурного макета чувствительного элемента и схмотехнического решения на основе виртуального лабораторного комплекса NI ELVIS.

Результаты. Разработаны конструкция ультразвукового датчика, структурная и принципиальная схемы электронного микропроцессорного блока обработки информации и алгоритм функционирования измерителя массового расхода воздуха в штатном и внештатном режимах. Устройство может быть использовано в составе электронных систем автоматического управления бензиновым двигателем внутреннего сгорания транспортного средства.

Выводы. Микропроцессорный измеритель мгновенного массового расхода воздуха обеспечивает возможность измерять массовый расход воздуха в двух направлениях с повышенной точностью, используя результаты измерений мгновенного значения температуры и плотности воздушной среды.

Ключевые слова: электронный блок управления, измеритель расхода воздуха, ультразвуковой преобразователь, фазовый сдвиг ультразвуковых волн, метрологические характеристики.

V. N. Ashanin, A. A. Mel'nikov, S. A. Tsurikov

INSTANTANEOUS MASS AIR CONSUMPTION METER FOR CAR ENGINE CONTROL SYSTEMS

Abstract.

Background. The research object is the mass air consumption meters for electronic systems of car engine control. The research subject is a microprocessor instantaneous mass air consumption meter that features the method of ultrasound measurement. The aim of the work is to expand functional capacities and to improve accuracy of the instantaneous mass air consumption meter by using the method of ultrasound waves' phase shift measurement that spread up and down the air flow.

Materials and methods. The authors researched metrological characteristics of the developed measurement device with realization of a full-size sensing element sample and schematic solution on the basis of the NI ELVIS virtual laboratory complex.

Results. The authors developed an ultrasound sensor's construction, structural and principal schemes of an electronic microprocessor unit of data processing and a functioning algorithm for the mass air consumption meter in normal and extreme modes. The device can be used as a part of electronic systems of gasoline internal-combustion engine control.

Conclusions. The microprocessor instantaneous mass air consumption meter provides an opportunity to measure mass air consumption in both directions with improved accuracy using the results of instantaneous temperature and air density measurements.

Key words: electronic control unit, air consumption meter, ultrasonic transducer, phase shift of ultrasonic wave, metrological characteristics.

Введение

Для определения нагрузки бензинового двигателя внутреннего сгорания (ДВС) автомобиля большинство современных электронных систем управления содержат термоанемометрические датчики массового расхода воздуха [1, 2]. К их основным недостаткам следует отнести низкие надежность функционирования и точность измерения массового расхода. Это связано с расположением чувствительного элемента датчика в потоке всасываемого воздуха, что приводит к сильному влиянию на работоспособность и показания датчика различных загрязнений. Кроме того, анемометрические датчики не могут определять направление воздушного потока, что ухудшает характеристики датчика при сильно пульсирующих потоках, когда наряду с прямыми потоками возникают и обратные воздушные потоки [1, 3].

В связи с этим создание точного и надежного расходомера, определяющего мощностные, экологические и экономические характеристики ДВС автомобиля, является актуальной задачей.

1. Конструкция и принцип работы расходомера

Повысить метрологические и эксплуатационные характеристики измерителя расхода воздуха возможно при использовании ультразвуковых методов. С этой целью в большинстве промышленных и бытовых ультразвуковых расходомеров используется времяпролетный принцип измерения с применением двух и более ультразвуковых преобразователей [4, 5].

В этом случае точность измерения скорости воздушного потока в основном определяется точностью измерения времен распространения ультразвуковых сигналов, излученных по и против потока [5]. Недостатком подобных технических решений является невысокая точность измерения из-за сильной зависимости скорости ультразвука от температуры. Данный способ вычисления расхода газа или жидкости приемлем для бытовых устройств, где параметры потока меняются незначительно. Кроме того, существующие ультразвуковые расходомеры жидкостей и газов, применяемые в промышленности, измеряют объемный, а не массовый расход, как того требует система управления ДВС автомобиля. Если применить его для автомобильного расходомера, то будет значительная погрешность при изменении температуры всасываемого воздуха.

С целью повышения метрологических характеристик измерителя массового расхода воздуха предлагается использовать в качестве информативно-

го сигнала не время распространения ультразвуковых сигналов [5], а фазовый сдвиг между ультразвуковыми волнами, распространяющимися по потоку воздуха и против него.

В этом случае конструктивно ультразвуковой датчик (рис. 1) состоит из трех ультразвуковых преобразователей, один из которых является источником (излучающим ультразвуковым преобразователем – ИУЗП), а два других – приемниками ультразвуковых импульсов (принимающими ультразвуковыми преобразователями – ПУЗП1,2), двух усилителей напряжения У1,2 и двух фазовых детекторов ФД1,2.

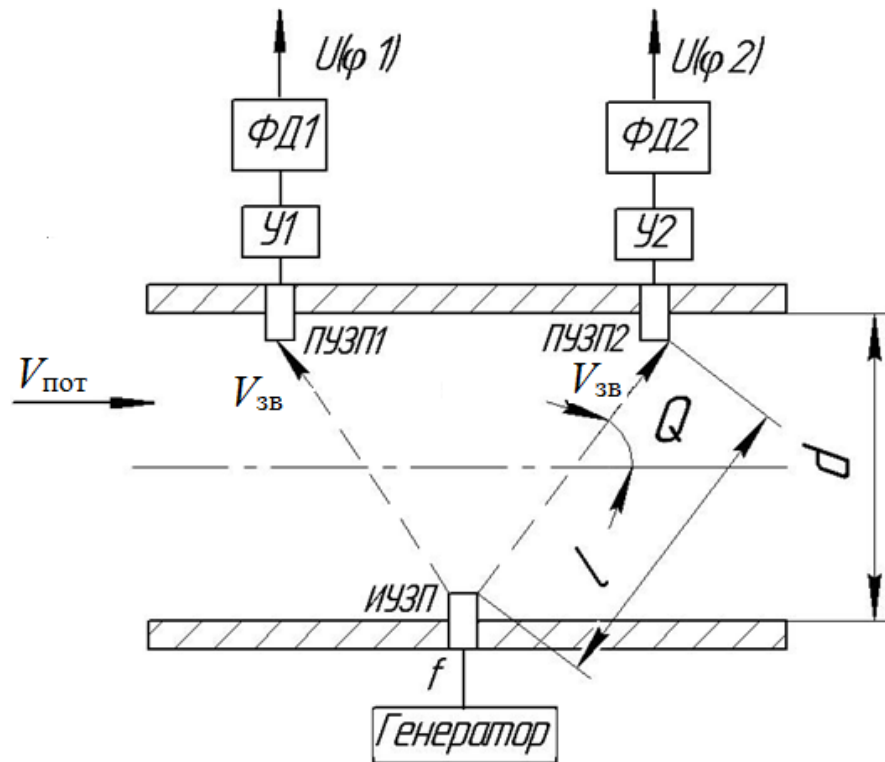


Рис. 1. Конструкция ультразвукового датчика расходомера

Время прохождения ультразвуковым сигналом воздушного потока зависит от длины пути l в потоке, которое определяется диаметром трубопровода d , углом ввода ультразвука в поток θ , а также скоростью ультразвука в воздушном потоке $V_{зв}$ и скоростью движения потока $V_{пот}$.

Исходными данными для вычисления массового расхода воздуха являются фазовые сдвиги сигналов с принимающих ультразвуковых преобразователей:

$$\varphi_1 = \frac{l}{V_{зв} - V_{пот} \cos \Theta} \cdot \omega, \quad \varphi_2 = \frac{l}{V_{зв} + V_{пот} \cos \Theta} \cdot \omega,$$

где ω – частота ультразвуковых колебаний.

В результате совместного решения приведенных выше уравнений можно определить скорость потока воздуха:

$$V_{\text{пот}} = \frac{l \cdot \omega \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)}{2\varphi_1 \cdot \varphi_2 \cdot \cos \Theta}.$$

Как видно из полученной формулы, скорость потока воздуха зависит от сдвига фаз φ_1 , φ_2 и не зависит от скорости ультразвука в воздушном потоке $V_{\text{зв}}$. Параметры l , ω , $\cos \theta$ являются константами, определяемыми конструкцией ультразвукового датчика.

Определив скорость потока воздуха $V_{\text{пот}}$, можно определить объемный расход воздуха W по формуле

$$W = V_{\text{пот}} \cdot S = V_{\text{пот}} \cdot \pi \frac{d^2}{4},$$

где S – площадь сечения трубопровода.

Масса m расходуемого воздуха во входном коллекторе ДВС связана с его плотностью ρ и объемом W

$$m = W \cdot \rho.$$

Плотность воздуха можно найти по известной формуле

$$\rho = \frac{p \cdot M}{R \cdot T},$$

где p – абсолютное давление; M – молярная масса; R – универсальная газовая постоянная; T – температура, К.

Для измерения абсолютного давления в разработанном измерителе используется промышленный датчик абсолютного давления. Температура воздуха вычисляется по температурной зависимости скорости ультразвука на основе эмпирической формулы [4]:

$$V_{\text{зв}} = V_{\text{зв}}(0^\circ) + 0,59 \cdot T_C,$$

где $V_{\text{зв}}(0^\circ)$ – скорость звука в воздухе при 0°C , равная 331 м/с; T_C – температура по шкале Цельсия.

Результатом несложных преобразований является конечная формула для вычисления мгновенного массового расхода воздуха:

$$m = \frac{l\omega(\varphi_1 - \varphi_2)}{2\varphi_1\varphi_2 \cos \theta} \pi \frac{d^2}{4} \frac{pM}{R \cdot \left[1,695 \cdot \left(\frac{l\omega(\varphi_1 + \varphi_2)}{2\varphi_1\varphi_2} - V_{\text{зв}}(0^\circ) \right) + 273 \right]}.$$

2. Реализация и экспериментальные исследования расходомера

В соответствии с полученной формулой для вычисления массового расхода воздуха разработана структурная схема ультразвукового измерителя мгновенного массового расхода воздуха, представленная на рис. 2.

В штатном режиме синусоидальный сигнал поступает с генератора на излучающий ультразвуковой преобразователь. Ультразвуковая волна, проходя через поток воздуха, поступает на принимающие ультразвуковые преобразователи, находящиеся по направлению потока воздуха и против. В зависимости от скорости потока воздуха изменяются фазы ультразвуковых волн.

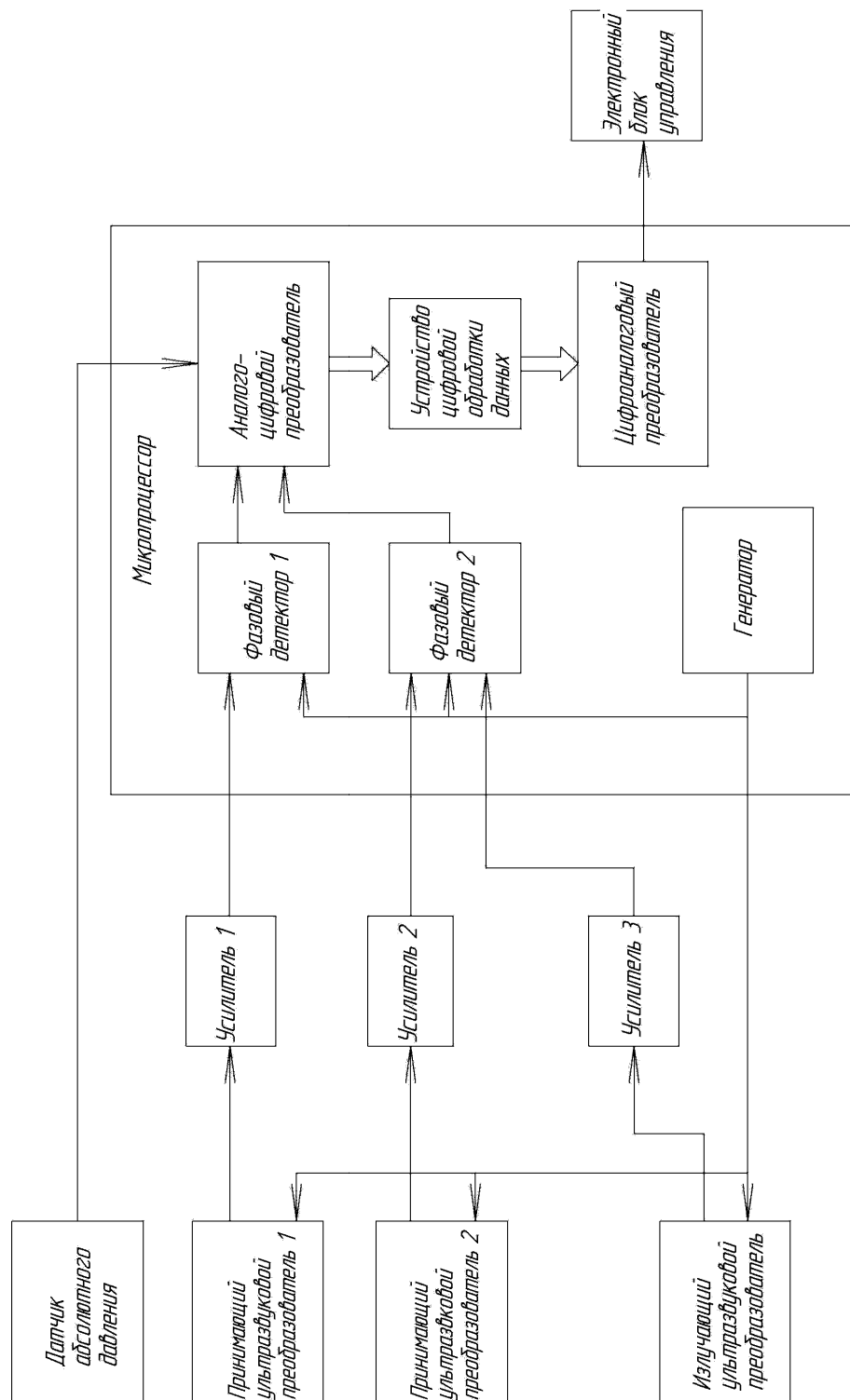


Рис. 2. Схема электрическая структурная ультразвукового измерителя мгновенного массового расхода воздуха

Переменное напряжение с ультразвуковых преобразователей усиливается и передается на блок вычисления фазового сдвига относительно сигнала с генератора. Полученные значения преобразуются в цифровой код и поступают на блок определения мгновенного массового расхода. Полученный расход преобразуется в электрическое напряжение и передается в электронный блок управления ДВС автомобиля.

С целью обеспечения функционирования измерителя расхода воздуха во внештатных режимах предусмотрены дополнительные режимы работы при выходе из строя одного из ультразвуковых преобразователей.

При выходе из строя одного из ПУЗП расходомер будет работать по принципу времяпролетного измерения скорости потока воздуха. При выходе из строя ИУЗП расходомер также будет работать по времяпролетному принципу, но излучение и прием ультразвуковой волны будет поочередно осуществляться принимающими ультразвуковыми преобразователями с отражением ультразвуковой волны от противоположной стенки расходомера.

Принципиальная схема ультразвукового измерителя расхода реализована на основе 32-разрядного микропроцессора типа ST32F103RET6 (рис. 3). Сигнал с ультразвуковых преобразователей усиливается операционным усилителем МСР6004 и обрабатывается микропроцессором DDI. Измерение абсолютного давления $DA3$ производится датчиком типа HP03S. Стабилизатор напряжения выполнен на микросхеме DA2 типа MCP1703T. На выходе микропроцессора формируется электрическое напряжение, которое передается в электронный блок управления ДВС автомобиля.

Экспериментальные исследования были проведены на основе разработанного макетного образца чувствительного элемента датчика и реализованной цепи обработки сигнала с ультразвуковых преобразователей на основе лабораторного комплекса NI Elvis (рис. 4). Вычисление массового расхода воздуха происходит по программе, составленной в программной среде LabView (рис. 5). При проведении лабораторного эксперимента к трубопроводу с ультразвуковыми пьезоэлементами, являющимися чувствительной частью датчика массового расхода воздуха, присоединялся вентилятор, создающий поток воздуха с регулируемой скоростью.

Экспериментальные данные зависимости массового расхода воздуха m от разности фаз $\Delta\varphi$ представлены в табл. 1. На рис. 6 представлен график данной зависимости.

Для более точного определения передаточной функции ультразвукового датчика мгновенного массового расхода воздуха необходимо использование задатчика потока воздуха с нормированными метрологическими характеристиками, с точностными параметрами выше, чем у разработанного датчика во всем диапазоне изменения воздушного потока, т.е. от 0 до 500 кг/ч.

Второй возможный путь аттестации датчика предполагает сравнение показаний разрабатываемого датчика с эталонным (образцовым) датчиком, имеющим точность преобразования не менее чем в 2 раза превосходящую точность разрабатываемого датчика.

В расходомерах, в которых используется способ определения массового расхода через скорость ультразвуковой волны, исходящий ультразвуковой сигнал принимается с некоторым запаздыванием, зависящим от уровня фонового шума ДВС, что является причиной повышения погрешности измерения.

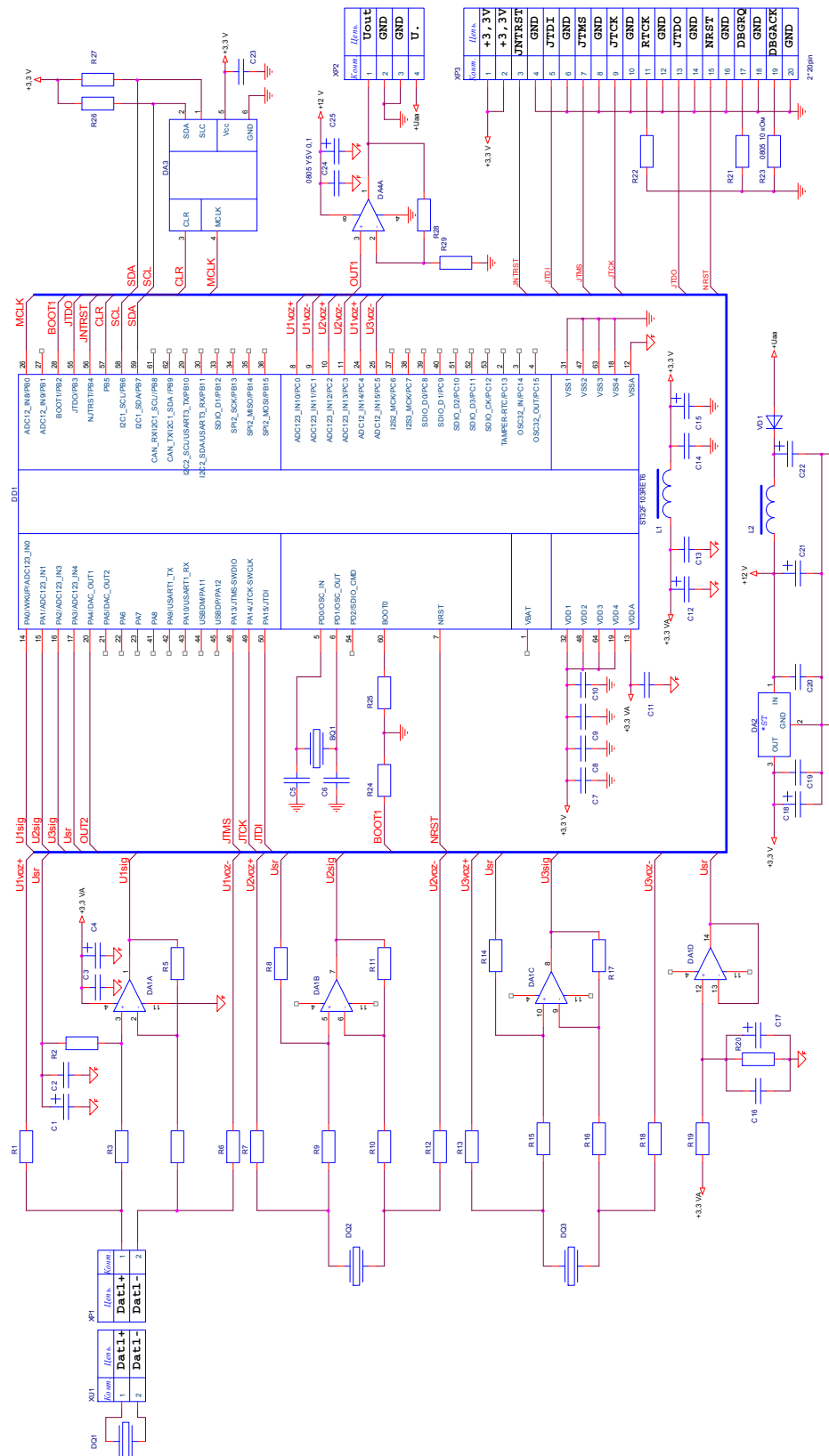


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема ультразвукового измерителя мгновенного массового расхода воздуха

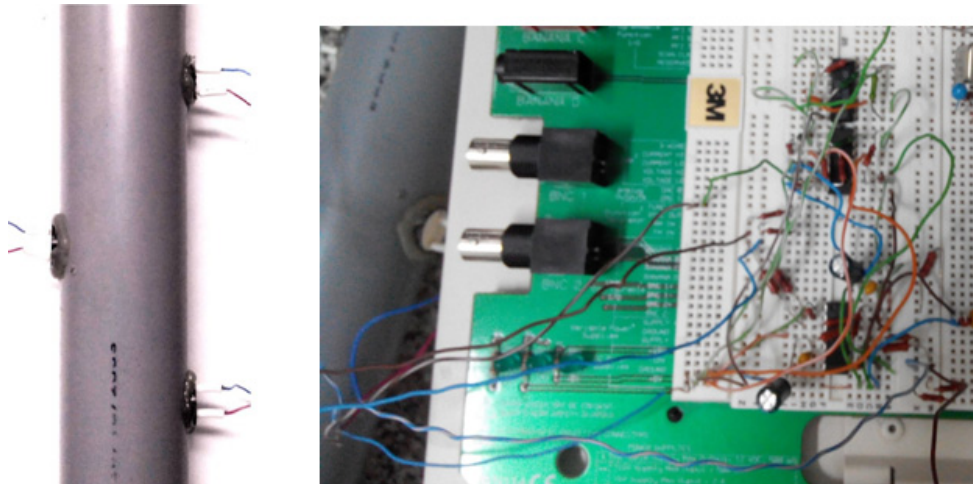


Рис. 4. Макеты чувствительного элемента ультразвукового датчика и электронного блока обработки сигнала с ультразвуковых преобразователей

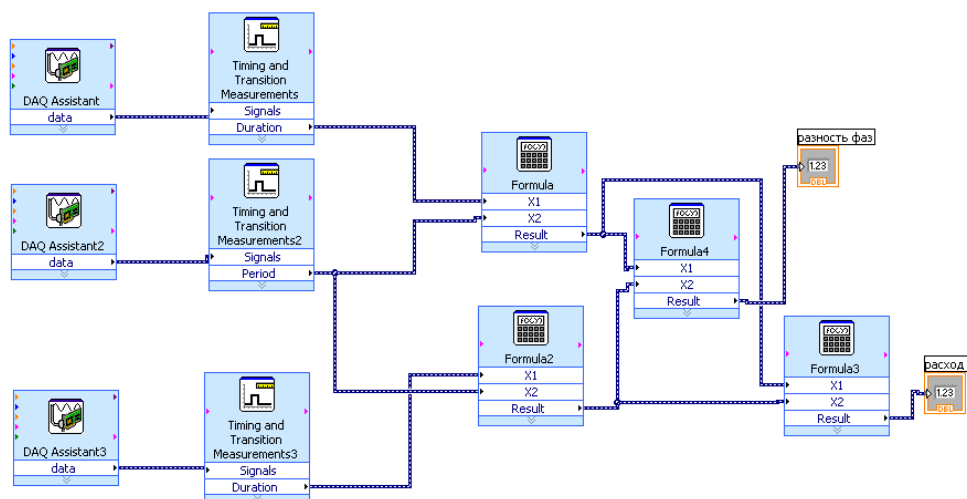


Рис. 5. Блок-схема программы для вычисления массового расхода воздуха на основе лабораторного комплекса NI Elvis

Таблица 1

Зависимость массового расхода от разности фаз

$\Delta\varphi$, град	m , кг/ч
0	0
121,74	3
284,15	7
446,7	11
609,53	15
772,7	19
977,3	24

Конструкция и принцип действия данного расходомера исключают фактор влияния шума ДВС. Это объясняется следствием того, что ультразву-

ковые волны распространяются непрерывно и скорость потока определяется через изменение фазы, а не через время распространения импульса ультразвуковой волны. Также отличием от применяемых датчиков является то, что температура воздуха вычисляется из температурной зависимости скорости ультразвука, что обеспечивает меньшую погрешность измерения.

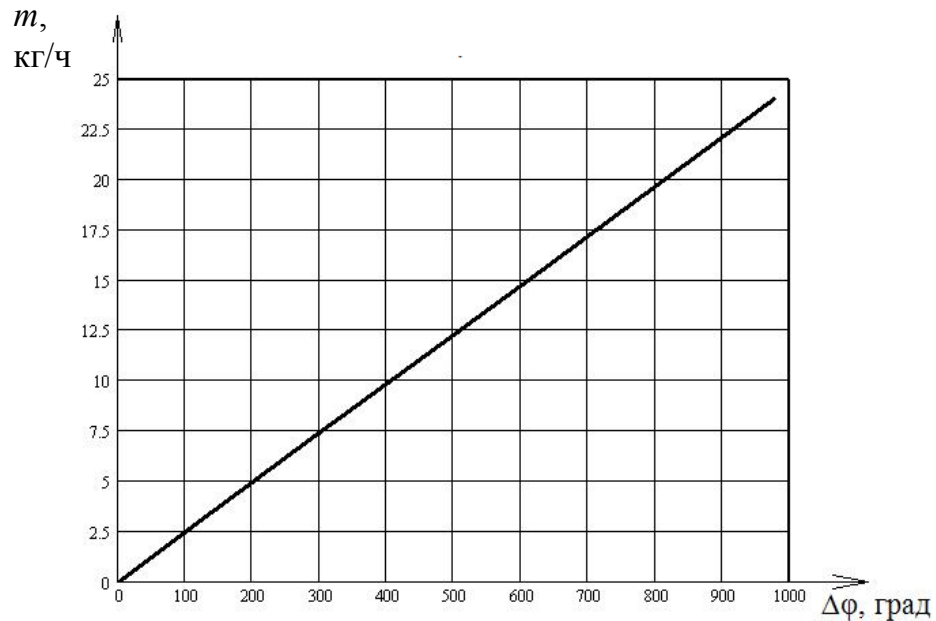


Рис. 6. Зависимость массового расхода воздуха от разности фаз

Заключение

Новизна и оригинальность представленной идеи заключается в возможности измерять массовый расход воздуха в двух направлениях с повышенной точностью, используя результаты измерений мгновенного значения температуры и плотности воздушной среды.

Несомненным достоинством разработанного расходомера, является повышенная надежность работы.

Список литературы

1. Системы управления бензиновыми двигателями : пер. с нем. – М. : За рулем, 2005. – 432 с.
2. Автомобильный справочник : пер. с англ. – М. : За рулем, 1999. – 896 с.
3. **Васильев, П. А.** Блок управления впрыском топлива и зажиганием ЭЛАРА-М автомобилей ГАЗ и УАЗ / П. А. Васильев и др. // Автотракторное электрооборудование. – 2002. – № 3. – С. 12–14.
4. **Мельников, А. А.** Ультразвуковые преобразователи в средствах измерения / А. А. Мельников, А. А. Мельников. – М. : Спутник, 2010. – 154 с.
5. Патент РФ № 2375682. Датчик ультразвукового расходомера / Адоньев В. Г., Мосин С. Т. – 2009. – БИ № 34.

References

1. *Sistemy upravleniya benzinovymi dvigatelyami: per. s nem.* [System of gasoline engine control: translation from German]. Moscow: Za rulem, 2005, 432 p.

2. *Avtomobil'nyy spravochnik: per. s angl* [Automobile reference book: translation from English]. Moscow: Za rulem, 1999, 896 p.
3. Vasil'ev P. A. et al. *Avtotraktornoe elektrooborudovanie* [Autotractor electrical equipment]. 2002, no. 3, pp. 12–14.
4. Mel'nikov A. A. *Ul'trazvukovye preobrazovateli v sredstvakh izmereniya* [Ultrasound transducers in measuring means]. A. A. Mel'nikov. Moscow: Sputnik, 2010, 154 p.
5. Patent Russian Federation No. 2375682. Ultrasound flowmeter's sensor. Adon'ev V. G., Mosin S. T. 2009, bull No. 34.

Ашанин Василий Николаевич

кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники и транспортного электрооборудования, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: eltech@pnzgu.ru

Ashanin Vasily Nikolaevich

Candidate of engineering sciences, professor, head of sub-department of electrical engineering and transport electrical equipment, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Мельников Анатолий Аркадьевич

ведущий инженер, кафедра электротехники и транспортного электрооборудования, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: eltech@pnzgu.ru

Mel'nikov Anatoliy Arkad'evich

Leading engineer, sub-department of electrical engineering and transport electrical equipment, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Цуриков Сергей Александрович

студент, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: eltech@pnzgu.ru

Tsurikov Sergey Aleksandrovich

Student, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 621.317.39

Ашанин, В. Н.

Измеритель мгновенного массового расхода воздуха для системы управления двигателем автомобиля / В. Н. Ашанин, А. А. Мельников, С. А. Цуриков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 4 (32). – С. 120–129.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛАНЕТАРНОЙ ШЛИЦЕНАКАТКИ

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования является технология накатки шлицев на наружных поверхностях деталей автомобиля, преимущественно на валах. Предметом исследования является процесс формообразования шлицев методом планетарной шлиценакатки двумя шлиценакатными головками, работающими в комплекте. Целью работы является повышение качества поверхности шлицев и производительности шлиценакатки за счет применения в одной головке двух роликов различного профиля.

Материалы и методы. Разработка теоретических взаимосвязей между размерами чернового и чистового накатных роликов и режимами обработки. Определение теоретических зависимостей между параметрами обрабатываемой поверхности и наладочными параметрами.

Результаты. Разработана конструкция комплекта шлиценакатных планетарных головок, каждая из которых оснащена черновым и чистовым роликом. Она позволяет значительно повысить производительность обработки при сохранении стойкости инструмента.

Выводы. Применение в одной шлиценакатной головке двух роликов, размеры которых связаны с режимом обработки, позволило исключить из работы вершину чистового ролика и снизить нагрузку на его боковые стороны, что положительно сказалось на качестве поверхности шлицев при повышении осевой подачи заготовки.

Ключевые слова: шлицевые валы, холодная накатка, шлиценакатной ролик.

A. G. Kondrashov, A. I. Faskhutdinov

IMPROVING EFFICIENCY OF PLANETARY SPLINE-KNURLING

Abstract.

Background. The research object is a technology of spline-knurling on the external surfaces of car parts, mainly on shafts. The research subject is a process of spline-forming by the method of planetary spline-knurling by two spline-knurling heads, functioning as a set. The aim of the work is to improve the quality of splines' surfaces and spline-knurling productivity by using two roller of different profile in a single head.

Materials and methods. The authors developed theoretical interconnections between rough and finishing knurling rollers and processing modes. Also, the researchers determined theoretical dependencies between the processed surfaces and the developed settings.

Results. The authors developed a design of the set of spline-knurling planetary heads, each one of them being equipped with rough and finishing rollers. It allows to significantly increase processing productivity while saving instrument's durability.

Conclusions. Using two rollers, the sizes of which depend on the mode of operation, in a single spline-knurling head, allowed to exclude a finishing roller's point

out of the process and to lower the stress on roller's sides, which had a positive effect on the quality of spline surfaces while increasing the axial advance of blanks.

Keywords: spline shafts, cold rolling, spline roller.

Шлицевые соединения были и в настоящее время остаются основным соединением для передачи больших крутящих моментов в узлах и агрегатах машин при достаточно точном центрировании деталей. На сегодня применяется довольно большое количество способов обработки шлицев. Наружные шлицы на валах в основном обрабатывают на шлицефрезерных станках червячными или дисковыми фрезами или на зубодолбежных станках зуборезными долбьяками. Шлицы, применяемые в подвижных соединениях, особенно поверхности, по которым осуществляют центрирование, после термообработки подвергают шлифованию. Оно может выполняться как одновременно для внутренней и боковой поверхности, так и отдельно [1].

Во многих случаях для улучшения качества обработки мелко модульных шлиц целесообразно осуществлять накатку вместо обработки резанием. Кроме повышения качества поверхности это также приведет к значительному повышению производительности, так как исключаются черновая и чистовая операции.

В работе [2] кратко рассмотрены более 10-ти способов накатки шлиц на валах. Все они в какой-то мере обладают преимуществами и недостатками. В работе [3] рассмотрены конструкции инструментов для накатки шлицев и особенности их расчета. Среди этих способов можно выделить метод планетарной шлиценакатки, предложенный фирмой «Эрнст Гроб» (Швейцария) [4]. Обработка по данному способу выполняется на шлиценакатных станках мод. GROB ZRM 6, 9, 12 (Швейцария) и мод. СТИ 1923, СТИ 1926 (г. Барановичи, Республика Беларусь). Качество поверхности при шлиценакатке получается значительно выше, чем при лезвийной обработке и достигает Ra 0,8...1,6 мкм.

В отличие от других способов, при планетарной шлиценакатке формообразование поверхности шлицев осуществляется за счет кратковременных воздействий накатных роликов на заготовку. По своему характеру эти воздействия можно сравнить с чеканкой. Схематично данный способ обработки показан на рис. 1.

Данный принцип накатывания заключается в том, что большое число кратковременных воздействий инструмента на деталь приводит к равномерному холодному «течению» материала по диаметру и длине детали, в результате чего образуются зубчатые венцы требуемой формы.

В процессе обработки две шлиценакатные головки, оснащенные расположенными по диаметру напротив друг друга и планетарно вращающимися навстречу друг другу накатными роликами, одновременно, симметрично и в течение очень коротких промежутков времени воздействуют на заготовку, которая вращается вокруг собственной оси. Частота вращения накатных головок и детали связана таким образом, что каждый новый контакт инструмента с деталью происходит в новой впадине между зубьями. Одновременно осуществляется продольная подача детали, которая обеспечивает распространение процесса холодного пластического деформирования по всей длине детали.

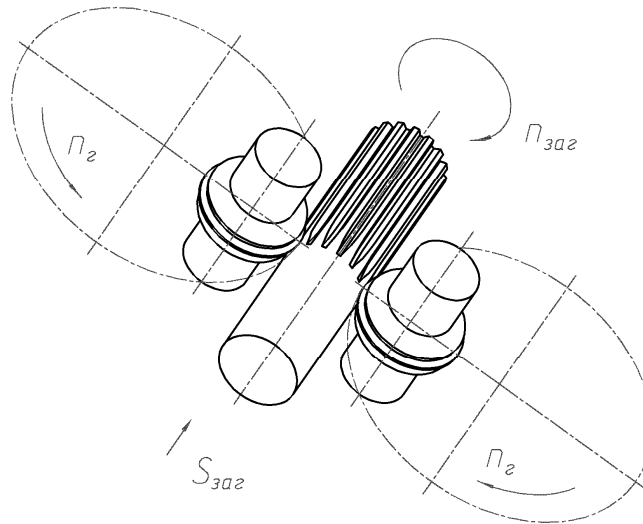


Рис. 1. Схема обработки методом планетарной накатки

Недостатком данной конструкции является то, что формообразование поверхности детали осуществляется двумя роликами каждой головки, базирующимися в осевом направлении по торцам. Это означает, что погрешность несимметричности профиля роликов относительно торцов будет переноситься на обрабатываемый профиль. Как следствие, накатные ролики необходимо изготавливать с жестким допуском на несимметричность профиля, что значительно повышает их стоимость. Поэтому производители для обеспечения наилучшей точности шлицев рекомендуют оснащать каждую шлиценакатную головку комплекта одним шлиценакатным роликом и противовесом [5]. Это позволяет расширить поле допуска на несимметричность накатного ролика, но в свою очередь приводит к снижению производительности в 2 раза.

В данной работе предложена конструкция комплекта шлиценакатных головок с двумя роликами: черновым и калибрующим. При этом калибрующий ролик повторяет профиль впадины обрабатываемой детали, а черновой ролик имеет больший диаметр и меньшую толщину профиля. Диаметр черного ролика определяется по следующей зависимости (рис. 2):

$$d_{p1} = 2\sqrt{\frac{(D + d_p - 2h)^2}{4} + (L + S)^2} - D,$$

где D – диаметр траектории движения роликов; d_p – диаметр калибрующего ролика; h – глубина обрабатываемого профиля, определяемая по формуле

$$h = \frac{d_{заг} - d_f}{2};$$

$d_{заг}$ – диаметр заготовки до накатки; d_f – диаметр впадин детали;

$L = \sqrt{h(D + d_p - h)}$ – половина участка профилирования калибрующего ролика; S – величина осевого перемещения заготовки между выходом из рабо-

ты чернового ролика и входом калибрующего; $S = S_{об} \frac{z}{2}$ – для четного числа зубьев детали, не кратного четырем; $S = S_{об} \left(\frac{z}{2} + 1 \right)$ – для четного числа зубьев детали, кратного четырем; $S = S_{об} z$ – для нечетного числа зубьев детали; $S_{об}$ – величина подачи заготовки на один оборот шлиценакатных головок; z – число зубьев обрабатываемой детали.

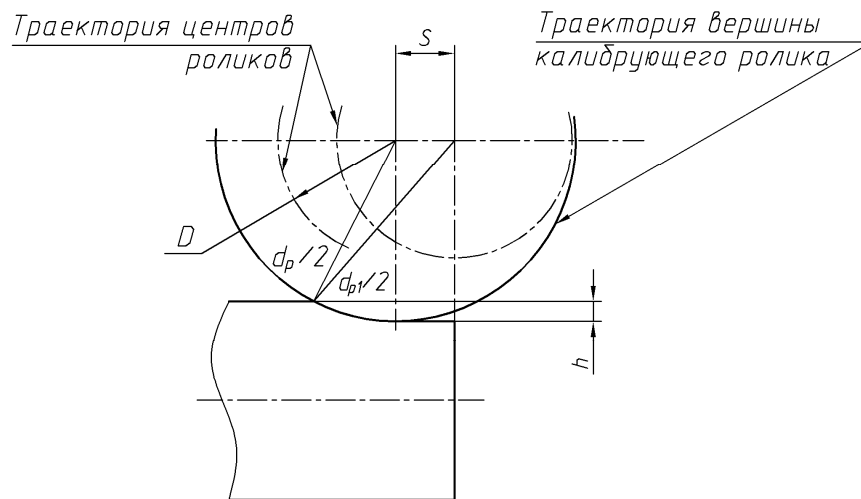


Рис. 2. Расчетная схема определения диаметра чернового ролика

Применение двух роликов с указанным соотношением между профилями позволяет полностью разгрузить вершину калибрующего ролика и частично разгрузить боковые поверхности, которые деформируют небольшую величину припуска, оставшегося после чернового ролика. Профили чернового и чистового роликов показаны на рис. 3.

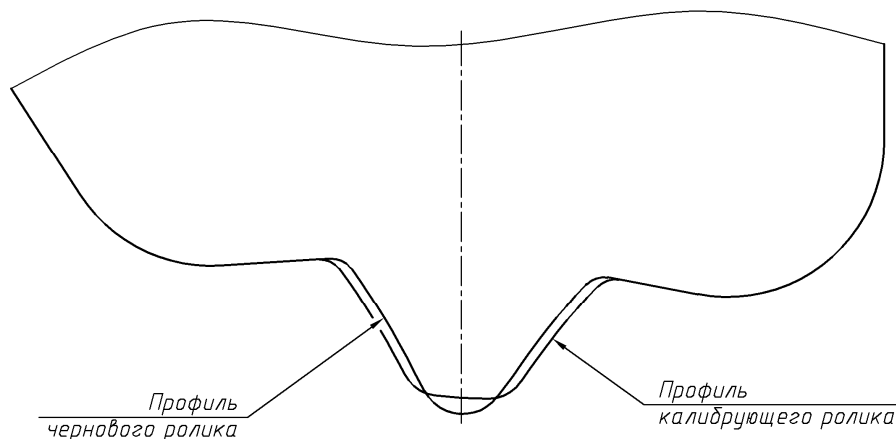


Рис. 3. Профили чернового и калибрующего роликов

В зависимости от числа зубьев обрабатываемой детали накатные ролики устанавливаются со смещением относительно центра заготовки, которое определяется зависимостью (рис. 4):

$\Delta = 0$ – для четного числа зубьев детали не кратного четырем;

$\Delta = \frac{d_f}{2} \sin \frac{\pi}{z}$ – для четного числа зубьев детали кратного четырем;

$\Delta = \frac{d_f}{2} \sin \frac{\pi}{2z}$ – для нечетного числа зубьев детали.

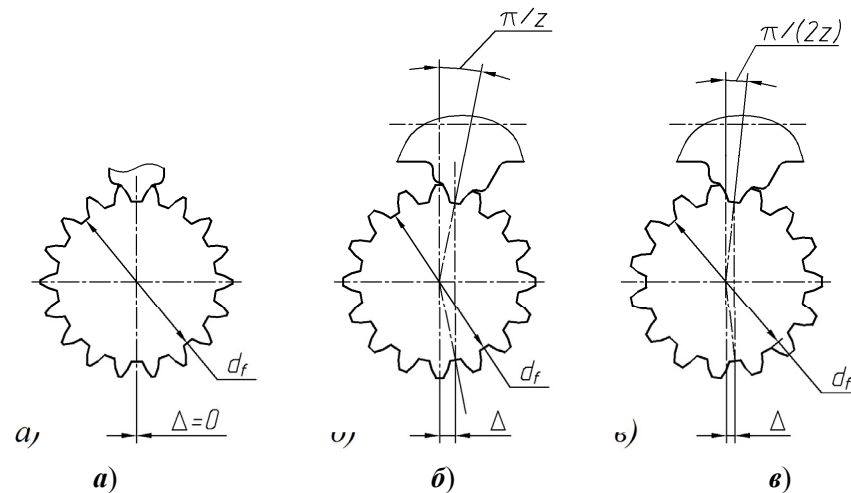


Рис. 4. Расчетная схема для определения смещения профиля роликов:
а – число зубьев детали четное, не кратное четырем; **б** – число зубьев детали четное, кратное четырем; **в** – число зубьев детали нечетное

На рис. 5 показана предлагаемая конструкция комплекта шлиценакатных головок [6].

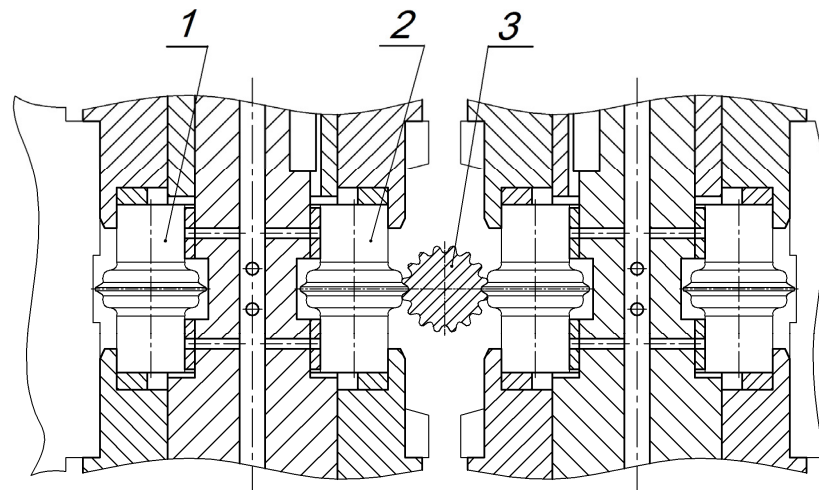


Рис. 5. Конструкция комплекта планетарных шлиценакатных головок:
1 – черновой ролик; **2** – калибрующий ролик; **3** – обрабатываемая заготовка

Данная конструкция была испытана при обработке детали «Вал привода гидромфты» двигателя автомобиля КАМАЗ. Использование данной схемы позволило повысить величину осевой подачи заготовки с 0,1 до 0,17 мм/об при сохранении периода стойкости роликов и, как следствие, повысить производительность обработки. Кроме этого, снижение нагрузки на калибрующем ролике привело к повышению качества поверхности дна впадины шлицев.

Список литературы

1. **Калашников, А. С.** Технология изготовления зубчатых колес / А. С. Калашников. – М. : Машиностроение, 2004. – 480 с.
2. **Писаревский, М. И.** Накатывание точных резьб, шлицев и зубьев / М. И. Писаревский. – Л. : Машиностроение, 1973. – 200 с.
3. **Лындин, В. А.** Инструмент для накатывания зубьев и шлицев повышенной точности / В. А. Лындин. – М. : Машиностроение, 1988. – 144 с.
4. Патент Германии № 2823040. Walyrolle für ein Verfahren und Vorrichtung zum Kaltwalzen von parrallelen Profilen Z. B. von Zahnprofilen aus dem vollen Material. Eder E., Schieschke K. – 16.12.1977.
5. Специальный шлиценакатной станок СТИ 1923. Руководство по эксплуатации. – Минск : СТАНКОТЕХИНКОМ, 2010. – 49 с.
6. Патент РФ на полезную модель № 50448. Комплект шлиценакатных планетарных головок / Белугин Ю. Ф., Кондрашов А. Г. – № 2005125254/22, заявл. 08.08.2005 ; опубл. 20.01.2006, Бюл. № 2.

References

1. Kalashnikov A. S. *Tekhnologiya izgotovleniya zubchatykh koles* [Technology of gear wheels production]. Moscow: Mashinostroenie, 2004, 480 p.
2. Pisarevskiy M. I. *Nakatyvanie tochnykh rez'b, shlitsev i zub'ev* [Knurling of precise threads, splines and teeth]. Leningrad: Mashinostroenie, 1973, 200 p.
3. Lyndin V. A. *Instrument dlya nakatyvaniya zub'ev i shlitsev povyshennoy tochnosti* [Instrument for teeth and splines high precision knurling]. Moscow: Mashinostroenie, 1988, 144 p.
4. Patent Germany No. 2823040. Method of deep roller knurling and device for cold knurling of parallel profiles Z. B. of teeth profiles made of solid materials]. Eder E., Schieschke K., publ. 16 December 1977.
5. *Spetsial'nyy shlitzenakatnoy stanok STI 1923. Rukovodstvo po ekspluatatsii* [Special spline-knurling machine tool STI 1923. Operating manual]. Minsk: STANKOTEKHINKOM, 2010, 49 p.
6. Useful Model Patent Russian Federation No. 50448. Set of spline-knurling planetary heads. Belugin Yu. F., Kondrashov A. G. No. 2005125254/22; appl. 8 August 2005; publ. 20 January 2006, bull. no. 2.

Кондрашов Алексей Геннадьевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструкторско-
технологического обеспечения
машиностроительных производств,
Набережночелнинский институт
(филиал) Казанского (Приволжского)
Федерального университета
(Россия, Республика Татарстан,
г. Набережные Челны, пр. Суюмбике, 10а)

E-mail: kondrashovag@mail.ru

Kondrashov Aleksey Gennad'evich

Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of design
support of machine-building production,
Naberezhnie Chelny Institute
(branch) of Kazan (Volga) Federal
University (10a Syuyumbike avenue,
Naberezhnie Chelny, the Republic
of Tatarstan, Russia)

Фасхутдинов Айрат Ибрагимович

кандидат технических наук, начальник
бюро, Технологический центр
ОАО «КАМАЗ» (Россия, Республика
Татарстан, г. Набережные Челны,
проспект Мусы Джалиля)

E-mail: Airat.Fashutdinov@kamaz.org

Faskhutdinov Ayrat Ibragimovich

Candidate of engineering sciences,
department manager, Technological center
of “KAMAZ” Plc. (Musy Dzhaliya avenue,
Naberezhnie Chelny, the Republic
of Tatarstan, Russia)

УДК 621.7

Кондрашов, А. Г.

Повышение эффективности планетарной шлиценакатки / А. Г. Кондрашов, А. И. Фасхутдинов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 4 (32). – С. 130–136.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УТИЛИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ МЕТОДОМ ПИРОЛИЗА¹

Аннотация.

Актуальность и цели. На земном шаре ежегодно на каждого жителя земли приходится около 20 т отходов. Проблема утилизации отходов является важнейшей международной задачей. В настоящее время в различных странах разрабатываются и используются установки пиролиза, которые позволяют наряду с бытовыми отходами обезвреживать и производственные отходы. Общим для всех установок пиролиза характерно практически полное отсутствие загрязнения воздушной и водной сред. В Пензенском государственном университете изготовлен опытный образец пиролизной установки. Целью данной работы является исследование эффективности утилизации различных отходов на данной установке.

Материалы и методы. Измерения концентрации газообразных загрязняющих веществ и пыли выполнялись лабораторией охраны окружающей среды и промышленной санитарии Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» ФГУП ФНПЦ «ПО «СТАРТ» им. М. В. Проценко». Комплекс биологических исследований по определению степени уничтожения высокотоксичных отходов из исходной смеси в экологически безопасные компоненты методом высокотемпературного пиролиза выполнен Государственным научно-исследовательским институтом промышленной экологии на базе Регионального центра государственного экологического контроля и мониторинга по Пензенской области. Определение класса опасности отходов проводили экспериментальным методом в соответствии с приказом Министерства природных ресурсов от 15 июня 2001 г. № 511 «Об утверждении критериев отнесения опасных отходов к классу опасности для окружающей природной среды». Экспериментальный метод основан на биотестировании отходов. Опыты проведены на дафниях, пресноводных водорослях и по изменению интенсивности бактериальной люминесценции.

Результаты. Получены результаты эффективности процесса пиролиза для четырех типов промышленных отходов. Проведены исследования класса опасности отхода и показателя безопасности разведения для исходного вещества и вещества, полученного после пиролиза. Проведен химический анализ веществ, поступающих в атмосферный воздух после процесса пиролиза. Измерены концентрации взвешенных частиц после каждой ступени очистки. Дана оценка эффективности очистки пиролизных газов пылеобеспыляющими аппаратами, которыми укомплектована установка. Получены результаты процесса пиролиза по времени и масса убыли вещества для всех исследуемых отходов

Выводы. Проведены промышленные испытания опытного образца пиролизной установки, предназначенной для утилизации отходов. Установлено, что опытный образец установки обеспечивает утилизацию разных твердых промышленных отходов. Дана оценка эффективности метода пиролиза для че-

¹ Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Национальная система химической и биологической безопасности Российской Федерации (2009–2014)», утвержденной постановлением Правительства от 27 октября 2008 г. № 791 по научной теме «Разработка технологий, обеспечивающих ликвидацию различных химически опасных отходов, находящихся на территории накопителей, свалок и захоронений, на основе методов сверхкритического водного окисления и пиролиза в восстановительной среде без процесса горения».

тырех типов отходов. Выполнены исследования состава газообразных загрязняющих веществ, поступающих в атмосферный воздух, измерены их концентрации и проведено сравнение с предельно допустимой концентрацией. Дана оценка примененным в установке конструкций устройств, предназначенных для очистки пиролизных газов от взвешенных частиц. Установлена эффективность протекающего процесса пиролиза отходов по времени и по убыли массы. На основании проведенных исследований установлено, что установка отвечает современным требованиям в решении проблемы переработки и утилизации отходов.

Ключевые слова: утилизация, пиролиз, биотестирование, промышленные отходы, «холодная плазма».

T. P. Avdeeva, A. E. Rozen

RESEARCH OF UTILIZATION EFFICIENCY OF INDUSTRIAL WASTE THROUGH PYROLYSIS

Abstract.

Background. In the world about 20 tons of waste is the annual share of every living person. The problem of waste disposal is a major international problem. Currently, various countries have developed and the pyrolysis units, which allow to utilize industrial waste along with household waste. For all pyrolysis plants is common to produce almost no air and water pollution. In Penza State University there has also been made a prototype of a pyrolysis plant. The aim of this work is to study the disposal effectiveness of various wastes at the given plant.

Materials and methods. Measurement of concentration of gaseous pollutants and dust was performed by the laboratory of environmental and industrial hygiene of the Scientific Production Association "START" named after M. V. Protzenko" under the State Atomic Energy Corporation "Rosatom". Complex biological studies to determine the degree of highly toxic waste disposal from the base mixture into the environmentally safe components through the high-temperature pyrolysis were carried out by the State Research Institute of Industrial Ecology at the Regional Center of State environmental control and monitoring in the Penza region. Determination of the waste hazard class was carried out experimentally in accordance with the law of the Ministry of Natural Resources from June 15, 2001 № 511 "On approval of the criteria for classifying hazardous waste classified as dangerous for the environment." The experimental method was based on biotesting of waste. Experiments were conducted on daphnia, freshwater algae; the changes in intensity of bacterial luminescence were also studied.

Results. The researchers received the results of the pyrolysis process efficiency for four types of industrial waste and carried out a research of the waste's hazard class and the dilution safety indicator for the source material and the material obtained after pyrolysis. The authors conducted a chemical analysis of substances entering the air after the pyrolysis process and measured concentrations of suspended particles after each stage of purification. The researchers evaluated the effectiveness of the pyrolysis gases' purification by dedusting devices which are installed in the plant, and obtained the results of the pyrolysis process according to time and weight of diminution for all the investigated waste substance.

Conclusions. The researchers held industrial testing of a pyrolysis plant prototype intended for waste disposal. It was found that the prototype system ensures disposal of different industrial solid waste. The authors evaluated the effectiveness of the pyrolysis method for the four types of waste. The researchers studied gaseous pollutants entering the atmospheric air, measured their concentrations and compared

to the maximum permissible concentration. The authors also estimated the devices installed in the plant, designed to purify the pyrolysis gases from suspended particles and the effectiveness of the ongoing process of pyrolysis of waste according to time and mass diminution. On the basis of the studies it is found that the plant meets the modern requirements concerning waste management and disposal.

Key words: utilization, pyrolysis, biotesting, industrial waste, cold plasma.

На земном шаре ежегодно на каждого жителя земли приходится около 20 т отходов, состоящих из газообразных, жидких и твердых компонентов [1]. Наибольшую часть составляют твердые бытовые и промышленные отходы. Проблема утилизации отходов является важнейшей международной задачей. В настоящее время в различных странах разрабатываются и используются установки пиролиза, которые позволяют наряду с бытовыми отходами обезвреживать и производственные отходы. Общим для всех установок пиролиза характерно практически полное отсутствие загрязнения воздушной и водной сред.

В Пензенском государственном университете изготовлен опытный образец пиролизной установки (рис. 1), которая сейчас прошла промышленные испытания [2].

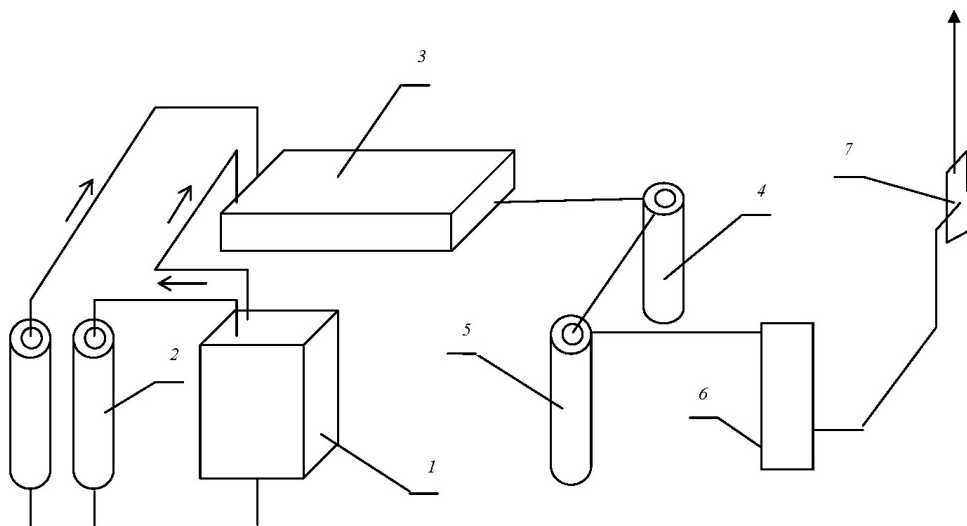


Рис. 1. Схема пиролизной установки: 1 – реактор; 2 – колонны; 3 – теплообменник; 4 – циклон сухой очистки; 5 – циклон с водяной пленкой; 6 – установка «холодной» плазмы; 7 – вентилятор

Принцип работы установки основан на технологии пиролиза, который представляет процесс предварительного разложения органической составляющей отходов в бескислородной атмосфере, после чего образовавшаяся концентрированная парогазовая смесь направляется в камеру дожигания, где в режиме управляемого дожига газообразных продуктов происходит перевод токсичных веществ в менее или полностью безопасные [3].

Для оценки экологических показателей работы установки и процесса пиролиза проведены опытные испытания для промышленных отходов ОАО

«Волгохимпром» г. Волгограда, отходов твердого осадка сточных вод ОАО «Маяк» г. Пензы, отходов нефтешлама и древесной пыли.

Измерения концентрации газообразных загрязняющих веществ и пыли выполнялись лабораторией охраны окружающей среды и промышленной санитарии Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» ФГУП ФНПЦ «ПО «СТАРТ» им. М. В. Проценко».

Комплекс биологических исследований по определению степени уничтожения высокотоксичных отходов из исходной смеси в экологически безопасные компоненты методом высокотемпературного пиролиза выполнен Государственным научно-исследовательским институтом промышленной экологии на базе Регионального центра государственного экологического контроля и мониторинга по Пензенской области. Определение класса опасности отходов проводили экспериментальным методом в соответствии с приказом Министерства природных ресурсов от 15 июня 2001 г. № 511 «Об утверждении критериев отнесения опасных отходов к классу опасности для окружающей природной среды».

Экспериментальный метод основан на биотестировании отходов. Опыты проведены на дафниях, пресноводных водорослях и по изменению интенсивности бактериальной люминесценции.

В процессе пиролиза выполнялся контроль за температурой газа, поступающего в атмосферный воздух. На входе в теплообменник температура газа составляет 190–195 °С. После прохождения газа через теплообменник температура его значительно понижается в среднем на 100 °С.

После прохождения газа в циклоне с водяной пленкой (ЦВП) температура понижается до 26–27 °С. В атмосферный воздух газ поступает с температурой окружающей среды – 27–28 °С (при проведении измерений температура в атмосфере была в среднем 27–29 °С).

Таким образом, несмотря на высокие температуры газа при процессе пиролиза, конструкция установки и ее элементы позволяют снизить температуру газа, поступающего в атмосферный воздух. Это снижает загрязнение атмосферного воздуха тепловыми выбросами.

1. Результаты пиролиза отходов ОАО «Волгохимпром» г. Волгограда

Хлорсодержащие отходы ОАО «Волгохимпром» г. Волгограда представляют собой вещество пастообразной формы серого цвета, отличающееся сильным сложным химическим запахом. В соответствии с приказом МПР № 511 от 15 июня 2001 г. вещество относится ко II классу опасности для окружающей природной среды.

Процесс пиролиза проведен при различной массе отходов, загружаемых в реактор: 5, 13, 15, 20 и 26 кг. Время протекания процесса пиролиза составляет от 30 до 45 мин. Наиболее эффективно процесс пиролиза протекает при температуре газа в реакторе 740 °С.

По окончании процесса пиролиза образуется сыпучее вещество серого цвета без запаха. Показатель безопасности кратности разведения (БКР) для исходного вещества и вещества, полученного после пиролиза, приведен в табл. 1.

Таблица 1

Требуемое разведение водных вытяжек
из проб отходов Волгохимпрома

Отходы	Показатель БКР до пиролиза	Показатель БКР после пиролиза
Для дафний	737	64
Для водорослей	316	28
Для люминесцентных бактерий	1:10000	1:100

На основании исследований, проведенных на биотестах, образовавшееся вещество имеет IV класс опасности, а показатели БКР резко уменьшаются. Таким образом, после процесса пиролиза вещество становится менее опасным.

В процессе пиролиза проведен анализ состава загрязняющих веществ и их количественное содержание, в газе, поступающем в атмосферный воздух. Измерения проведены в газоходе перед выходом газа в атмосферный воздух.

Перечень газообразных веществ, их предельно допустимые концентрации (ПДК) и концентрация в газовой смеси, поступающей в атмосферу, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Перечень газообразных веществ, их ПДК и концентрация
в газовой смеси, поступающей в атмосферу

Загрязняющее вещество	Концентрация, мг/м ³	ПДК в атмосферном воздухе, мг/м ³
Хлористый водород	0,23	0,2
Углерода оксид	0,5	5
Оксид азота	0,03	0,4
Диоксид азота	0,012	0,085
Сернистый диоксид	0,0024	0,5

Из анализа приведенных данных следует, что имеется незначительное превышение концентрации по сравнению с атмосферным воздухом только по хлористому водороду. По всем другим веществам превышения отсутствуют.

По массе убыль вещества составляет 40 %.

При пиролизе отходов образуется значительное количество пыли (взвешенных частиц).

Для очистки газа от пыли в установке предусмотрена двухступенчатая очистка. Поэтому измерения концентрации пыли проводились в трех точках: в газоходе перед ЦВП, в газоходе перед плазменной установкой и в отводящем газоходе.

Циклон ЦВП обеспечивает очистку газа от пыли на 89,7 %, а установка плазмы – на 86,5 %. Таким образом, концентрация пыли перед ЦВП, равная 255 мг/м³, снижается до 3,5 мг/м³. Общая эффективность очистки газа от пыли составляет 98,6 %.

2. Результаты пиролиза отходов твердого осадка сточных вод ОАО «Маяк» г. Пензы

Отходы ОАО «Маяк» представляют собой кусочки размоченного картона с содержанием влажности около 100 %. Вещество относится ко II классу опасности для окружающей природной среды.

Процесс пиролиза проведен при различной массе отходов, загружаемых в реактор: 10, 15, и 20 кг. Время протекания процесса пиролиза составляет около 2 ч. По окончании процесса пиролиза образуется сыпучее вещество серого цвета без запаха. На основании исследований, проведенных на биотестах, образовавшееся вещество имеет IV класс опасности. Показатель безопасности кратности разведения для исходного вещества и вещества, полученного после пиролиза, приведен в табл. 3.

Таблица 3

Требуемое разведение водных вытяжек из проб отходов ОАО «Маяк» г. Пензы

Отходы	Показатель БКР до пиролиза	Показатель БКР после пиролиза
Для дафний	536	43
Для водорослей	41	15
Для люминесцентных бактерий	1:1000	1 :100

После процесса пиролиза вещество становится менее опасным.

По массе убыль вещества составляет более 95 %.

В процессе пиролиза проведен анализ состава загрязняющих веществ и их количественное содержание в газе, поступающем в атмосферный воздух.

Перечень газообразных веществ, их ПДК и концентрация в газовой смеси, поступающей в атмосферу, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Перечень газообразных веществ, их ПДК и концентрация в газовой смеси, поступающей в атмосферу

Загрязняющее вещество	Концентрация, мг/м ³	ПДК в атмосферном воздухе, мг/м ³
Хлористый водород	0,028	0,2
Углерода оксид	0,6	5
Оксид азота	0,006	0,4
Диоксид азота	0,01	0,085
Сероводород	0,0016	0,008

Из анализа приведенных данных следует, что отсутствует превышение ПДК загрязняющих веществ по сравнению с атмосферным воздухом.

3. Результаты пиролиза отходов нефтешлама

Отходы нефтешлама представляют собой смесь песка и отработанного минерального масла, содержащегося в количестве 20 % от массы отхода. Вещество относится ко II классу опасности для окружающей природной среды.

Процесс пиролиза проведен при массе отхода, загружаемого в реактор, 12 кг. Время протекания процесса пиролиза составило 1 ч. По окончании процесса пиролиза образуется сыпучее вещество без содержания масла.

На основании исследований, проведенных на биотестах, образовавшееся вещество имеет IV класс опасности. Показатель безопасности кратности разведения для вещества, полученного после пиролиза, приведен в табл. 5. По массе убыль масла составила 100 %.

Таблица 5

Требуемое разведение водных вытяжек из проб отходов нефтешлама

Отходы нефтешлама	Показатель БКР до пиролиза	Показатель БКР после пиролиза
Для дафний	4410	76
Для водорослей	6806	81
Для люминесцентных бактерий	1:10000	1:100

4. Результаты пиролиза отходов древесной пыли

Отходы древесной пыли представляют собой смесь отходов мебельного производства. Вещество относится ко II классу опасности для окружающей природной среды.

Процесс пиролиза проведен при массе отхода, загружаемого в реактор, 28 кг. Время протекания процесса пиролиза составило 3 ч. По окончании процесса пиролиза образуется сыпучее вещество.

На основании исследований, проведенных на биотестах коксозольный остаток пиролизной переработки древесной пыли относится к IV классу опасности. Показатель безопасности кратности разведения для вещества, полученного после пиролиза, приведен в табл. 6.

Таблица 6

Требуемое разведение водных вытяжек из проб отходов древесной пыли

Отходы древесной пыли	Показатель БКР до пиролиза	Показатель БКР после пиролиза
Для дафний	74	67
Для водорослей	37	15
Для люминесцентных бактерий	1:10	1:100

По массе убыль древесной пыли составила 98 %.

Время пиролиза и убыль отхода по массе для исследованных отходов приведены в табл. 7.

Выводы

1. Опытный образец пиролизной установки обеспечивает утилизацию разных твердых промышленных отходов. Это отвечает современным требованиям в решении проблемы переработки и утилизации отходов.

2. На основании проведенных исследований установлено, что в процессе пиролиза в атмосферу выделяются газообразные вещества. Однако во всех

случаях концентрация загрязняющих веществ значительно ниже ПДК атмосферного воздуха.

Таблица 7

Время пиролиза и убыль отхода по массе

Наименование промышленного отхода	Время пиролиза	Убыль отхода по массе, %
Отходы ОАО «Волгохимпром» г. Волгограда	30–45 мин	40
Отходы твердого осадка сточных вод ОАО «Маяк» г. Пензы	2 ч	95
Отходы нефтешлама	1 ч	100
Отходы древесной пыли	3 ч	98

3. Наличие в установке нескольких ступеней очистки пиролизного газа от взвешенных веществ обеспечивает эффективность очистки на 98 %.

4. В результате исследования установлено, что по времени процесс переработки отходов ОАО «Волгохимпром» протекает более эффективно по сравнению с другими видами отходов.

5. Убыль отходов по массе для исследованных образцов различна. Наиболее эффективно процесс пиролиза протекает при переработке отходов нефтешлама, отходов древесной пыли и отходов твердого осадка сточных вод ОАО «Маяк» г. Пензы. Соответственно процент убыли по массе составил 100, 98 и 95 %.

Список литературы

1. **Крюков, Б. Н.** Современная технология утилизации твердых бытовых отходов / Б. Н. Крюков, А. В. Леонов // Интеграл. – 2005. – № 5 (25).
2. **Авдеева, Т. П.** Анализ эффективности утилизации промышленных отходов методом пиролиза / Т. П. Авдеева, А. Е. Розен // Металлургия: технологии, управление, инновации, качество : тр. XVII Всерос. науч.-практ. конф. (14–16 октября 2014 г.). – Новокузнецк : Изд. центр СибГТУ, 2014. – С. 232–239.
3. **Авдеева, Т. П.** Проблемы утилизации твердых отходов и пути их решения / Т. П. Авдеева, А. Е. Розен, А. Н. Расстегаев // Фундаментальные проблемы науки : тр. VII Междунар. симпозиума (10–12 сентября 2013 г.). – М. : РАН, межрегиональный совет по науке и технологиям, 2013. – Т. 2. – С. 141–143.

References

1. Kryukov B. N., Leonov A. V. *Integral* [Integral]. 2005, no. 5 (25).
2. Avdeeva T. P., Rozen A. E. *Metallurgiya: tekhnologii, upravlenie, innovatsii, kachestvo : tr. KhVII Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Metallurgy: technology, management, innovations, quality: proceedings of XVII All-Russian scientific and practical conference] (14–16 October 2014). Novokuznetsk: Izd. tsentr SibGTU, 2014, pp. 232–239.
3. Avdeeva T. P., Rozen A. E., Rasstegaev A. N. *Fundamental'nye problemy nauki : tr. VII Mezhdunar. simpoziuma* [Fundamental scientific problems: proceedings of VII International symposium]. (10–12 September 2013). M.: RAN, mezhregional'nyy sovet po nauke i tekhnologiyam, 2013, vol. 2, pp. 141–143.

Авдеева Татьяна Петровна

доктор технических наук, профессор,
кафедра техносферной безопасности,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: ot@pnzgu.ru

Avdeeva Tat'yana Petrovna

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of anthropogenic safety,
Penza State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Розен Андрей Евгеньевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой сварочного,
литейного производства, Пензенский
и материаловедения, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: aerozen@bk.ru

Rozen Andrey Evgenyevich

Doctor of engineering sciences, professor,
head of sub-department of welding, foundry
production and materials science,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

УДК 621:628.542

Авдеева, Т. П.

Исследование эффективности утилизации промышленных отходов методом пиролиза / Т. П. Авдеева, А. Е. Розен // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 4 (32). – С. 137–145.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СЛОИСТЫХ СТРУКТУР РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ПРИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ¹

Аннотация.

Актуальность и цели. Математическое моделирование напряженно-деформационного состояния слоистых структур радиоэлектронных средств является весьма актуальной проблемой, которая позволяет на ранних этапах проектирования выявить наиболее нагруженные конструктивные элементы радиоэлектронных средств при технологических и экспериментальных воздействиях. Целью работы является повышение надежности и обеспечение тактико-технических характеристик изделий конструкторско-технологическими способами.

Материалы и методы. Предложена классификация моделей, описывающих напряженно-деформированное состояние слоистых структур. Моделирование состояния слоев структуры выполнено численными методами с использованием разработанного пакета прикладных программ.

Результаты. Разработан комплекс моделирующих программ и выполнен численный анализ распределения термомеханических напряжений по поверхности многослойной платы микросборки при тепловом воздействии. Определены зоны оптимального размещения тензорезистивных элементов на поверхности платы.

Выводы. Проведенные численные исследования показали, что для обеспечения стабильности метрологических характеристик слоистых плат необходим обязательный контроль толщины клеевого шва, применение более мягких клеев и выбор оптимальных геометрических размеров плат для обеспечения более равномерного распределения термомеханических напряжений в зонах расположения тензорезистивных элементов.

Ключевые слова: напряженно-деформационное состояние, тепловое воздействие, слоистая структура, плата, радиоэлектронные системы.

A. N. Litvinov, O. Sh. Khadi, N. K. Yurkov

MODE OF DEFORMATION MODELING IN LAYERED STRUCTURES OF RADIO-ELECTRONIC MEANS AT TECHNOLOGICAL AND OPERATIONAL IMPACTS

Abstract.

Background. Mathematical modeling of the mode of deformation of the layered structures of radio-electronic means (REM) is a very important problem, which allows to identify at early design stages the most stressed structural elements of REM

¹ Статья подготовлена в рамках реализации НИР «Создание методологических основ обнаружения и локализации латентных технологических дефектов бортовой радиоаппаратуры космических аппаратов методами неразрушающего контроля и диагностики на этапах производства» (ГК № 14.514.11.4078 от 10.03.2013) в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007–2013 годы».

at technological and experimental impacts. The aim of the work is to increase the reliability and maintenance of tactical and technical characteristics of the product design and technological methods.

Materials and methods. The authors suggested a classification of the models describing the mode of deformation of the layered structures. Modeling of the structure of the layers was performed numerically using the developed software package.

Results. The researchers developed a complex of simulation programs and carried out a numerical analysis of the distribution of thermomechanical stress on the surface of the multilayer board with micro-thermal exposure. The authors determined the zones of optimal placement of tensoresistive elements on the surface of the board.

Conclusions. The numerical studies have shown that to ensure the stability of the metrological characteristics of laminated boards it is required to permanently control thickness of the adhesive joint, use a soft adhesives and select the optimal geometric dimensions of boards to ensure a more even distribution of thermomechanical stresses in the areas with tensoresistive elements.

Key words: mode of deformation, thermal influence, layered structure, board, electronic systems.

Введение

Одной из важнейших задач развития научных основ конструирования и технологии изготовления блоков и изделий современных радиоэлектронных средств (РЭС) является создание адекватных прикладных моделей, описывающих поведение конструкций и их отдельных элементов в процессе производства и эксплуатации [1].

Системный анализ конструкций РЭС показывает, что большинство изделий, блоков и их элементов являются гетерогенными структурами, подверженными внешним воздействиям. За счет изменения их напряженно-деформированного состояния (НДС) происходит изменение основных электропараметров РЭС, ухудшение метрологических характеристик, снижение их надежности, а в ряде случаев их частичный или полный отказ в результате разрушения отдельных элементов. При этом основными являются динамические и температурные воздействия, возникающие в ходе выполнения различных технологических операций в производстве, при испытаниях и в процессе эксплуатации изделий в широком диапазоне тепловых и вибрационных нагрузок [2, 3].

Анализ технологических процессов показывает, что существующие модели не в полной мере учитывают явления и процессы, происходящие в гетерогенных структурах изделий, и нуждаются в уточнении и совершенствовании.

1. Модели для исследования процессов в слоистых структурах

В обобщенном виде модели гетерогенных структур можно разделить на три укрупненных класса: многослойные структуры, композиты, структуры с приведенными характеристиками.

Многослойные структуры. Модели этого типа основаны на механике многослойных сред. По нашему мнению, наиболее общей следует считать классификацию многослойных структур, основанную на энергетической оценке НДС слоев, предложенную академиком В. В. Болотиным [4], в соот-

ветствии с которой введены понятия жесткого, мягкого и трансверсально-мягкого слоев. При расчете многослойных оболочек эта модель позволяет учитывать изменение метрики при переходе от слоя к слою, что дает математическое описание НДС каждого слоя с учетом его кривизны и места расположения [5].

Композиты классифицируются по структуре: слоистые, волокнистые, наполненные и т.п. В тех случаях, когда они являются слоистыми, часть слоев может быть анизотропными. В этом случае, если выполнить переход от анизотропных слоев к изотропным с приведенными характеристиками, можно использовать классификацию слоев В. В. Болотина и строить модели по принципу многослойной структуры. В остальных случаях для анализа НДС таких конструктивных элементов в зависимости от структуры композита используются математические модели, изложенные в [6, 7].

Структуры с приведенными характеристиками. Первые работы в этом направлении принадлежат Фойхту и Рейссу и позволяют получить для приведенных модулей упругости оценки сверху и снизу соответственно.

Различные модели и критерии для определения приведенных характеристик слоистых и композиционных структур приведены в работах [8, 9], где осреднение производится в сочетании с принятием дополнительных гипотез о полях напряжений, деформаций и перемещений, а также учетом конструктивных особенностей рассматриваемой неоднородной структуры. В работе [10] предложена математическая модель, обеспечивающая одинаковую жесткость исходной конструкции и модели с приведенными характеристиками. Предложенная модель может применяться как ко всей слоистой конструкции, так и к ее части [5].

Модели, основанные на определении приведенных характеристик для эквивалентной упругой или вязкоупругой диссипативной системы, являются весьма перспективными для моделирования НДС в сложных неоднородных структурах. Их существенной особенностью является то, что в ряде случаев оказывается возможным получение аналитических решений для систем, подверженных внешним воздействиям. Выбор конкретной математической модели определяется свойствами исследуемой конструкции или ее элемента и требуемой точностью исследования НДС. Применение математических моделей, алгоритмов расчета и комплекса моделирующих программ позволяет на ранних этапах проектирования обеспечивать требуемый уровень надежности изделий, содержащих многослойные структуры, научно обоснованно разрабатывать режимы технологических процессов их изготовления, а также анализировать возможные виды отказов изделий.

2. Алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния слоистой платы при тепловом воздействии

Рассмотрим плоскую плату микросхемы частного применения. В качестве расчетной схемы для платы принимаем пятислойную прямоугольную пластину размером $2L_x \times 2L_y$ (рис. 1), что соответствует структуре печатной платы. Физико-механические характеристики слоев характеризуются параметрами: E_k – модуль упругости; ν_k – коэффициент Пуассона; α_k – температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) T_k – температура;

h_k – толщина k -го слоя; k – номер слоя ($k = 1, 2, \dots, 5$). Пластина отнесена к системе координат x, y, z , расположенной в ее центре.

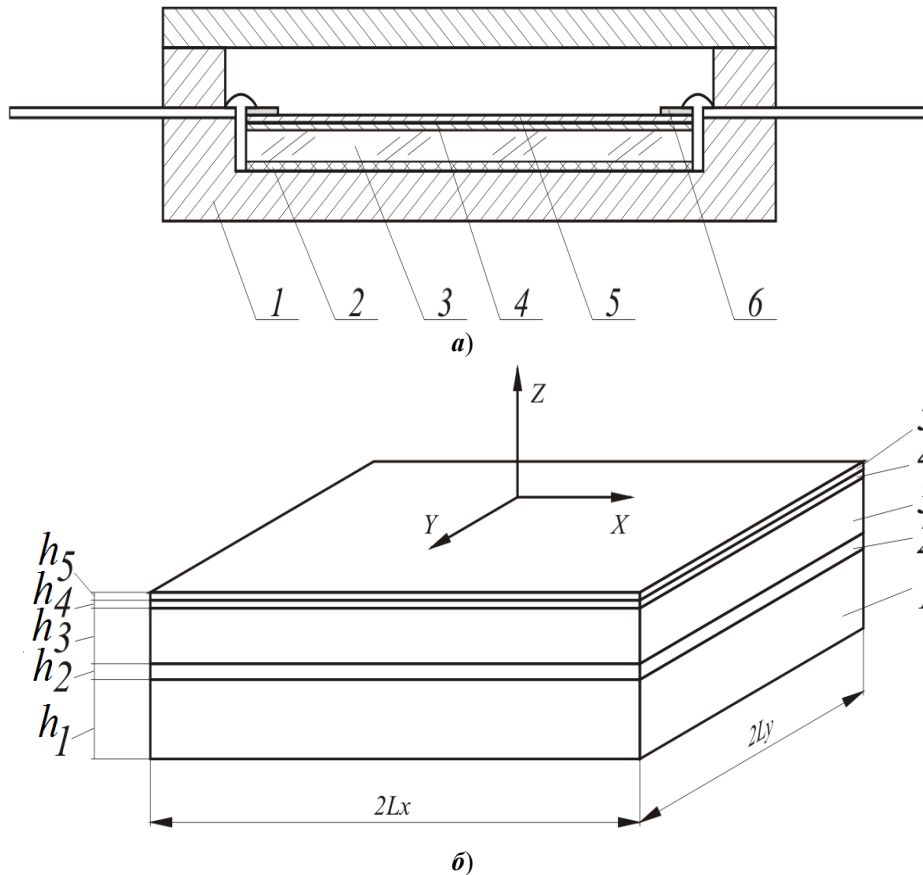


Рис. 1. Конструкция микросхемы (а) и расчетная схема (б):

1 – основание; 2 – клеевой шов; 3 – подложка; 4 – резистивный слой;
5 – защитный слой; 6 – контакты

При воздействии температурного поля происходят растяжение-сжатие и изгиб слоев рассматриваемой структуры. В соответствии с классификацией основание 1 и слои 3, 4 и 5 следует считать «жесткими» слоями, деформация которых подчиняется гипотезам Кирхгофа – Лява. Так как слои 4 и 5 являются достаточно тонкими, то эти гипотезы применимы для трехслойного пакета из слоев 3–4–5. Клеевой шов считается «мягким», т.е. основной деформацией шва является сдвиг. Заменяем трехслойную пластину эквивалентной ей в смысле жесткости однослойной пластиной с приведенными характеристиками E , ν , α . Для определения приведенных характеристик используем модель, основанную на том, что жесткость слоя с приведенными характеристиками равна жесткости слоистого пакета [10]. В качестве элемента приведения принимаем подложку. В этом случае применительно к рассматриваемой модели приведенный модуль и коэффициент Пуассона будут определяться выражениями:

$$E = E_3 \frac{1 - \nu^2}{1 - \nu_3^2} \beta; \quad \nu = \nu_3 + \bar{h}_4 \nu_4 + \bar{h}_5 \nu_5. \quad (1)$$

Здесь коэффициент приведения вычисляется по формуле

$$\beta = 1 + \bar{E}_4 \bar{h}_4^3 + \bar{E}_5 \bar{h}_5^3 + 12 \left(\bar{z}_3^2 + \bar{E}_4 \bar{h}_4 \bar{z}_4^2 + \bar{E}_5 \bar{h}_5 \bar{z}_5^2 \right), \quad (2)$$

где $\bar{E}_k = \frac{E_k (1 - \nu_3)}{E_3 (1 - \nu_k)}$; $\bar{h}_k = h_k / H_3$; $\bar{z}_k = z_k / H_3$ при $k = 3, 4, 5$; $H_3 = h_3 + h_4 + h_5$;

z_k – координата срединной поверхности k -го слоя. Если слои 4 и 5 являются тонкими ($\bar{h}_5 \ll 1$, $\bar{h}_4 \ll 1$), то можно полагать $\nu = \nu_3$, а $E = E_3 \beta$.

Аналогичная модель используется и для расчета приведенного ТКЛР [11], в соответствии с которой

$$\alpha = \alpha_3 f_3 (E_k, \nu_k, h_k, \Delta T_k, \alpha_k, n) \quad \text{при } k = 4, 5; n = 3, \quad (3)$$

где функция приведения f_3 имеет вид

$$f_3 = 1 + \frac{\bar{E}_4 \bar{h}_4 (\alpha_4 \Delta T_4 - 1) + \bar{E}_5 \bar{h}_5 (\alpha_5 \Delta T_5 - 1)}{1 + \bar{E}_4 \bar{h}_4 + \bar{E}_5 \bar{h}_5} \quad (4)$$

при $\bar{\alpha}_k = \alpha_k / \alpha_3$; $\bar{\Delta T}_k = \Delta T_k / \Delta T_3$ ($k = 4, 5$) – температура, соответствующая нормальным условиям.

При тепловых воздействиях в слоях платы возникают термомеханические нормальные напряжения $\sigma_x^{(k)}$, $\sigma_y^{(k)}$, $k = 1, 3$. В шве возникают касательные напряжения τ_{xz} , τ_{yz} , а его свойства характеризуются модулем сдвига

$$G = E_2 / 2(1 + \nu_2).$$

Предлагаемая расчетная схема трехслойной пластины с приведенными характеристиками верхнего слоя позволяет осуществлять предельный переход, соответствующий жесткому клеевому или паяному шву при $E_2 \rightarrow \infty$.

Для прогнозирования термомеханических напряжений в плоских соединениях из разнородных материалов разработан алгоритм расчета термомеханических напряжений, а также комплекс моделирующих программ, в котором учитываются физико-механические характеристики материалов слоев, их геометрические размеры, изменение температуры по слоям, а также наличие клеевых или паяных слоев, работающих на сдвиг.

Результирующие термомеханические напряжения в жестких слоях $\sigma_{x(\Sigma)}^{(k)}$, $\sigma_{y(\Sigma)}^{(k)}$ определяем как

$$\sigma_{x(\Sigma)}^{(k)} = \sigma_x^{(k)} + \sigma_{x(u)}^{(k)}; \quad \sigma_{y(\Sigma)}^{(k)} = \sigma_y^{(k)} + \sigma_{y(u)}^{(k)}, \quad (5)$$

где σ_x , σ_y – напряжения от растяжения (сжатия); $\sigma_{x(u)}$; $\sigma_{y(u)}$ – напряжения от изгиба слоев в направлении осей x и y соответственно.

Из уравнений равновесия и совместности деформаций слоев нормальные напряжения для подложки определяются из системы дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} - \chi_1 f + \nu_1 \chi_2 \varphi + \lambda = 0, \quad \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} - \chi_1 \varphi + \nu_1 \chi_2 f + \lambda = 0. \quad (6)$$

Здесь введены следующие обозначения: $f = f(x, y) = \sigma_x^{(3)}$;
 $\varphi = \varphi(x, y) = \sigma_y^{(3)}$ – функции напряжений в подложке;

$$\chi_1 = G \frac{L_x^2}{h_2 h_3} \left(\frac{1}{E_3} + \frac{h_3}{h_1} \frac{1}{E_1} \right); \quad \chi_2 = G \frac{L_x^2}{h_2 h_3} \left(\frac{\nu_3}{\nu_1 E_3} + \frac{h_3}{h_1} \frac{1}{E_1} \right);$$

$$\lambda = G \frac{L_x^2}{h_2 h_3} (\alpha_1 \Delta T_1 - \alpha_3 \Delta T_3) - \text{обобщенные безразмерные параметры.}$$

Для удобства расчетов введем безразмерные координаты: $x = x^* / L_x$,
 $y = y^* / L_y$, $\bar{L} = L_x / L_y$, где x^* , y^* – соответствующие размерные координаты.

Граничные условия для системы уравнений (6) имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} f = 0 \text{ при } x = 1; \quad \frac{\partial f}{\partial x} = 0 \text{ при } x = 0; \\ \varphi = 0 \text{ при } y = 1; \quad \frac{\partial \varphi}{\partial y} = 0 \text{ при } y = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Для решения системы уравнений (6) применим метод малого параметра в форме

$$f(x, y) = \sum_{i=0}^m f_i(x, y) \nu_1^i, \quad \varphi(x, y) = \sum_{i=0}^m \varphi_i(x, y) \nu_1^i, \quad (8)$$

где $i = 0, 1, 2, \dots, m$, а $(m+1)$ – число членов, удерживаемых в рядах (8).

Подставляя решение (8) в (6) и приравнявая функции при одинаковых степенях ν_1 , получим $(m+1)$ систем уравнений относительно функций напряжений f_i и φ_i , которые можно обобщить в следующей форме:

$$\frac{\partial^2 f_i}{\partial x^2} - \chi_1 f_i = -\chi_2 \varphi_{i-1}; \quad \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial y^2} - \chi_1 \varphi_i = -\chi_2 f_{i-1};$$

где

$$f_{(-1)} = \varphi_{(-1)} = -\frac{\lambda}{\chi_2}; \quad i = 0, 1, 2, \dots, m. \quad (9)$$

Частные решения системы уравнений (9) ищем методом вариации произвольных постоянных, удовлетворяя условиям (7). Окончательно получим

$$\begin{aligned} f_i(x, y) &= C_i \operatorname{ch}(kx) + f_i^*(x, y); \\ \varphi_i(x, y) &= D_i \operatorname{ch}(ky) + \varphi_i^*(x, y), \end{aligned} \quad (10)$$

где $C_i = -\frac{\chi_2}{k} \frac{1}{\operatorname{ch} k} \int_0^1 \operatorname{sh}[k(u-1)] \varphi_{i-1}(u, y) du$;

$$f_i^*(x, y) = \frac{\chi_2}{k} \int_0^x \operatorname{sh}[k(u-x)] \cdot \varphi_{i-1}(u, y) du; \quad \varphi_0 = \frac{\lambda}{\chi_2} \left[1 - \frac{\operatorname{ch}(ky)}{\operatorname{ch}(k\bar{l})} \right];$$

$$D_i = -\frac{\chi_2}{k} \frac{1}{\operatorname{ch}(k\bar{l})} \int_0^{\bar{l}} \operatorname{sh}[k(u-\bar{l})] f_{i-1}(u, x) du;$$

$$\varphi_i^*(x, y) = \frac{\chi_2}{k} \int_0^y \operatorname{sh}[k(u-y)] \cdot f_{i-1}(u, x) du; \quad f_0 = \frac{\lambda}{\chi_2} \left[1 - \frac{\operatorname{ch}(kx)}{\operatorname{ch}(k)} \right].$$

С учетом (10) и (8) определяются напряжения в подложке: $\sigma_x^{(3)}, \sigma_y^{(3)}$.

В результате численных расчетов установлено, что погрешность вычислений не превышает 1 % при удержании в рядах (8) трех членов ряда.

Нормальные напряжения, возникающие в основании, определяются выражениями

$$\sigma_x^{(1)} = -h_3 h_1^{-1} \sigma_x^{(3)}; \quad \sigma_y^{(1)} = -h_3 h_1^{-1} \sigma_y^{(3)}. \quad (11)$$

Полученные выше решения справедливы для случая, когда пластина остается плоской. В действительности она изгибается под действием распределенных изгибающих моментов M_x^0 и M_y^0 , возникающих за счет внутренних напряжений $\sigma_x^{(k)}, \sigma_y^{(k)}$:

$$M_x^0 = -0,5 \sigma_x^{(3)} h_3 (h_1 + h_3 + 2h_2); \quad M_y^0 = -0,5 \sigma_y^{(3)} h_3 (h_1 + h_3 + 2h_2). \quad (12)$$

Величины изгибных напряжений определяются соотношениями:

$$\sigma_{x(u)}^{(k)} = \frac{M_x^0 E_k}{D(1-\nu_k^2)} z; \quad \sigma_{y(u)}^{(k)} = \frac{M_y^0 E_k}{D(1-\nu_k^2)} z, \quad (13)$$

где суммарная цилиндрическая жесткость D трехслойной пластины определяется с учетом того, что жесткость и толщина шва являются достаточно малыми:

$$D = \frac{E_1 h_1^3}{12(1-\nu_1^2)} \beta_1, \quad \beta_1 = 1 + \bar{E}_3 \bar{h}_3^3 + 12(\bar{h}_3^2 + \bar{E}_3 \bar{h}_3 \bar{z}_3^2)$$

при $\bar{z}_3 = (h_1 + h_3 + 2h_2) / 2h_1$.

Касательные напряжения в шве вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned}\tau_{xz} &= h_3 \frac{\partial \sigma_x^{(3)}}{\partial x} = -h_1 \frac{\partial \sigma_x^{(1)}}{\partial x}; \\ \tau_{yz} &= h_3 \frac{\partial \sigma_y^{(3)}}{\partial y} = -h_1 \frac{\partial \sigma_y^{(1)}}{\partial y}.\end{aligned}\quad (14)$$

3. Численный анализ НДС подложки

С учетом изменения параметров слоев проведен анализ изменения термомеханических напряжений на поверхности подложки, где расположены резистивные элементы. Проведенные численные исследования показали хорошую сходимость разработанного алгоритма расчета и совпадение расчетных значений термомеханических напряжений и напряжений, определенных экспериментальным путем на тестовых моделях, соответствующих реальным конструкциям микросхем [12]. При этом выявлено существенное влияние термомеханических напряжений на изменение сопротивления и дифференциальную нелинейность наборов тонкопленочных резисторов (ТПР), входящих в состав микросхем.

В качестве материала основания рассматривались пресс-материал АГ-4В, ковар 29НК, керамика ВК-99. Материал подложки – ситалл СТ50-1. Расчеты выполнены для различных значений модуля сдвига клеевого шва G при толщинах $H_2 = 0,1$ мм, что соответствует применению «мягких» (типа «Виксинт У2-28») и «жестких» (типа ВК-9) клеев. Некоторые результаты исследования распределения термомеханических напряжений по поверхности подложки с размерами $2L_x \times 2L_y = (15 \times 8)$ мм² приведены на рис. 2–4 при условии, что температура всей конструкции равна 125 °С. В силу симметрии эпюры термомеханических напряжений представлены для четверти поверхности платы в безразмерных координатах $\bar{x} = x/L_x$; $\bar{y} = y/L_y$.

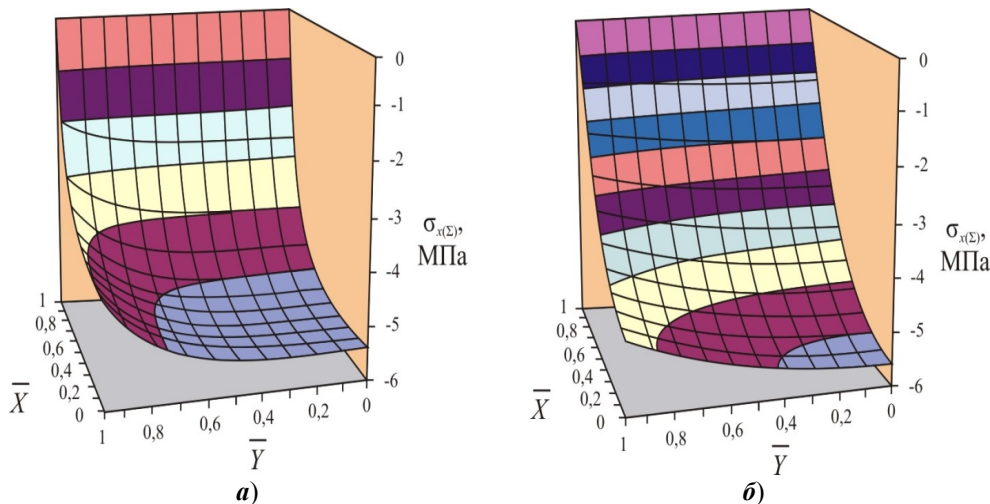


Рис. 2. Напряжения $\sigma_{x(\Sigma)}$ на верхней поверхности подложки.

Материал основания – АГ-4В: **a** – $G = 500$ МПа; **б** – $G = 50$ МПа

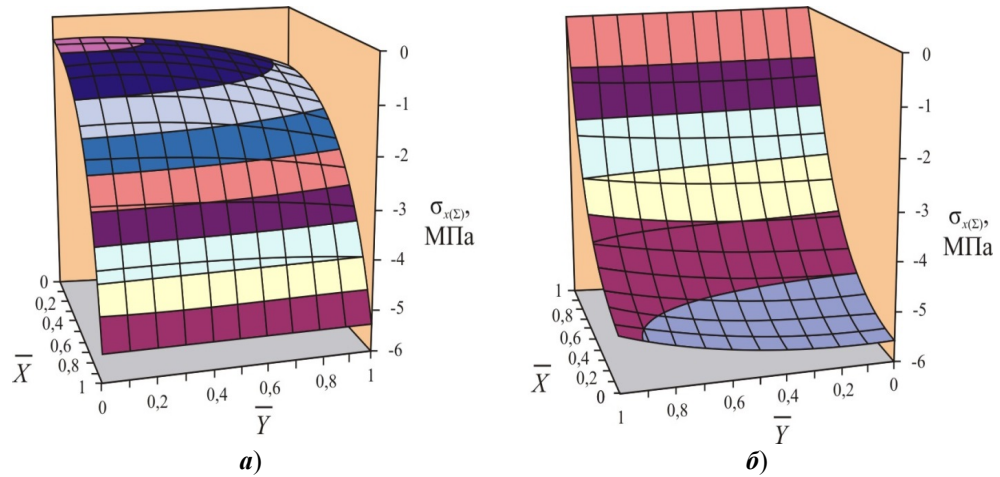


Рис. 3. Напряжение $\sigma_{x(\Sigma)}$ для материала основания: *а* – 29НК; *б* – керамика ВК-99

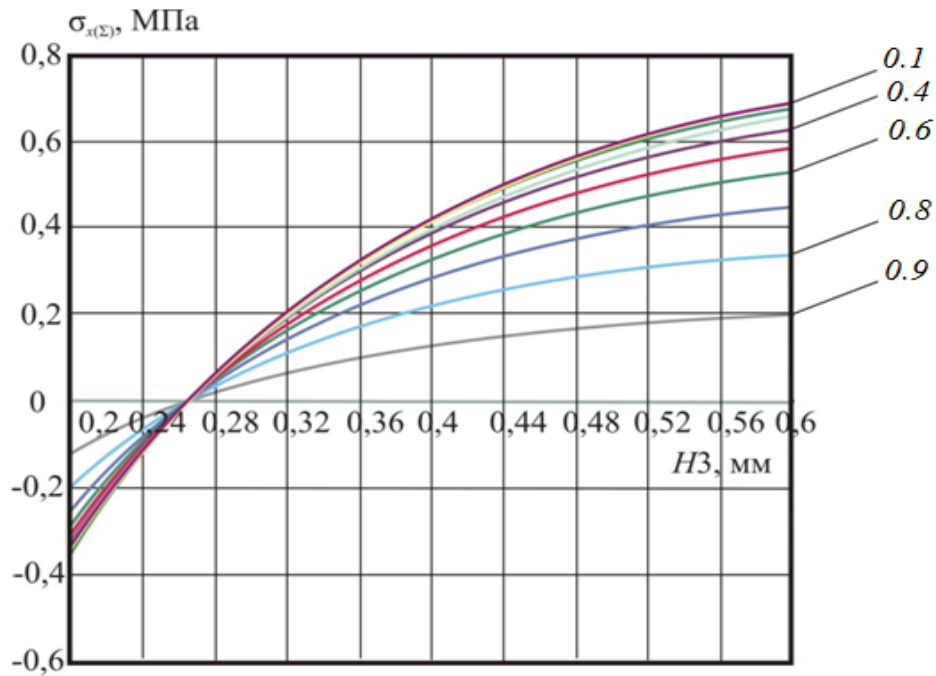


Рис. 4. Максимальные напряжения $\sigma_{x(\Sigma)}$ на верхней поверхности подложки при $y = 0$ для материала основания 29НК при разных толщинах

На рис. 2 показаны распределения напряжений на верхней поверхности подложки в зависимости от жесткости клеевого шва. При уменьшении его жесткости напряжения уменьшаются, а их распределение по поверхности платы, где расположены резистивные элементы, становится более равномерным, что приводит к стабилизации электропараметров ТПР и стабилизации метрологических характеристик микросхемы в целом. На рис. 3 показано распределение напряжений по поверхности подложки в зависимости от мате-

риала основания. На рис. 4 показаны зависимости напряжений $\sigma_x(\Sigma)$ от толщины подложки.

Как следует из анализа рис. 4, оптимальная толщина подложки, при которой в рассматриваемой конструкции термомеханические напряжения равны нулю, составляет $H_3 = 0,265$ мм. Цифрами на графиках показаны значения безразмерной координаты $\bar{x}$, которая изменяется от 0 до 1. Это позволяет обосновать проектные решения при разработке РЭС ответственного назначения.

Заключение

Моделирование НДС большого числа типоразмеров микросборок, содержащих многослойные платы, показало, что для обеспечения стабильных метрологических характеристик в процессе эксплуатации на технологических операциях изготовления необходим обязательный контроль толщины клеевого шва, а также применение более мягких клеевых композиций.

При конструировании толстых плат в зависимости от применяемых размеров и материалов слоев следует выбирать их оптимальные геометрические параметры, обеспечивающие минимизацию и более равномерное распределение термомеханических напряжений в зонах расположения тензорезистивных элементов.

Применение математического моделирования НДС сложных конструкций изделий на основе предложенных моделей позволяет на ранних этапах их проектирования за счет конструкторско-технологических решений создавать микросборки с повышенной точностью, термостабильностью и надежностью в требуемом эксплуатационном режиме внешних воздействий.

Список литературы

1. **Юрков, Н. К.** Технология радиоэлектронных средств : учебник / Н. К. Юрков. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – 640 с.
2. **Лугин, А. Н.** Экспериментальные исследования влияния термомеханических напряжений и ТКС тонкопленочных резисторов / А. Н. Лугин, А. Н. Литвинов, Н. В. Волков // Электронная промышленность. – Деп. № Р- 5512. – 2001. – С. 28.
3. **Литвинов, А. Н.** Тонкопленочные наборы резисторов при тепловых воздействиях / А. Н. Лугин, А. Н. Литвинов, М. М. Оземша // Петербургский журнал электроники. – 2001. – № 1. – С. 40–46.
4. **Болотин, В. В.** Механика многослойных конструкций / В. В. Болотин, Ю. Н. Новичков. – М. : Машиностроение, 1980. – 375 с.
5. **Литвинов, А. Н.** Методы расчета эффективности применения гетерогенных вибродемпфирующих покрытий для несущих конструкций сложной формы / А. Н. Литвинов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 4 (12). – С. 160–171.
6. **Бардзокас, Д. И.** Математическое моделирование физических процессов в композиционных материалах периодической структуры / Д. И. Бардзокас, А. И. Зобнин. – М. : Едиториал УРСС, 2003. – 376 с.
7. **Сендецки, Дж.** Механика композиционных материалов / Дж. Сендецки. – М. : Мир, 1978. – 567 с.
8. **Фокин, А. Г.** Эффективные модули упругости композита, составленные из анизотропных слоев / А. Г. Фокин, Т. Д. Шермегор // Механика полимеров. – 1975. – № 3. – С. 408–413.

9. **Литвинов, А. Н.** Модель для расчета эффективных характеристик слоистых структур / А. Н. Литвинов, Д. В. Артамонов // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий : материалы междунар. науч.-практ. конф. – М. : МИЭМ НИУ ВирЭ, 2012. – С. 190–195.
10. **Литвинов, А. Н.** Моделирование напряженно-деформированного состояния многослойных гетерогенных структур / А. Н. Литвинов, М. А. Литвинов // Перспективные информационные технологии для авиации и космоса (ПИТ-2010) : тр. междунар. конф. – Самара : Изд-во СГУ им. С. П. Королева, 2010. – С. 642–646.
11. **Литвинов, А. Н.** Прикладная модель для расчета приведенного ТКЛР плоских гетерогенных структур / А. Н. Литвинов, М. А. Литвинов, В. В. Смогунов // Математические и компьютерное моделирование естественнонаучных и социальных проблем : сб. статей IV Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза : Поволжский дом знаний, 2010. – С. 213–216.
12. **Данилова, Е. А.** Моделирование напряженно-деформированного состояния печатных плат при тепловых воздействиях / Е. А. Данилова, А. Н. Литвинов, Н. К. Юрков // Механика и процессы управления : материалы XXXXIII Всерос. симп. – М. : РАН, 2013. – Т. 1. – С. 48–58.

References

1. Yurkov N. K. *Tekhnologiya radioelektronnykh sredstv: uchebnik* [Technology of radio electronic devices: textbook]. Penza: Izd-vo PGU, 2012, 640 p.
2. Lugin A. N., Litvinov A. N., Volkov N. V. *Elektronnaya promyshlennost'* [Electronic industry]. Dep. No. R- 5512. 2001, p. 28.
3. Litvinov A. N., Lugin A. N., Ozemsha M. M. *Peterburgskiy zhurnal elektroniki* [Saint-Petersburg journal of electronics]. 2001, no. 1, pp. 40–46.
4. Bolotin V. V., Novichkov Yu. N. *Mekhanika mnogosloynnykh konstruksiy* [Mechanics of multilayered structures]. Moscow: Mashinostroenie, 1980, 375 p.
5. Litvinov A. N. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskies nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2009, no. 4 (12), pp. 160–171.
6. Bardzokas D. I., Zobnin A. I. *Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov v kompozitsionnykh materialakh periodicheskoy struktury* [Mathematical modeling of physical processes in composite materials of periodic structure]. Moscow: Editorial URSS, 2003, 376 p.
7. Sendetski Dzh. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov* [Mechanics of composite materials]. Moscow: Mir, 1978, 567 p.
8. Fokin A. G., Shermegor T. D. *Mekhanika polimerov* [Mechanics of polymers]. 1975, no. 3, pp. 408–413.
9. Litvinov A. N., Artamonov D. V. *Innovatsii na osnove informatsionnykh i kommunikatsionnykh tekhnologiy: materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Innovations on the basis of information and communication technologies: proceedings of the International scientific and practical conference]. Moscow: MIEM NIU VIRE, 2012, pp. 190–195.
10. Litvinov A. N., Litvinov M. A. *Perspektivnye informatsionnye tekhnologii dlya aviatsii i kosmosa (PIT-2010): tr. mezhdunarodn. konf.* [Prospective information technologies for aerospace sector (PIT-2010): proceedings of the International conference]. Samara: Izd-vo SGU im. S. P. Koroleva, 2010, pp. 642–646.
11. Litvinov A. N., Litvinov M. A., Smogunov V. V. *Matematicheskie i komp'yuternoe modelirovanie estestvennonauchnykh i sotsial'nykh problem: sb. statey IV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Mathematical and computer modeling of natural scientific and social problems: collected articles of IV International scientific and technical conference]. Penza: Povolzhskiy dom znaniy, 2010, pp. 213–216.

12. Danilova E. A., Litvinov A. N., Yurkov N. K. *Mekhanika i protsessy upravleniya: materialy XXXXIII Vseros. simp.* [Mechanics and processes of management: proceedings of XXXXIII All-Russian symposium]. Moscow: RAN, 2013, vol. 1, pp. 48–58.

Литвинов Александр Николаевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра теоретической и прикладной
механики и графики, Пензенский
государственный университет (Россия,
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: litvinov@pnzgu.ru

Litvinov Aleksandr Nikolaevich

Doctor of engineering science, professor,
sub-department of theoretical and applied
mechanics and graphics, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Хади Одей Шакер

аспирант, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: aodayshaker@mail.ru

Khadi Odey Shaker

Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Юрков Николай Кондратьевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: yurkov_nk@mail.ru.

Yurkov Nikolay Kondrat'evich

Doctor of engineering sciences, professor,
head of sub-department of radio equipment
design and production, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

УДК 621.396.6.001:004.4.

Литвинов, А. Н.

Моделирование напряженно-деформированного состояния слоистых структур радиоэлектронных средств при технологических и эксплуатационных воздействиях / А. Н. Литвинов, О. Ш. Хади, Н. К. Юрков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 4 (32). – С. 146–157.

*А. И. Богомолов, В. М. Голощапов,
В. Я. Савицкий, А. Ю. Муйземнек, Р. С. Зиновьев*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ТЕПЛОВЫХ МАШИН

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования является цапфенный узел трения импульсной тепловой машины (ИТМ). Предметом исследования является влияние микроструктуры полимерного композиционного материала на прочность конструкции подшипника скольжения (ПС), работающего в условиях реверсивного трения при граничной смазке и циклического импульсного нагружения. Целью работы является формирование общего подхода к оценке прочности гетерогенных полимерных ПС ИТМ на этапе проектирования.

Материалы и методы. Для изготовления ПС использован армированный реактопласт на основе эпоксифенолоформальдегидного связующего, полученный послойной намоткой тканного наполнителя. Напряженно-деформированное состояние ПС оценивалось методом конечных элементов.

Результаты. Исследовано влияние микроструктуры полимерного композиционного материала на несущую способность ПС, идентифицированы параметры математической модели; с использованием компьютерной модели репрезентативной ячейки и конструкции ПС проанализировано поведение конструкции подшипника под действием импульсной нагрузки. Достоверность полученных результатов подтверждается полигонными испытаниями ИТМ.

Выводы. Предложенный подход к моделированию температурного и напряженно-деформированного состояния ПС из полимерного композиционного материала путем гомогенизации гетерогенных структур в виде элементарных репрезентативных ячеек эквивалентными однородными материалами, несущими адекватную информацию о физико-механических свойствах, позволяет избирательно управлять эксплуатационными свойствами узлов трения импульсного нагружения и производить эффективную замену латунных и бронзовых ПС.

Ключевые слова: импульсная тепловая машина, подшипник скольжения, полимерный композиционный материал, репрезентативная ячейка, гомогенизация, геометрическая модель, конечно-элементная модель, напряженно-деформированное состояние.

*A. I. Bogomolov, V. M. Goloshchapov,
V. Ya. Savitskiy, A. Yu. Muizemnek, R. S. Zinov'ev*

STUDY OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS' MICROSTRUCTURE INFLUENCE ON OPERATING ABILITIES OF JOURNAL BEARINGS IN PULSE HEAT ENGINE

Abstract.

Background. The object of the study is a journal friction unit of an impulse heat engine (IHE). The subject of study is the effect of the polymer composite material's (PCM) infrastructure on structural strength of a journal bearing (JB), operating under reversing friction with boundary lubrication and cyclic pulsed stressing. The aim

is to create a common approach to assessing the strength of the heterogeneous polymer JB IHE at the design stage.

Materials and methods. To produce JB the authors used a reinforced thermosetting plastic based on the phenol-epoxy-formaldehyde binder, obtained by layerwise winding of a woven filler. The mode of deformation (MD) was estimated by the finite element method.

Results. The authors researched the influence of the microstructure on bearing capacity of PCM JB to identify parameters of a mathematical model; using a computer model of a representational cell and JB design they analyzed the behavior of the bearing structure under pulsed stressing. Authenticness of the results is confirmed by IHE ground tests.

Conclusions. The proposed approach to modeling of temperature and MD of JB from PCM by homogenization of heterogeneous structures in the form of representative elementary cells with an equivalent homogeneous material carrying adequate information about the physical and mechanical properties, allows to selectively control the performance characteristics of friction units of pulsed stressing and to effectively replace brass and bronze JB.

Key words: impulse heat engine, journal bearing, polymer composite, representative cell homogenization, geometric model, finite element model, mode of deformation.

Введение

Мировые тенденции замены металлов и их сплавов на полимерные материалы реализуются в различных видах техники. Обоснованное применение полимерного композиционного материала (ПКМ) в импульсной тепловой машине (ИТМ) требует формирования оригинального подхода к конструированию и изготовлению тяжело нагруженных элементов конструкции, к числу которых относится цапфенный узел соединения верхнего станка с нижним. Применяемый в данном узле латунный подшипник скольжения (ПС) в начальный период эксплуатации работает в режиме граничного трения, которое в последующем превращается в сухое. Успешное решение проблемы сохранения прочностных характеристик ПС в условиях самосмазывания видится в изготовлении аналогов из ПКМ.

Особое место в ряду ПКМ занимают армированные реактопласты, образованные послойным нанесением (намоткой) непрерывных волокон, ленточных или тканых наполнителей. Свойства ПКМ определяются свойствами входящих в его состав компонентов, их соотношением, характером взаимодействия на границе раздела матрица–наполнитель и технологией изготовления. Данный класс антифрикционных материалов обеспечивает применение ПС с направленной анизотропией свойств. Замена медьсодержащих сплавов на ПКМ позволяет снизить стоимость и массу ПС, упростить конструкцию узла трения за счет исключения системы маслопроводящих каналов. К перечисленным достоинствам, обуславливающим замену в узлах трения деталей из медьсодержащих сплавов на детали из ПКМ, следует также отнести повышение коррозионной стойкости, улучшение легкосъемности, развитость сырьевой базы для изготовления исходных компонентов, значительно меньшую привлекательность для расхищения запасных частей.

Вместе с тем опыт внедрения узлов трения с деталями из ПКМ показывает, что наряду с перечисленными достоинствами они характеризуются от-

носителем невысокой точностью и стабильностью размеров, наличием поверхностных и межслойных дефектов, сравнительно большим разбросом физико-механических свойств, низкой теплопроводностью и некоторыми другими недостатками, побуждающими исследователей избирательно применять детали из ПКМ [1].

К настоящему времени накоплен определенный справочный материал по теплофизическим, механическим и триботехническим характеристикам ПКМ. Однако в рамках конверсионных программ для изделий машиностроения предлагаются новые композиционные материалы, использование которых в конструкциях ИТМ представляет практический интерес.

1. Анализ технологических приемов снижения уровня дефектности подшипников скольжения из полимерных композиционных материалов

Обеспечение качества изготавливаемого ПС тесным образом связано с решением проблемы монолитности, которая требует комплексного анализа всех этапов процесса переработки ПКМ, учитывающего предысторию формирования физико-механических и теплофизических свойств материалов, полей деформаций и напряжений, в значительной степени определяющих условия возникновения дефектов в материале. Анализируя характер нарушений целостности полимерной матрицы, можно выделить два наиболее типичных вида потери монолитности ПКМ: разрушение прослойки полимерной матрицы и нарушение адгезионного соединения армирующих волокон и матрицы, проявляющегося чаще всего в виде канальных микротрещин вдоль армирующих волокон, несплошностей в зоне изогнутых волокон, трещин в окрестности инородных включений и т.д. [2].

Природа возникновения таких дефектов весьма разнообразна, их появление определяется комплексом физико-химических и механических процессов, проявляющихся на всех этапах изготовления ПС. Причиной их возникновения могут быть растягивающие радиальные микро- и макроструктурные напряжения, наличие концентраторов напряжений в виде пор, концов армирующих волокон, инородных включений, а также микроструктурные напряжения при очень плотной упаковке арматуры из параллельных волокон (канальные дефекты) и др. Такого же рода дефекты образуются при дополнительном трансверсальном армировании заготовки короткими волокнами. К ухудшающим товарный вид, а в отдельных случаях значительно снижающим надежность узла трения, относятся локальные макроскопические дефекты рабочей поверхности ПС, проявляющиеся в натеках смолы, обнажении текстуры и разлохмачивании волокон наполнителя, в скрытых порах и раковинах, царапинах и забоинах. Большое количество и концентрация таких дефектов в ограниченных зонах могут служить причиной возникновения очагов первоначального разрушения антифрикционного слоя (АС) в одном месте с постепенным развитием разрушения по всей рабочей поверхности.

С определенной степенью уверенности можно утверждать, что большинство указанных дефектов обусловлено несовершенством технологического процесса. Поэтому разработка и внедрение технологических приемов по снижению уровня дефектности ПС из ПКМ немыслимы без анализа причин возникновения и развития микро- и макродефектов в процессе технологического процесса изготовления. Системные исследования в области механики ПКМ, проведенные В. Т. Томашевским, В. С. Яковлевым, В. Н. Шалыгиным,

В. В. Болотиним, Н. С. Ениколоповым, В. В. Васильевым, Ю. М. Тарнопольским и др., открыли возможности использования новых путей снижения брака и повышения надежности конструкций из ПКМ в экстремальных условиях эксплуатации.

Появление и развитие предварительной дефектности в структуре ПКМ в виде субмикроскопических и микроскопических трещин обуславливается действием температурно-технологических напряжений, возникающих в результате анизотропии механических и теплофизических свойств, прежде всего коэффициентов линейного теплового расширения полимерной матрицы и армирующего волокна. Большое влияние на свойства ПКМ, их поведение в различных средах оказывают поры. Снижение механических свойств композита во многом определяется увеличением доли волокон, которые ведут себя в зоне поры как несвязанный пучок. Особенно большое влияние оказывают поры на прочность ПКМ при сжатии и межслоевом сдвиге [3]. Имеются экспериментальные данные [4, 5], из которых следует, что увеличение содержания пустот с 0,6 до 6 % снижает межслоевую прочность на 45 % и предел прочности при сжатии на 37 %. Увеличение пористости полимерной матрицы от 0,02 до 0,12 % сопровождается падением ударной вязкости углепластика в 3 раза [6].

Микроскопические исследования образцов различных армированных пластиков показали, что пористость в этих материалах можно разделить на две группы по механизму образования [7]:

- пористость, обусловленная недостаточной пропиткой наполнителя связующим;
- пористость, образующаяся при отверждении связующего в результате выделения низкомолекулярных летучих веществ.

Кроме того, причиной порообразования может служить адсорбированная на волокнах влага.

Пористость структуры ПКМ первой группы объясняется тем, что при пропитке волокнистого наполнителя сильно повышается роль капиллярных явлений и «защемленного» воздуха, который образуется при быстром продвижении фронта связующего по крупным пустотам между волокнами, когда в них не успевает проникнуть связующее. Значительного уменьшения пористости, образующейся по данному механизму, можно достигнуть установлением оптимального режима пропитки наполнителя, например, пропиткой волокна под давлением или в вакууме, с использованием вибрационных систем [8].

Особый интерес представляет пористость второй группы, образующаяся в результате выделения летучих веществ при полимеризации связующего. Вследствие достаточно больших размеров пор, образующихся по данному механизму, значительно снижаются механические свойства композита. В табл. 1 показано влияние способа изготовления изделий на размеры пористости в стеклопластиках на основе стеклоткани Т-10 и связующего ЭДТ-10 (пористость определялась методом выжигания); в табл. 2 – значения пористости и свойств однонаправленного углепластика УП-Л/20-П в зависимости от температурно-силового режима формования.

Пооперационный анализ возникновения дефектов при изготовлении изделий из ПКМ показывает следующее.

Изготовление связующего – процесс смешения двух и более компонентов в смесителях. На этой операции закладываются основы стабильности

свойств материала в изделиях. Воспроизводимость физико-механических характеристик ПКМ во многом обеспечивается точностью дозировки, равномерностью смешения составляющих компонентов, отличающихся между собой плотностью и вязкостью, отсутствием в приготовленном связующем воздушных пузырьков кавитационного происхождения и инородных включений.

Таблица 1
Зависимость пористости от способа формования [9]

Способ формования	Технологические условия	Объемная пористость, %
Пропитка под вакуумом и давлением	Сушка ткани при 720 К в течение 18 ч, выдержка связующего под вакуумом в течение 6 ч	1,0
Пропитка под вакуумом и давлением	Сушка ткани при 720 К в течение 6 ч, связующее под вакуумом не выдерживалось	1,5 – 2,6
Намотка («сухая»)	Давление 0,8–1,0 МПа	5,0 – 7,2
Пресс-камерное формование	Давление 1,5–1,7 МПа	6,1 – 8,5
Вакуумное формование	Давление 0,03 МПа	8,1 – 9,9
Контактное формование (ручная выкладка)	Без давления при отверждении	10,6 – 15,3

Таблица 2
Свойства однонаправленного углепластика УП-Л/20-П

№ режима	Пористость, %	Физико-химические характеристики		Прочность при сжатии		Прочность при межслоевом сдвиге	
		плотность, кг/м ³	содержание смолы, %	предел прочности, МПа	коэффициент вариации, %	предел прочности, МПа	коэффициент вариации, %
1	3,0	1470	25,7	704,0	4,93	53,0	17,9
2	4,0	1470	25,7	656,3	4,31	53,0	17,9
3	0,5	1466	26,3	770,0	2,71	58,0	1,87

Основная цель *пропитки* наполнителя (изготовления препрега) – обеспечить полное заполнение связующим всех межволоконных пространств и получить требуемое соотношение армирующего и матричного материалов. Раствор связующего при контакте с волокнистой системой под действием капиллярных сил начинает подниматься по каналам между нитями наполнителя, при этом скорость и высота подъема жидкости будут больше в зонах меньшего радиуса мениска смачивающей поверхности связующего, т.е. по линиям контакта волокон. Чем меньше концентрация и вязкость раствора, тем выше скорость его капиллярного движения. При пропитке в препреге возможно появление воздушных пузырей, механизм образования которых представляется следующим образом [10]. Высокая скорость движения молекул растворителя и близкие к нулю краевые углы смачивания приводят к тому, что мономолекулярный слой растворителя как бы обтекает воздушную среду, находящуюся в межволоконном канале. Выдавливание из него воздуха

осуществляется мигрирующим следом мениска раствора. Если в канале имеются скопления шлихты или аппрета, скрутка или переплетение волокон, то значительно выступающие вперед края мениска с меньшей концентрацией раствора, встречаясь с преградой, смыкаются, образуя воздушный пузырек. Кроме этого, необходимо учитывать то, что скорость капиллярного течения очень низка (2,5...5 см/мин). В основе же различных промышленных способов пропитки, разработанных инженерной практикой, скорость нанесения связующего на наполнитель (в серийно выпускаемых пропиточных машинах) составляет от 1 до 7,2 м/мин. Столь значительное несоответствие скоростей двух стадий процесса пропитки – нанесения связующего на наполнитель и капиллярного насыщения, особенно при использовании плохо подготовленного наполнителя, также может явиться причиной образования повышенной пористости в ПКМ.

При изготовлении препрега сушильная операция, в процессе которой из пропитанного наполнителя удаляется растворитель и осуществляется технологическое отверждение внедренного в армирующий наполнитель связующего, т.е. придание пропитанному наполнителю вязко-пластичного состояния, выполняется сразу же после операции пропитки.

Технологическая реализация операции изготовления препрега осуществляется методом протягивания армирующего наполнителя через ванночку со связующим на пропиточных машинах (рис. 1). Намотанный на приемную кассету препрег (рис. 2) пригоден для дальнейшей переработки в течение сроков жизнеспособности связующих.



Рис. 1. Общий вид пропиточной машины УПСМ-1

Намотка трубчатой заготовки осуществляется на специальных намоточных станках с программным управлением (рис. 3) или модернизированных токарных станках (рис. 4). Трубчатая заготовка заданной длины образуется путем послойного нанесения на вращающуюся технологическую оправку пропитанного наполнителя. Уплотнение структуры заготовки осуществляется натяжением волокон наматываемого наполнителя. С увеличением диаметра наматываемой заготовки обеспечивать необходимое давление формования становится проблематичным из-за ограниченной прочности наносимо-

го препрега. В таких случаях уплотнение создают прикаточным роликом в зоне контакта наматываемого препрега с поверхностью заготовки (рис. 5).

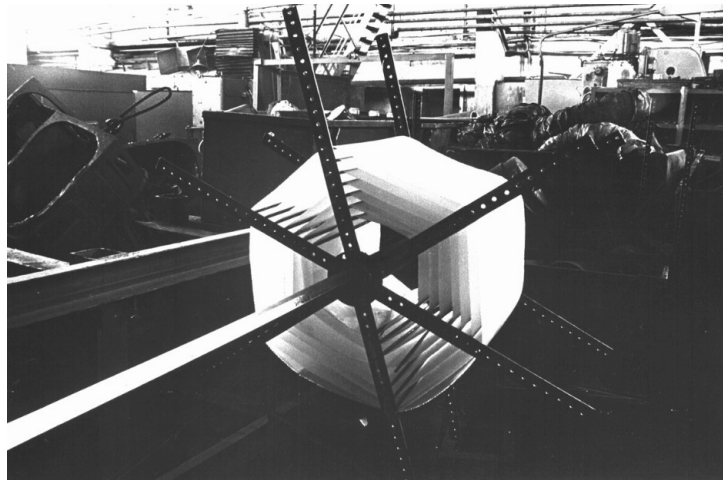


Рис. 2. Стержневая кассета с препрегом на основе стеклоткани

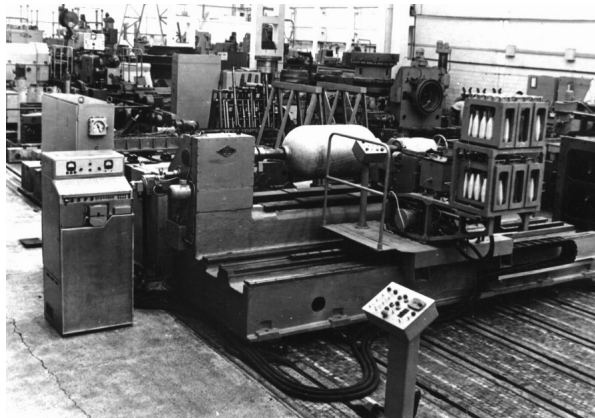


Рис. 3. Намоточный станок с программным управлением

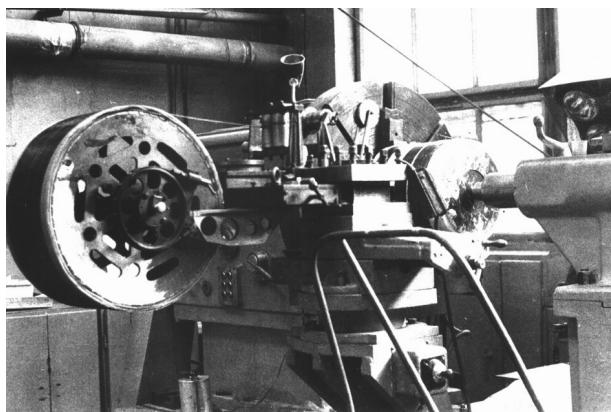


Рис. 4. Устройство для намотки трубчатых заготовок на модернизированном токарном станке

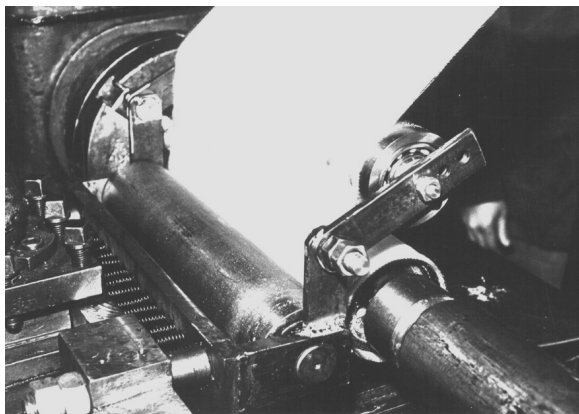


Рис. 5. Уплотнение трубчатой заготовки прикаточным роликом

Как видно, при намотке трубчатой заготовки принудительно формируются поля напряжений и деформаций, обеспечивающие необходимое уплотнение структуры и компенсирующие на всех последующих операциях технологического процесса возможные негативные последствия усадочных явлений в результате химических и фазовых превращений полимерной матрицы и структурной неоднородности армированного реактопласта. Сложность технологической реализации заданного давления уплотнения структуры усиливается необходимостью учета релаксации начальных усилий натяжения наполнителя и опрессовочных слоев, обусловленных фильтрацией жидкой полимерной матрицы в направлении убывания градиента давлений.

Таким образом, этап намотки можно считать одним из наиболее ответственных этапов в технологическом цикле переработки армированных реактопластов. Именно на этом этапе можно реализовать наиболее эффективные технологические приемы для борьбы с образованием дефектов типа текстурной волнистости (складки, свилеватость), нарушения сплошности (трещины, расслоения, раковины) и т.п.

При *нагревании* трубчатой заготовки на оправке происходит размягчение полимерной матрицы и переход ее в вязко-текучее состояние. Под воздействием поля давления, сформированного при намотке, интенсифицируются фильтрация размягченного связующего и его миграция от внутренних слоев к внешним. Этому способствует температурное расширение металлической оправки. Все это приводит к падению давления формования и к снижению уровня начальных деформаций и напряжений. Характер и интенсивность протекания процессов релаксации зависят от распределения температуры в полуфабрикате.

В процессе *полимеризации связующего* образуется молекулярная и надмолекулярная структура и полимерная матрица переходит в упругое состояние. Именно на этом этапе происходят структурные превращения, определяющие в конечном итоге качество готового изделия. Из-за химической усадки, которая для связующих на основе эпоксидных смол может достигать 9 %, изменяется после механических напряжений и деформаций, сформированное на предыдущем этапе отверждения. Появляются внутренние растягивающие напряжения, которые, несмотря на относительную малость, мо-

гут вызывать разрушение полимерной матрицы. Наличие в связующем газовых или воздушных включений существенно снижает пороговый энергетический уровень разрыва матрицы. В процессе отверждения в структуре материала создаются условия для образования дефектов типа текстурной волнистости.

При *охлаждении* заполимеризованной заготовки начинают формироваться температурно-технологические напряжения (ТТН), что инициирует образование макродефектов в виде нарушения сплошности и кольцевой ориентации армирующих волокон. Существенная неоднородность температурного поля, особенно проявляющаяся в толстостенных трубчатых заготовках, в совокупности с теплофизической неоднородностью армированного полимера, приводит к стесненному деформированию армирующих волокон, увеличению внутренних растягивающих усилий, что и является причиной возникновения макродефектов.

Дальнейшее *отверждение* сопровождается переходом через точку стеклования, что обуславливает довольно быстрое изменение агрегатного состояния и увеличение физико-механических характеристик полимерной матрицы. При этом в материале возникают ТТН, обусловленные анизотропией механических и теплофизических свойств и неравномерностью температурно-конверсионного поля, а также неоднородностью структуры. Однородная и неоднородная составляющие поля температур при охлаждении ПКМ вызывают растягивающие радиальные напряжения, соизмеримые с трансверсальной прочностью материала, что является одной из главных причин образования трещин. Неоднородность температурного поля при охлаждении заготовки из армированного реактопласта обуславливает фронтальный характер распространения зон перехода полимерной матрицы в стеклообразное состояние. Направление распространения – от наружной и внутренней поверхностей к срединной. При этом образуются жесткие своды, к которым по мере фронтального продвижения присоединяются новые объемы армированного полимера. Учитывая направленный характер температурной усадки и высокоэластичное состояние ПКМ в средней зоне, т.е. существенно более низкую прочность, чем в отвержденных областях, нетрудно заметить, что для образования разрывов не требуется значительных усилий.

2. Вычисление эффективных характеристик физико-механических свойств полимерного композиционного материала с учетом его микроструктуры

Проведенный анализ эволюции технологических дефектов показал, что существующие подходы к формированию бездефектной технологии основаны на экспериментально-интуитивных представлениях кинетики процессов и не позволяют формировать комплексную картину количественных температурных изменений, напряженно-деформированного состояния, степени влияния зарождающихся дефектов ПКМ в конструкциях изделий на стадиях производства и последующей эксплуатации. Успешное создание и применение пакетов прикладных программ моделирования исследуемых механизмов и эффектов в материалах со структурной неоднородностью открывает перспективы достоверного прогнозирования характеристик прочности и долговечно-

сти изделий различного функционального назначения. В основу предлагаемого подхода положен принцип гомогенизации гетерогенных структур в виде элементарных репрезентативных ячеек эквивалентными однородными материалами, несущими адекватную информацию о физико-механических свойствах.

В качестве примера рассмотрим репрезентативную ячейку армированного реактопласта на основе эпоксифенолформальдегидного связующего, полученного послойной намоткой тканого наполнителя (рис. 6), характеризующуюся следующими параметрами: линейная плотность нитей основы – 695,5 текс; линейная плотность нитей утка – 695,5 текс; диаметр нитей основы – 0,6 мм; диаметр нитей утка – 0,6 мм; угол между нитями основы и утка – 90° ; плотность укладки нитей основы – 9,09 нитей/см; плотность укладки нитей утка – 9,09 нитей/см; высота репрезентативной ячейки – 1,2 мм.

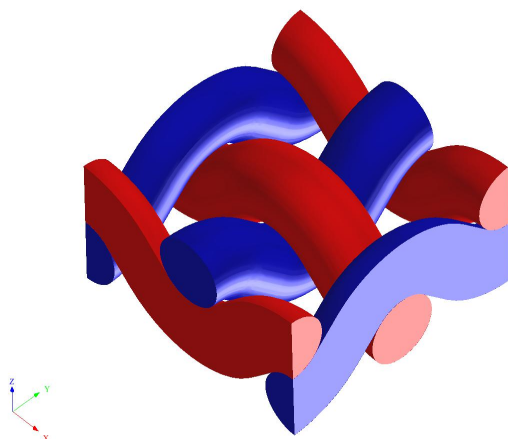


Рис. 6. Репрезентативная ячейка

Основываясь на результатах испытаний исходных компонентов рассматриваемого ПКМ, будем считать, что матрица имеет следующие характеристики физико-механических свойств: плотность – 1400 кг/м^3 ; модуль упругости – 3,7 ГПа; коэффициент Пуассона – 0,35; предел прочности при растяжении – 41 МПа; коэффициент линейного расширения – $1,8 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; удельная теплоемкость – $1740 \text{ Дж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$; коэффициент теплопроводности – $20 \text{ Дж/(м}\cdot^\circ\text{C}\cdot\text{с)}$.

Характеристики физико-механических свойств наполнителя следующие: плотность – 2400 кг/м^3 ; модуль упругости – 89 ГПа; коэффициент Пуассона – 0,22; предел прочности при растяжении – 4,3 ГПа; коэффициент линейного расширения – $6,25 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; удельная теплоемкость – $690 \text{ Дж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$; коэффициент теплопроводности – $0,879 \text{ Дж/(м}\cdot^\circ\text{C}\cdot\text{с)}$.

Для получения эффективных характеристик физико-механических свойств ПКМ репрезентативная ячейка была представлена конечно-элементной моделью (рис. 7), позволяющей описывать напряженно-деформированное (рис. 8) и температурное (рис. 9) состояния при растяжении вдоль глобальных осей координат, при сдвиге в плоскости и вне плоскости композита с учетом температурного градиента вдоль глобальных осей координат.

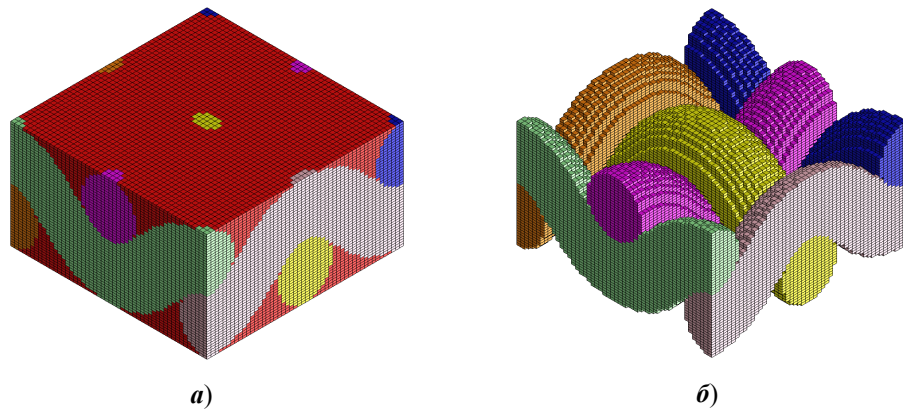


Рис. 7. Конечно-элементная модель репрезентативной ячейки:
a – тканый материал в полимерной матрице; **б** – только тканый материал

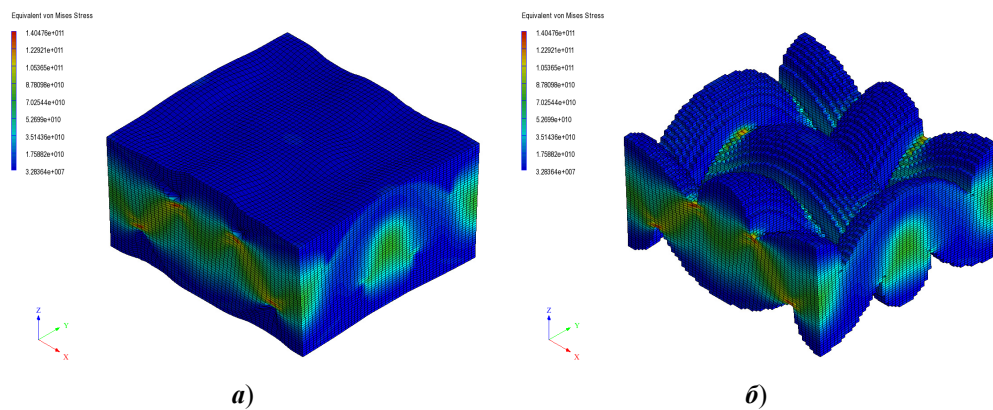


Рис. 8. Распределение приведенных по Мизесу напряжений
 в репрезентативной ячейке при одноосном растяжении вдоль оси x_1 ($\varepsilon_{11} = 3\%$):
a – тканый материал в полимерной матрице; **б** – только тканый материал

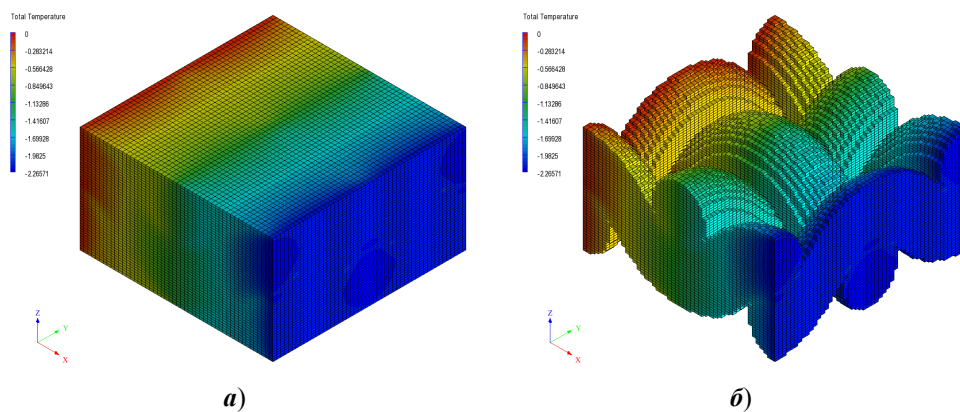


Рис. 9. Распределение температуры в репрезентативной ячейке
 (температурный градиент 100 °C/м): **a** – тканый материал
 в полимерной матрице; **б** – только тканый материал

С использованием метода гомогенизации Мори – Танака первого порядка и результатов расчетов напряженно-деформированного и температурного состояний репрезентативной ячейки были определены эффективные характеристики физико-механических свойств исследуемого ПКМ:

– матрица жесткости:

$$S = \begin{bmatrix} 17,4 & 7,1 & 8,6 & 0 & 0 & 0 \\ 7,1 & 17,4 & 8,6 & 0 & 0 & 0 \\ 8,6 & 8,6 & 17,0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3,78 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5,28 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5,28 \end{bmatrix} \text{ ГПа}; \quad (1)$$

– инженерные константы – модули упругости в продольном и поперечном направлениях – 12,5 ГПа; модуль упругости в трансверсальном направлении – 11,1 ГПа; коэффициент Пуассона в плоскости композита – 0,212; коэффициенты Пуассона вне плоскости композита – 0,349; модуль сдвига в плоскости композита – 3,78 ГПа; модуль сдвига вне плоскости композита – 5,28 ГПа; плотность композита – 1904 кг/м³;

– матрица коэффициентов линейного расширения:

$$\alpha = \begin{bmatrix} 1,3 & 0 & 0 \\ 0 & 10,5 & 0 \\ 0 & 0 & 10,5 \end{bmatrix} \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}; \quad (2)$$

– тензор теплопроводности

$$C = \begin{bmatrix} 8,16 & 0 & 0 \\ 0 & 8,16 & 0 \\ 0 & 0 & 6,5 \end{bmatrix} \text{ Дж/(м} \cdot \text{°C} \cdot \text{с)}. \quad (3)$$

Вычисленные эффективные характеристики физико-механических свойств ПКМ были положены в основу оценки температурного и напряженно-деформированного состояний ПС из ПКМ в эксплуатационных условиях нагружения.

3. Компьютерное моделирование температурного и напряженно-деформированного состояния подшипников скольжения из полимерных композиционных материалов

Обоснованная замена ПС из медьсодержащих сплавов на ПКМ определяет необходимость сравнительной оценки температурного и напряженно-деформированного состояния конструкционных материалов в зоне трения, а также распределение тепловых полей. Такая оценка была выполнена на основе конечно-элементного моделирования. Создание конечно-элементных моделей ПС из латуни ЛАЖМц 66-6-3-2 и армированных реактопластов на основе эпоксифенолоформальдегидного связующего, полученных послойной намоткой тканого наполнителя, проводилось с учетом схемы циклического

импульсного нагружения и условий их работы в изделии 2А19. Сформированная конечно-элементная модель ПС включала 608440 узлов 131600 гексаэдрических элементов.

Задача решалась в динамической связанной термоупругой постановке при условиях нестационарной теплопроводности. Решение системы нелинейных уравнений проводилось методом Ньютона – Рафсона, решение системы линейных уравнений на каждой итерации – методом сопряженных градиентов. Некоторые результаты компьютерного моделирования показаны на рис. 10.

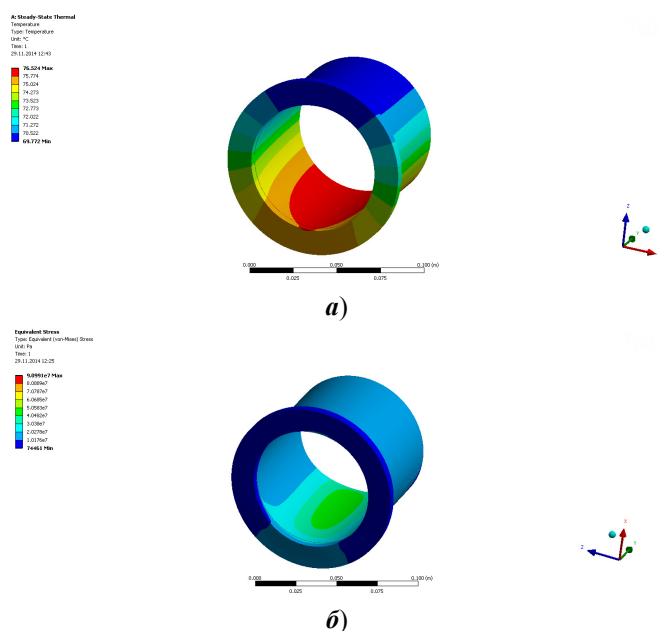


Рис. 10. Температурное (а) и напряженно-деформированного (б) состояние подшипника из полимерного композиционного материала при импульсном нагружении: а – распределение температуры; б – распределение приведенных по Мизесу напряжений

Результаты моделирования показали, что у полимерного ПС распределения силы трения и тепловых потоков в зоне трения более равномерные, а их максимальные значения меньше, чем у латунного, что препятствует резкому возрастанию температуры в зоне трения. Выявленные закономерности характерны для широкого диапазона импульсных нагрузок на полимерные ПС.

4. Перспективы реализации предлагаемого подхода

В соответствии с концепцией бездефектной технологии был разработан технологический процесс изготовления опытных образцов ПС. Содержание технологических операций изготовления трубчатых заготовок приведено в табл. 3.

В табл. 4 дана структурная характеристика разновидностей изготовленных образцов ПС для лабораторных триботехнических испытаний.

Таблица 3

Технологические параметры изготовления трубчатых заготовок

Этап	Операция	Наименование параметра	Величина
Изготовление препрега	Пропитка стеклоткани ТС-11-78 связующим ФФЭ-70 на машине УПСМ-1	Скорость пропитки, м/мин	0,5
		Температура связующего в ванночке, К	297 – 298
		Температура в шахтной печи по зонам, К	I – 363
			II – 373
			III – 373
	IV – 363		
	Хранение препрега	Температура, К	277
		Время, ч	48
		Усилие натяжения, Н·м ⁻¹	2000
		Скорость вращения оправки, об/мин	20
Температура оправки, К		293	
Образование заготовки методом «сухой» намотки	Опрессовка намоткой заготовки стеклотканой ЛЭС (шириной 30 мм)	Усилие натяжения, Н·м ⁻¹	2100 – 2200
		Количество опрессовочных слоев, шт.	2
		Шаг намотки, мм	30
		Величина нахлеста, мм	2
		Температура, К / время, ч	363/1+383/1+433/8+453/3
		Скорость подъема температуры, К·ч ⁻¹	60
Отверждение намотанной заготовки	Скорость охлаждения, К·ч ⁻¹ : до температуры 313 К (в печи): до комнатной температуры – на воздухе	15–17	
	Механическая обработка отвержденной трубчатой заготовки, изготовление кольцевых образцов и деталей	Скорость резания, м/мин	80–90
Глубина резания, мм: черновая обработка чистовая обработка поверхностных слоев		0,2–0,3 0,1	
Скорость продольной подачи, мм/об		0,05	
Скорость резания, м/мин		50–60	
Величина подачи, мм/об		0,2–0,3	

Таблица 4

Структурная характеристика армированных реактопластов

Наименование ПКМ	Материал АС	Материал подложки	Количество слоев		Толщина одного слоя, мм		Пропитка ПС маслом
			в АС	в подложке	АС	подложки	
Органостеклопластик	Органоволокно ОКСАЛОН	Стеклоткань Т-10ИТ-14	2	14	0,75	0,25	нет
Органопластик	ОКСАЛОН		7		0,75		»
Углепластик	Углерента ВИСКУМ		13		0,4		»
Углестеклопластик	ВИСКУМ	Т-10ИТ-14	1	19	0,4	0,25	»
Углестеклопластик	ВИСКУМ	94-30-90	2	153	0,4	0,03	»
Углеорганопластик	ВИСКУМ	ОКСАЛОН	2	9	0,4	0,5	»
Углеорганопластик	ВИСКУМ	ОКСАЛОН	2	9	0,4	0,5	да
Углепластик	Углерента ЭЛУР		33		0,15		нет
Углепластик	Углерента ЛУ-П/02		34		0,15		»
Углестеклопластик	ЛУ-П/02	Т-10ИТ-14	2	19	0,15	0,25	»
Углестеклопластик	ЛУ-П/02	Т-10ИТ-14	2	19	0,15	0,25	да
Углестеклопластик	ЛУ-П/02	Т-10ИТ-14	2	19	0,15	0,25	нет
Углестеклопластик	ЛУ-П/02	Т-10ИТ-14	2	19	0,15	0,25	да
Углеорганопластик	ЛУ-П/02	ОКСАЛОН	2	10	0,15	0,5	нет
Углеорганопластик	ЛУ-П/02	ОКСАЛОН	2	10	0,15	0,5	да
Латунь ЛАЖМп 66-6-3-2							ГОИ-54п
нет							

Исследуемые образцы имели антифрикционный слой (АС), волокна наполнителя которого при изготовлении укладывались в каждом последующем слое под углом 90° к предыдущему, за исключением тех ПС 10-1 и 10-2, у которых послойная намотка армирующих волокон АС осуществлялась под углом 45° . В качестве связующего использовалась эпоксидфенолформальдегидная смола ФФЭ-70.

Проводились стандартные испытания образцов по схеме «вал-втулка» на одностороннее и реверсивное трение на машинах трения 2070 СМТ-1 и УМТ-1 при ступенчатом нагружении – на фрикционную теплостойкость. Сравнительные ресурсные испытания модельных образцов проводились на специально разработанной машине трения. Наилучшее сочетание эксплуатационных характеристик показали органопластиковые ПС, пропитанные маслом, что определило изготовление из них комплекта деталей (рис. 11) для ИТМ (изделие 2А19). Замена латунных ПС на полимерные подлежали узлы трения механизмов наведения, уравнивающего механизма и гидротормозных устройств, цапфенного соединения верхнего станка с нижним, ходовой части.



а)



б)

Рис. 11. Комплекты деталей к изделию 2А19: а – штатный; б – из ПКМ

Полигонные испытания носили сравнительный характер и поэтому проводились одновременно на двух изделиях 2А19: № 5036 – со штатными узлами трения, № 5085 – с усовершенствованными узлами трения (с деталями из ПКМ). Все полимерные узлы трения обеспечили безотказность в объеме назначенного ресурса. На рис. 12 приведен по окончании испытаний внешний вид ПС (втулка 18-131) цапфенного узла, который рассматривался в качестве примера в рамках предлагаемого подхода.



Рис. 12. Втулка 18-131 изделия 2А19: *а* – латунная; *б* – из ПКМ

Выводы

1. Предложенный подход к описанию поведения ПКМ с момента зарождения микродефектов до образования недопустимых технологических или эксплуатационных макродефектов, основанный на моделировании температурного и НДС ПС из ПКМ путем гомогенизации гетерогенных структур в виде элементарных репрезентативных ячеек эквивалентными однородными материалами, несущими адекватную информацию о физико-механических свойствах, позволяет избирательно управлять эксплуатационными свойствами узлов трения импульсного нагружения и производить эффективную замену латунных и бронзовых ПС.

2. Полученные с помощью компьютерных и физических моделей теплофизические, деформационные, прочностные и триботехнические характеристики исследуемых составов и структур ПКМ дают оптимистичные прогнозы о перспективах их применения в узлах трения ИТМ.

3. Предлагаемый технологический процесс изготовления ПС из ПКМ гарантированно обеспечивает требуемый запас прочности и наработку до отказа даже при существовании производственных микродефектов.

4. Описание механизмов фрикционного разогрева и НДС ПКМ с учетом микродефектов как в элементарной репрезентативной ячейке, так и в конструкции эксплуатируемого ПС является направлением дальнейших исследований.

Список литературы

1. **Хватов Г. А.** Исследование процесса функционирования полимерного уплотнения импульсной тепловой машины / Г. А. Хватов, В. Я. Савицкий, А. Ю. Муйземнек // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 2 (30). – С. 113–126.

2. **Кортен, Х. Т.** Разрушение армированных пластиков : пер. с англ. / Х. Т. Кортен ; под ред. Ю. М. Тарнопольского. – М. : Химия, 1967. – 167 с.
3. **Чернин, И. З.** Эпоксидные полимеры и композиции / И. З. Чернин, Ф. М. Сметков, Ю. В. Жердев. – М. : Химия, 1982. – 232 с.
4. **Fried, N.** 20th Annual Technical Conference Reinforced Plastics Division SPJ / N. Fried. – Chicago, 1965, Sect. 1-C.
5. **Hand, N.** 20th Annual Technical Conference Reinforced Plastics Division SPJ / N. Hand. – Chicago, 1965, Sect. 1-C.
6. **Яновский, Ю. Г.** Особенности физико-механических свойств композиционных материалов на основе полимеров и углеродных волокон (обзор) / Ю. Г. Яновский, А. Г. Сирота, В. В. Богданов, П. А. Филипенков // Механика композиционных материалов и конструкций. – 1997. – Т. 3, № 2. – С. 101–117.
7. **Семенова, Г. П.** Влияние пористости на прочность стеклотекстолита / Г. П. Семенова, В. В. Павлов // Механика полимеров. – 1970. – № 4. – С. 585–591.
8. АС 183794 СССР. МКЛ В29Г 7/00. Устройство для пропитки наполнителя полимерным связующим / Зиновьев Р. С., Медведева О. А., Крымский И. М. – Заявка № 3038018/23-05 ; опубл. 29.03.82.
9. **Томашевский, В. Т.** Теория и методы обеспечения бездефектной макроструктуры армированных полимеров при переработке в конструкции специальной техники / В. Т. Томашевский, В. И. Смыслов, В. Н. Шалыгин, В. С. Яковлев. – М. : ЦНИИинформации, 1984. – 316 с.
10. **Цыплаков, О. Г.** Научные основы технологии композиционно-волоконистых материалов / О. Г. Цыплаков. – Пермь : Книжное изд-во, 1974. – Ч. 1. – 316 с.

References

1. Khvatov G. A., Savitskiy V. Ya., Muzyemnek A. Yu. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2014, no. 2 (30), pp. 113–126.
2. Korten Kh. T. *Razrusheniye armirovannykh plastikov: per. s angl.* [Disruption of reinforced plastics: translation from English]. Moscow: Khimiya, 1967, 167 p.
3. Chernin I. Z., Smekhov F. M., Zherdev Yu. V. *Epoksidnye polimery i kompozitsii* [Epoxy polymers and compositions]. Moscow: Khimiya, 1982, 232 p.
4. Fried N. *20th Annual Technical Conference Reinforced Plastics Division SPJ*. Chicago, 1965, Sect. 1-C.
5. Hand N. *20th Annual Technical Conference Reinforced Plastics Division SPJ*. Chicago, 1965, Sect. 1-C.
6. Yanovskiy Yu. G., Sirota A. G., Bogdanov V. V., Filipenkov P. A. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsey* [Mechanics of composite materials and structures]. 1997, vol. 3, no. 2, pp. 101–117.
7. Semenova G. P., Pavlov V. V. *Mekhanika polimerov* [Mechanics of polymers]. 1970, no. 4, pp. 585–591.
8. AS 183794 SSSR. MKL B29G 7/00. Device for filler impregnation with polymer binder]. Zinov'ev R. S., Medvedeva O. A., Krymskiy I. M. Application No. 3038018/23-05; publ. 29 March 1982.
9. Tomashevskiy V. T., Smyslov V. I., Shalygin V. N., Yakovlev V. S. *Teoriya i metody obespecheniya bezdefektnoy makrostrukтуры armirovannykh polimerov pri pererabotke v konstruktsey spetsial'noy tekhniki* [Theory and methods of defect-free macrostructure assurance in reinforced polymers at reprocessing into structures of special hardware]. Moscow: TsNIIinformatsii, 1984, 316 p.
10. Tsyplakov O. G. *Nauchnye osnovy tekhnologii kompozitsionno-voloknistykh materialov* [Scientific bases of composite-fibrous materials technology]. Perm: Knizhnoe izd-vo, 1974, part 1, 316 p.

Богомолов Алексей Иванович

доктор технических наук, профессор,
кафедра № 1, Пензенский
артиллерийский инженерный институт
(Россия, г. Пенза-5)

E-mail: W.savis@gmail.com

Bogomolov Aleksey Ivanovich

Doctor of engineering science, professor,
sub-department №1, Penza Artillery
Engineering Institute (Penza-5, Russia)

Голощанов Владлен Михайлович

кандидат технических наук, доцент,
научный консультант Центра учебно-
научной инновационной деятельности,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, проезд Байдукова, 1а)

E-mail: W.savis@gmail.com

Goloshchapov Vladlen Mikhaylovich

Candidate of engineering sciences, associate
professor, scientific adviser of the Center
of scientific and educational innovative
activity, Penza State Technological
University (1a Baydukova lane,
Penza, Russia)

Савицкий Владимир Яковлевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра № 11, Пензенский
артиллерийский инженерный институт
(Россия, г. Пенза-5)

E-mail: W.savis@gmail.com

Savitskiy Vladimir Yakovlevich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department № 11, Penza Artillery
Engineering Institute (Penza-5, Russia)

Муйземнек Александр Юревич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой теоретической
и прикладной механики и графики,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: muyzemnek@yandex.ru

Muyzemnek Alexander Yuryevich

Doctor of engineering science, professor,
head of sub-department of theoretical
and applied mechanics and graphics,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Зиновьев Радий Сергеевич

кандидат технических наук, доцент,
технический директор Группы научно-
промышленных компаний «Полидор»,
(Россия, г. Челябинск, ул. Федорова, 1а)

E-mail: zinoviev@polidor.ru

Zinov'ev Radiy Sergeevich

Candidate of engineering sciences, associate
professor, technical director of the Scientific
industrial group of companies "Polidor"
(1a Fyodorova street, Chelyabinsk, Russia)

УДК 621.001.63: 623.41

Исследование влияния микроструктуры полимерных композиционных материалов на эксплуатационные свойства подшипников скольжения импульсных тепловых машин / А. И. Богомолов, В. М. Голощанов, В. Я. Савицкий, А. Ю. Муйземнек, Р. С. Зиновьев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 4 (32). – С. 158–176.

А. С. Вережцака, Е. С. Сотова, А. А. Вережцака

РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ИНСТРУМЕНТА ИЗ СМЕШАННОЙ КЕРАМИКИ С НАНОДИСПЕРСНЫМ МНОГОСЛОЙНЫМ ПОКРЫТИЕМ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЗАКАЛЕННОЙ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ

Аннотация.

Актуальность и цели. В работе исследуется влияние свойств смешанной режущей керамики с нанодисперсными многослойными покрытиями на обрабатываемость закаленной инструментальной стали ХВГ. Специфика обработки резанием лезвийным инструментом из смешанной керамики материалов повышенной твердости является в настоящее время предметом широких исследований, так как подобная обработка позволяет не только повысить качество поверхностного слоя, но и существенно снизить затраты, исключив финишную операцию шлифования.

Материалы и методы. В соответствии с разработанными положениями, была сформулирована методология и архитектура трехкомпонентного нанодисперсного многослойно-композиционного покрытия для керамического инструмента.

Результаты. Рассмотрено влияние скорости резания на износостойкость инструмента из смешанной керамики с различными покрытиями. Рассмотрена также методология выбора оптимальной архитектуры и состава покрытия в приложении к инструменту из смешанной керамики. Построены математические модели, устанавливающие зависимость стойкости инструмента из смешанной керамики с покрытием от скорости резания.

Выводы. В работе показано, что режущий инструмент, оснащенный смешанной режущей керамикой с разработанным нанодисперсным многослойно-композиционным покрытием $\text{Ti-TiN}-(\text{TiCrAl})\text{N}$, обеспечивает повышение стойкости при увеличении производительности обработки, снижении интенсивности изнашивания, уменьшении микрорывкрашиваний и хрупких сколов режущей кромки.

Ключевые слова: смешанная керамика, покрытие, стойкость инструмента, износ по задней поверхности.

A. S. Vereshchaka, E. S. Sotova, A. A. Vereshchaka

OPERABILITY OF A MIXED CERAMICS INSTRUMENT WITH NANODISPERSED MULTILAYER COATING AT HARDENED TOOL STEEL WORKING

Abstract.

Background. The article investigates the influence of properties of the mixed cutting ceramics with nanodispersed coating on workability of hardened tool steel of grade. Specific features of enhanced hardness materials working by edge cutting machining using an edge tool with mixed ceramics at the present time is an object of multiple researches, for example, such working allows both to improve surface quality and to significantly decrease costs, excluding the finishing stage of grinding.

Materials and methods. In accordance with the developed regulations, the authors formulated the methodology and architecture of a three-component nanodispersed multilayered composite coating for a ceramic instrument.

Results. The authors examined the influence of cutting rate on wear resistance of the cutting instrument with mixed ceramics having different surfaces. The researchers also considered the methodology of choosing the optimal architecture and compound of coatings attached to the instrument with mixed ceramics. The authors built mathematical models determining the dependence of durability of the mixed ceramics instrument with coating on cutting rate.

Conclusions. The article shows that the cutting instrument equipped with mixed cutting ceramics with the developed nanodispersed multilayered composite coating – Ti-TiN-(TiCrAl)N – provides improved durability together with increasing working productivity, wearing intensity lowering, decreasing of micropittings and cutting edge cleavages.

Key words: mixed ceramics, coating, instrument's durability, rear surface wear.

Введение

Обработка лезвийным инструментом материалов повышенной твердости после их полной термообработки находит все большее применение в металлообрабатывающих производствах, так как позволяет не только повысить качество поверхностного слоя, но и существенно снизить затраты, исключив финишную операцию шлифования [1–4]. Поэтому специфика обработки резанием и механизмы изнашивания режущего инструмента при обработке материалов повышенной твердости являются в настоящее время предметом широких исследований [1, 3].

Для обработки материалов повышенной твердости наряду с композициями на основе кубического нитрида бора (CBN) все большее применение получают инструменты, изготовленные из режущей керамики, особенно керамики смешанного типа, к которой (в соответствии со стандартами ISO 513) относят оксидную режущую керамику, легированную карбидом титана $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$. Смешанная режущая керамика (СРК), не содержащая дефицитных элементов (W, Co, Ta, Nb и др.), имеет ряд преимуществ по сравнению с вольфрамосодержащими твердыми сплавами [1, 2, 4]. Это обусловлено отсутствием в керамическом материале связи, более высокой твердостью, износостойкостью и термостойкостью, что позволяет вести обработку закаленных сталей на значительно больших скоростях резания по сравнению со скоростями резания инструментом из вольфрамосодержащих твердых сплавов. Поэтому инструменты, оснащенные сменными многогранными пластинами (СМП) из СРК, используют для чистовой и получистовой обработки углеродистых легированных сталей с твердостью HRC 30-60, а также ковких, высокопрочных, отбеленных чугунов [1, 2].

Вместе с тем СРК имеет и существенные недостатки, к которым относят:

- относительно низкую прочность при изгибе;
- весьма высокую чувствительность к объемным и поверхностным дефектам (микропоры, микро- и субмикротрещины, остаточные напряжения растяжения, микросколы и т.д.);
- низкую сопротивляемость разрушению при термоударах (термошок) из-за низкой теплопроводности и относительно высокого коэффициента термического расширения [1].

Эффективная эксплуатация инструмента, оснащенного СМП из СРК, возможна только при оптимальных параметрах технологии заточки и доводки, так как формирование опасных поверхностных дефектов в процессе за-

точки СРК может служить причиной резкого снижения прочности керамических СМП.

В этой связи возникает острая необходимость разработки методов дополнительной модификации поверхностных свойств инструмента из СРК, с целью повышения этих свойств и снижения (залечивания) опасных поверхностных дефектов. В работе в качестве метода модифицирующей обработки, направленной на залечивающее воздействие на поверхностные дефекты СМП из СРК в виде и микротрещин и микропор, а также на трансформацию неблагоприятных остаточных напряжений растяжения в более сжимающие остаточные напряжения, использовали технологию фильтруемого катодно-вакуумно-дугового осаждения (ФКВДО) нанодисперсных многослойно-композиционных покрытий (НМКП) [2, 4–7]. НМКП, осажденное на инструмент из СРК, позволяет реализовать преимущества режущей керамики как износостойкого и инертного материала [3–6].

Экспериментальные данные

В соответствии с разработанными положениями, представленными в работах [3, 7–9], была сформулирована методология и архитектура трехкомпонентного нанодисперсного многослойно-композиционного покрытия для керамического инструмента (рис. 1).

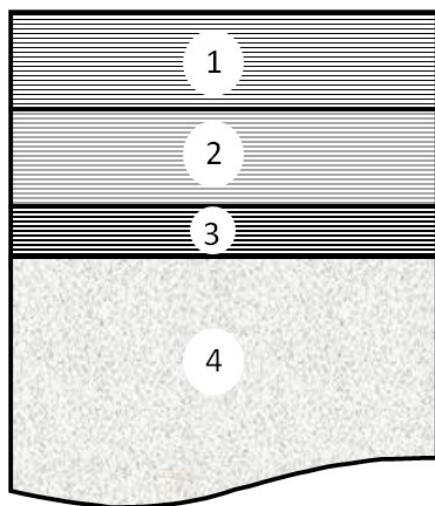


Рис. 1. Архитектура композиционного керамического материала из смешанной керамики и нанодисперсного многослойно-композиционного покрытия:

1 – износостойкий (наружный) слой (TiAlN); 2 – промежуточный слой (TiN);
3 – адгезионный подслой (Ti); 4 – смешанная режущая керамика

НМКП включает три слоя, каждый из которых имеет строго функциональное назначение:

1) наружный износостойкий слой 1 способствует благоприятной трансформации контактных процессов, обеспечивая максимальное снижение контактных напряжений и тепловое воздействие на субстрат из СРК;

2) промежуточный слой 2 обеспечивает прочную адгезионную связь между слоями 1 и 3, кроме того, может выполнять и другие функции, связан-

ные с торможением тепловых потоков из зоны резания в инструмент, а также диффузии элементов из обрабатываемого материала в материал инструмента (СРК);

3) адгезионно-упрочняющий слой 3 обеспечивает формирование прочной адгезии между керамическим субстратом и НМКП, а также выполняющий функцию упрочняюще-залечивающего воздействия на тонкие приповерхностные слои керамического материала.

Формирование НМКП производили при использовании технологии фильтруемого катодно-вакуумно-дугового осаждения на установке ВИТ-2 [2–4]. Технология ФКВДО была разработана как средство получения НМКП с высокой адгезионной прочностью по отношению к субстрату, с повышенной плотностью и нанодисперсной структурой, которая способствует повышению режущих свойств инструмента из СРК. После предварительной химико-механической обработки (ультразвуковая очистка, промывка, сушка) керамические СМП размещали в камере установки ВИТ-2, в которой СМП подвергали дополнительной ионной очистке и обработке с целью залечивания поверхностных дефектов, формируемых при изготовлении и формировали НМКП [10–12]. В процессе осаждения НМКП СМП совершали планетарное перемещение в камере установки, что обеспечивало получение покрытий равномерной толщины. Формирование НМКП (на примере системы Ti-TiN-TiCrAlN) осуществляли при напряжении смещения на субстрате до 205–210 В, давлении азота $2,6 \cdot 10^{-1}$ Па, плотность ионного тока составляла 0,5 А/мм², ток дуги 75–90 А (Ti) и 100–120 А (Al).

Исследования работоспособности инструмента, оснащенного СМП из СРК с НМКП, проводили при продольном точении закаленной стали ХВГ (HRC 45) на токарном станке с бесступенчатым регулированием частот вращения шпинделя.

Объектом исследования служили СМП из СРК ВОК-200 (60 % Al₂O₃ – 40 % TiC) квадратной формы SNUN (ISO 513) с радиусом $r = 0,8$ мм, без покрытия и с покрытиями различного состава. Резцы имели следующую геометрию режущей части: $\gamma_f = -8^\circ$; $\alpha = 8^\circ$; $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$; $\lambda = 0$. В работе в качестве критерия отказа инструмента был принят износ по задней поверхности VB, равный 0,25 мм (ограничивает зону «нормального» изнашивания).

Для получения необходимой информации о составляющих сил резания P_z и P_y использовали универсальный тензометрический динамометр УДМ – 600 и компьютерную программу для полной обработки данных экспериментов.

Результаты и обсуждение экспериментальных данных

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 2, 3.

Установлено, что интенсивность изнашивания инструмента, оснащенного СМП из ВОК-200 с НМКП, существенно ниже, чем для контрольного инструмента с СМП из ВОК-200, при этом развитие фаски износа задней поверхности носит равномерный характер без микровыкрашиваний и сколов, столь характерных для стандартного инструмента из керамики.

Время резания керамическим режущим инструментом до его замены (стойкость) и скорость резания связаны следующей зависимостью [10]:

$$T = \frac{A}{v^m}, \quad (1)$$

где m – относительный показатель скорости; A – постоянный коэффициент.

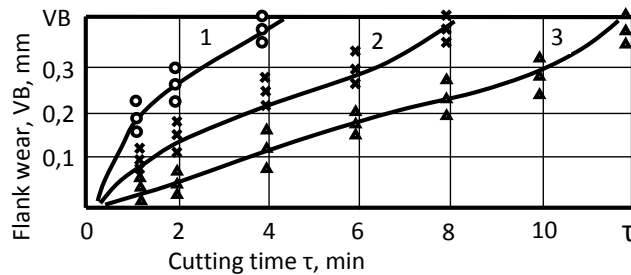


Рис. 2. Зависимость износа VB от времени резания при сухой обработке стали ХВГ HRC 45 с $t = 1$ мм; $S = 0,15$ мм/об; $v = 300$ м/мин:
1 – ВОК-200; 2 – ВОК-200-Ti-TiN (стандарт. технол.);
3 – ВОК-200 (Ti-TiN-TiCrAlN) – технология ФКВДО

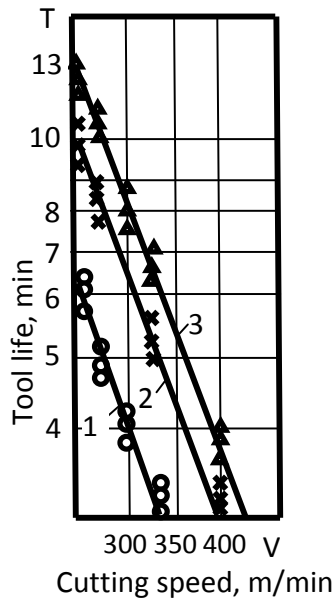


Рис. 3. Влияние скорости резания на стойкость инструмента, оснащенного СМП из ВОК-200 с $t = 1,0$ мм; $S = 0,15$ мм/об: 1 – ВОК-200; 2 – ВОК-200-Ti-TiN (стандарт. технол.); 3 – ВОК-200 (Ti-TiN-TiCrAlN) – технология ФКВДО

Для определения иерархии влияния параметров на стойкость инструмента обычно используют экспериментальные зависимости. Зависимость вида (1) строят на основе кривых «износ-время» (см. рис. 2). Для этого устанавливают критерии затупления инструмента, например критическое (допустимое) значение фаски износа задней поверхности (VB) при заданных условиях резания. Для построения модели резания обработку опытных данных осуществляли на СМП по разработанной в МГТУ «СТАНКИН» программе.

В результате проведенных экспериментов, а также проверки адекватности полученной модели и оценки значимости коэффициентов регрессии по-

лучено выражение зависимости стойкости инструмента от режимов резания при точении стали ХВГ HRC 45 для:

$$\text{ВОК-200; } T = \frac{23,64}{v^{0,22}}, \text{ мин;} \quad (2)$$

$$\text{ВОК-200 (Ti-TiN) (традиционная arc-PVD); } T = \frac{12,73}{v^{0,10}}, \text{ мин;} \quad (3)$$

$$\text{ВОК-200 (Ti-TiN-TiCrAlN) (технология ФКВДО); } T = \frac{36,47}{v^{1,03}}, \text{ мин.} \quad (4)$$

Наилучший результат по стойкости продемонстрировали СМП из ВОК-200 с разработанным покрытием Ti-TiN-(TiCrAl)N (см. рис. 3).

Как видно из представленных графиков, с увеличением скорости резания стойкость всех исследуемых керамических инструментов снижается. При этом СМП из ВОК-200 с разработанным покрытием Ti-TiN-(TiCrAl)N при равной скорости обеспечивают большую стойкость, а при равной стойкости допускают использование более высокой скорости резания (20–30 %) по сравнению с контрольным инструментом из ВОК-200 без покрытия.

Заключение

Проведенные исследования позволили установить возможность повышения режущих свойств инструмента, оснащенного сменными многогранными пластинами из режущей керамики, путем применения разработанных нанодисперсных многослойно-композиционных покрытий.

Режущий инструмент, оснащенный СМП из ВОК-200 с разработанным нанодисперсным многослойно-композиционным покрытием Ti-TiN-(TiCrAl)N (технология ФКВДО), обеспечивает повышение стойкости инструмента при увеличении производительности обработки, снижает интенсивности его изнашивания без микровыкрашиваний и хрупких сколов режущей кромки.

Список литературы

1. **Верещака, А. С.** Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями / А. С. Верещака. – М. : Машиностроение, 1993. – 336 с.
2. **Vereschaka, A. S.** Functional coatings for an edge cutting tools / A. S. Vereschaka, A. A. Vereschaka // Technology of hardening and coatings. – 2010. – № 6. – P. 28.
3. **Vereschaka, A. S.** Ecologically friendly dry machining by cutting tool from layered composition ceramic with nano-scale multilayered coating / A. S. Vereschaka, A. A. Vereschaka, A. K. Kirillov // Key Eng. Materials. – 2012. – Vol. 496. – P. 67.
4. **Grigoriev, S. N.** Cutting tools made of layered composite ceramics with nano-scale multilayered coatings / S. N. Grigoriev, A. A. Vereschaka, A. S. Vereschaka, A. A. Kutin // Procedia CIRP. – 2012. – № 1. – P. 318–323.
5. **Metel, A. S.** Glow discharge with electrostatic confinement of electrons in a chamber bombardment by fast electrons / A. S. Metel, C. N. Grigoriev, Yu. A. Melnik et al. // Plasma physics reports. – 2011. – Vol. 37, № 7. – P. 628.
6. **Vereshchaka, A. S.** Development of the method of obtaining nanostructured functional coatings / A. S. Vereshchaka, B. Karpuschewski, L. Dubner // Proceedings of the Intern. Scient. Conf. “Production. Technology”. – 2008. – Vol. 1. – P. 62.

7. **Sablev, L. P.** Vacuum-arc evaporator of metals with an extended planar cathode / L. P. Sablev, A. A. Andreev, V. V. Kunchenko, S. N. Grigoriev // *Proceedings of Materials Science Forum.* – 1998. – P. 287–288.
8. **Grigoriev, S. N.** Determining the effective fractal dimension of nanodimensional coatings with the aid of magnetic field / S. N. Grigoriev, A. M. Mandel, V. B. Oshurko, G. I. Solomakho // *Technical Physics Letters.* – 2011. – Vol. 37, № 12. – P. 1176–1178.
9. **Grigoriev, S. N.** Experimental and numerical study of the chemical composition of WSex thin films obtained by pulsed laser deposition in vacuum and in a buffer gas atmosphere / S. N. Grigoriev, V. Y. Fominski, A. G. Gnedovets, R. I. Romanov // *Applied Surface Science.* – 2012. – Vol. 258, № 18. – P. 7000–7007.
10. **Grogoriev, S. N.** Distribution of the density of material in the pressing channel in continuous forming of nanocrystalline composite powders / S. N. Grogoriev, A. N. Krasnovskii // *Metal Science and Heat Treatment.* – 2012. – Vol. 54, № 3–4. – P. 135–138.
11. **Grigoriev, S.** Broad fast neutral molecule beam sources for industrial-scale beam-assisted deposition / S. Grigoriev, Y. Melnik, A. Metel // *Surface & Coatings Technology.* – 2002. – Vol. 156, № 1–3. – P. 44–49.
12. Plasma- and beam-assisted deposition methods. Nanostructured Thin Films and Nanodispersion Strengthened Coatings / S. Grigoriev, A. Metel, A. A. Voevodin // *Nanostructured Thin Films and Nanodispersion Strengthened Coatings.* – 2004. – Vol. 155. – P. 147–154.

References

1. Vereshchaka A. S. *Rabotosposobnost' rezhushchego instrumenta s iznosostoykimi pokrytiyami* [Operating ability of a cutting tool with wear-resistant coating]. Moscow: Mashinostroenie, 1993, 336 p.
2. Vereshchaka A. S., Vereschaka A. A. *Technology of hardening and coatings.* 2010, no. 6, p. 28.
3. Vereshchaka A. S., Vereschaka A. A., Kirillov A. K. *Key Eng. Materials.* 2012, vol. 496, p. 67.
4. Grigoriev S. N., Vereshchaka A. A., Vereschaka A. S., Kutin A. A. *Procedia CIRP.* 2012, no. 1, pp. 318–323.
5. Metel A. S., Grigoriev C. N., Melnik Yu. A. et al. *Plasma physics reports.* 2011, vol. 37, no. 7, p. 628.
6. Vereshchaka A. S., Karpuschewski B., Dubner L. *Proceedings of the Intern. Scient. Conf. "Production. Technology".* 2008, vol. 1, p. 62.
7. Sablev L. P., Andreev A. A., Kunchenko V. V., Grigoriev S. N. *Proceedings of Materials Science Forum.* 1998, pp. 287–288.
8. Grigoriev S. N., Mandel A. M., Oshurko V. B., Solomakho G. I. *Technical Physics Letters.* 2011, vol. 37, no. 12, pp. 1176–1178.
9. Grigoriev S. N., Fominski V. Y., Gnedovets A. G., Romanov R. I. *Applied Surface Science.* 2012, vol. 258, no. 18, pp. 7000–7007.
10. Grogoriev S. N., Krasnovskii A. N. *Metal Science and Heat Treatment.* 2012, vol. 54, no. 3–4, pp. 135–138.
11. Grigoriev S., Melnik Y., Metel A. *Surface & Coatings Technology.* 2002, vol. 156, no. 1–3, pp. 44–49.
12. Grigoriev S., Metel A., Voevodin A. A. *Nanostructured Thin Films and Nanodispersion Strengthened Coatings.* 2004, vol. 155, pp. 147–154.

Верещака Анатолий Степанович

доктор технических наук, профессор,
Институт конструкторско-
технологической информатики
Российской академии наук (Россия,
г. Москва, пер. Вадковский, 18, корп. 1А)

E-mail: dr_averes@rambler.ru

Vereshchaka Anatoliy Stepanovich

Doctor of engineering sciences, professor,
Institute of engineering and design
informatics of the Russian Academy
of Sciences (building 1a, 18 Vadkovsky
lane, Moscow, Russia)

Сотова Екатерина Сергеевна

кандидат технических наук, старший
преподаватель, кафедра технологии
машиностроения, Московский
государственный технологический
университет «СТАНКИН» (Россия,
г. Москва, Вадковский переулок, 1)

E-mail: eksotova@yandex.ru

Sotova Ekaterina Sergeevna

Candidate of engineering sciences, senior
lecturer, sub-department of mechanical
engineering technologies, Moscow State
Technological University "STANKIN"
(1 Vadkovsky lane, Moscow, Russia)

Верещака Алексей Анатольевич

кандидат технических наук, научный
сотрудник, Институт конструкторско-
технологической информатики
Российской академии наук (Россия,
г. Москва, пер. Вадковский, 18, корп. 1А)

E-mail: ecotech@rambler.ru

Vereshchaka Aleksey Anatol'evich

Candidate of engineering sciences,
researcher, Institute of engineering
and design informatics of the Russian
Academy of Sciences (building 1a,
18 Vadkovsky lane, Moscow, Russia)

УДК 67.02

Верещака, А. С.

Работоспособность инструмента из смешанной керамики с нанодисперсным многослойным покрытием при обработке закаленной инструментальной стали / А. С. Верещака, Е. С. Сотова, А. А. Верещака // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 4 (32). – С. 177–184.

М. В. Терехов, В. В. Колякин, Ю. А. Леонов

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования являются гидравлические домкраты с пружинным возвратом. Предметом исследования являются эффективные алгоритмы расчета и построения геометрических моделей составляющих гидравлических домкратов. Цель работы – разработка концепции автоматизации проектирования гидравлических домкратов и ее реализация в виде автоматизированной системы.

Материалы и методы. Алгоритмы расчета деталей, составляющих гидравлический домкрат, основываются на стандартах и рекомендациях по расчету соответствующих гидравлических элементов.

Результаты. Разработаны эффективные алгоритмы расчета параметров деталей, параметрические геометрические модели составляющих гидравлического домкрата с пружинным возвратом, а также сборочная модель домкрата. Разработана узкоспециализированная система автоматизированного проектирования гидравлических домкратов с пружинным возвратом, позволяющая производить расчет параметров домкрата, а также построение его геометрической модели.

Выводы. Разработанная узкоспециализированная система автоматизированного проектирования позволяет ускорить процесс проектирования гидравлических домкратов и сократить время, затрачиваемое на оформление конструкторской документации.

Ключевые слова: проектирование, автоматизация проектирования, САПР, гидравлический домкрат.

M. V. Terekhov, V. V. Kolyakin, Yu. A. Leonov

AUTOMATION OF HYDRAULIC SYSTEM DESIGN USING PARAMETRIC MODELING

Abstract.

Background. The research object is hydraulic jacks with spring return. The research subject is the effective algorithms for calculation and building of geometric models, compiling hydraulic jacks. The aim of the work is to develop a conception of hydraulic jack design and realization thereof in the form of an automatic system.

Materials and methods. The calculation algorithms for parts that compile a hydraulic jack are based on the standards and recommendations on calculation of the corresponding hydraulic elements.

Results. The authors developed the effective parameter calculation algorithms for parts, the parametric geometric models of the spring-return hydraulic jack's components, as well as an assembly model of the jack. The researchers developed a dedicated system of automatic design of spring-return hydraulic jacks, allowing to calculate jack's parameters and to build its geometric model.

Conclusions. The developed dedicated system of automatic design allows to quicken the hydraulic jack's design process and to reduce the design documentation processing time.

Key words: design, design automation, computer-aided design, hydraulic jack.

В настоящее время отделы предприятий немислимы без наличия систем, позволяющих контролировать все процессы жизненного цикла проектируемых изделий.

В данных условиях успешность предприятий напрямую зависит от того, в какие сроки будут представлены расчеты будущего изделия, его модели, чертежи, спецификации, т.е. все элементы конструкторской документации, а также качество и точность их выполнения. Для этого используются интегрированные системы автоматизированного проектирования (САПР) [1–3]. В настоящий момент актуальность систем автоматизированного проектирования обусловлена необходимым повышением числа проектных решений, реализуемых развивающимися предприятиями. Однако большинство предприятий, если и используют САПР, то не для автоматизации процессов проектирования изделий, а для более удобного оформления конструкторской документации. К тому же системы автоматизированного проектирования нацелены на какую-либо предметную область – машиностроение, приборостроение и др.

Для автоматизации полностью или частично формализованных задач, реализацию которых можно автоматизировать, не составляет большой сложности создать программное обеспечение для их решения.

Такими задачами являются расчеты деталей машин. Можно выделить расчеты гидроцилиндров, насосных станций, мультипликаторов, редукторов, т.е. большой круг машин и механизмов. Расчет гидравлических домкратов разных типов и конфигураций является формализованной задачей.

Проектирование гидравлических домкратов является трудоемкой задачей, включающей в себя расчет силовых параметров гидравлического домкрата, расчет его геометрических параметров, проверочные расчеты и т.д. Поэтому создание системы автоматизированного проектирования гидравлических домкратов является в настоящий момент актуальной задачей.

На данный момент не существует систем, реализующих все стадии проектирования гидравлических домкратов с пружинным возвратом. Большинство из реализуемых систем позволяют рассчитать только основные геометрические параметры домкрата, а весь процесс проектирования реализуется инженерами-конструкторами.

Разработка системы автоматизированного проектирования состоит в проработке семи видов обеспечения: математического, информационного; лингвистического, программного, технического, организационного, методического.

При разработке системы автоматизированного проектирования гидравлических домкратов математическое обеспечение было условно поделено на трехмерные геометрические модели и методы и алгоритмы расчета проектируемых домкратов.

В ходе работ были созданы трехмерные геометрические модели следующих деталей и сборочных единиц: поршень; букса; гильза; пружина; верхний и нижний фиксаторы пружины; уплотнение и направляющее кольцо поршня; грязесъемник и направляющее кольцо штока; несколько видов опор.

Также были реализованы следующие алгоритмы расчета:

– общий расчет основных геометрических параметров гидравлического домкрата;

– расчет геометрических параметров буксы;

– расчет геометрических параметров поршня;

– подбор подходящих уплотнений;

– подбор пружин и расчет их геометрических параметров;

– расчет геометрических параметров фиксаторов пружины;

– расчет геометрических параметров гильзы, а также, по возможности, подбор подходящей заготовки;

– расчет параметров внешней и внутренней метрической резьбы;

– подбор параметров канавок для выхода внешней и внутренней метрической резьбы;

– инженерный расчет резьбы на срез и смятие витков.

Реализация твердотельных геометрических моделей осуществляется в системе геометрического моделирования Компас-3D. Принцип разработки моделей состоит в постепенном наложении размерных зависимостей и параметров на элементы модели, строящиеся в системе, это могут быть эскизы, геометрические операции и т.д.

Изменение параметров моделей производится по данным, предоставляемым другими модулями, с помощью внутренних функций САПР.

Доступ к внутренним функциям САПР обеспечивается тремя путями:

– через экспортные функции, оформленные в виде dll-модулей;

– через использование COM-объектов;

– с помощью технологии *Automation*, реализованной через *API* САПР [1].

Для реализации САПР гидродомкратов целесообразной является разработка структурно-функциональной схемы работы программы (рис. 1). С помощью данной схемы можно показать взаимодействие модулей разрабатываемого программного обеспечения.

После анализа был составлен список необходимых модулей:

1) управляющий модуль;

2) модуль взаимодействия с пользователем;

3) модуль генерации отчетов;

4) расчетный модуль, который составляют:

– модуль расчета основных геометрических параметров;

– модуль расчета пружин;

– модуль подбора опор;

– модуль расчета держателей пружины;

– модуль подбора уплотнений;

– модуль расчета буксы;

– модуль расчета конструктивных элементов;

- модуль проверочного расчета.
- 5) модуль работы с CAD-системой:
 - модуль работы с API;
 - модуль обновления моделей;
 - модуль обновления чертежей.

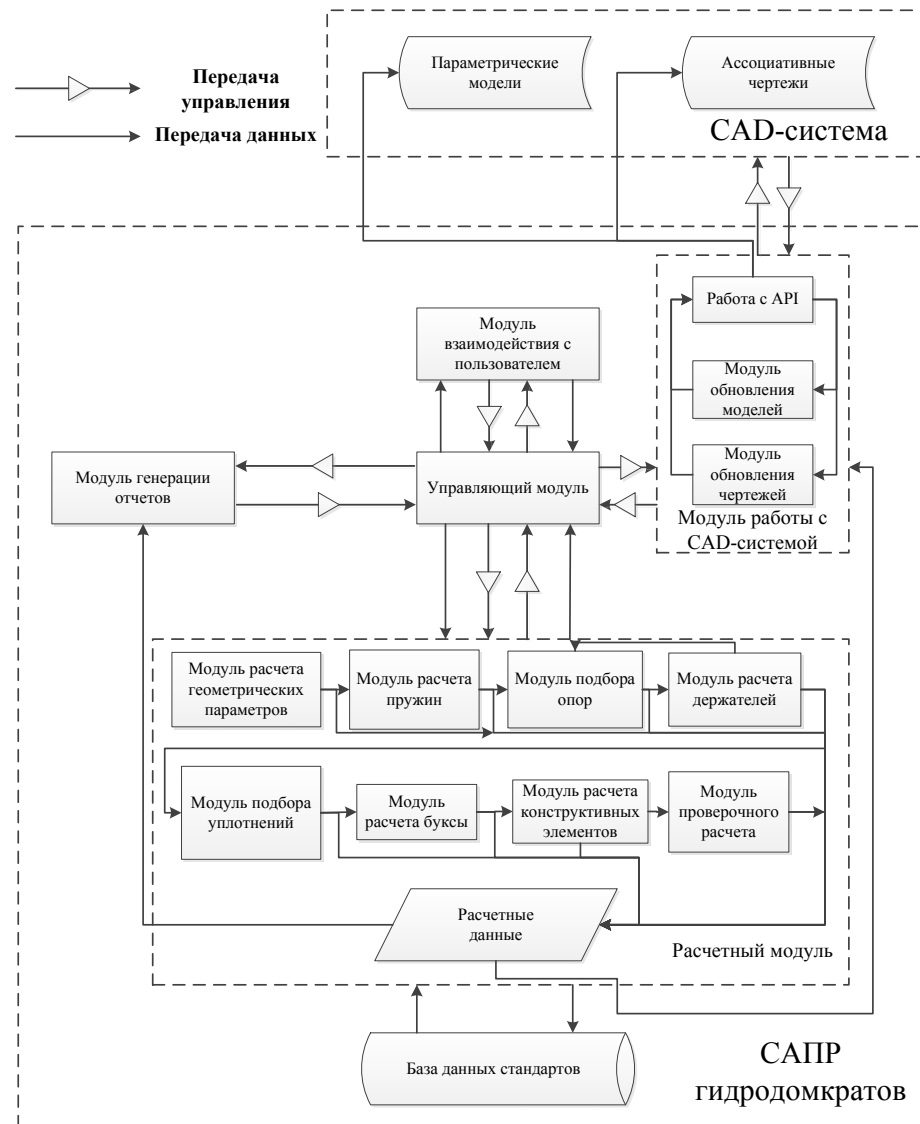


Рис. 1. Структурно-функциональная схема САПР гидравлических домкратов

Управляющий модуль разработанной САПР является главным модулем системы. Он контролирует работу всех модулей, входящих в ее состав. Модуль взаимодействия с пользователем решает задачи ведения диалога с пользователем для ввода исходных данных. Ввод исходных данных может проводиться несколькими способами. При обычном вводе параметров управляющий модуль передает их расчетному модулю, проверяя работоспособность

модулей. При вводе заявки модуль взаимодействия с пользователем контактирует с управляющим модулем не напрямую, а через сервисный модуль, производящий разбор поступившей заявки. После ввода данных любым способом управляющий модуль подает управляющее воздействие на расчетный модуль. С управляющим воздействием расчетному модулю передаются также исходные данные, а также данные, являющиеся сервисными. В расчетном модуле его составляющие модули передают исходную и выходную информацию между собой. При необходимости в данных, хранящихся в базе данных (БД), управляющему модулю передается запрос на работу с системой управления базой данных (СУБД). Управляющий модуль передает управление модулю работы с СУБД, которому от расчетного модуля передается запрос на необходимую информацию. Модуль работы с системой управления базой данных отправляет запрос напрямую СУБД и получает извлеченные из БД данные. Данные передаются запросившему их подмодулю расчетного модуля, управление также переходит к расчетному модулю. По окончании работы расчетного модуля данные заносятся в блок расчетных данных, а управление передается модулю взаимодействия с пользователем через управляющий модуль. При необходимости выдачи отчета управление передается модулю генерации отчетов, который использует данные из блока расчетных данных. По окончании выдачи отчетов происходит передача управления обратно модулю взаимодействия с пользователем. При необходимости перестроения моделей и обновления чертежей управление передается модулю работы с CAD-системой, которая, в свою очередь, через интерфейсы контролирует работу CAD-системы. Через управляющий модуль проходят все управляющие воздействия, тем самым данный модуль всегда производит контроль работы системы автоматизированного проектирования.

Также был проведен анализ данных и файлов, используемых в проекте. Данные были разбиты на следующие группы:

- 1) пользовательские данные, являющиеся входными; будут получены при взаимодействии пользователя с САПР;
- 2) расчетные данные, полученные в результате работы расчетного модуля;
- 3) внешние данные, являющиеся стандартами, хранящимися в файлах и используемые расчетным модулем;
- 4) файлы параметрических моделей и чертежей, которые необходимо обновлять при построении домкрата.

Порядок расчета домкрата, а также кнопки перестроения моделей, обновления чертежей, генерации отчетов также находятся на главном окне (рис. 2).

Это также позволяет пользователю не отвлекаться от алгоритма проектирования на открытие дополнительных окон приложения. Окно вывода графического отчета представляет собой чертеж рассчитанного элемента домкрата с нанесенными на него размерами (рис. 3).

Данное окно обладает наглядностью, особенно для инженера-конструктора, так как размеры представлены не в текстовом формате, а нанесены на чертеж.

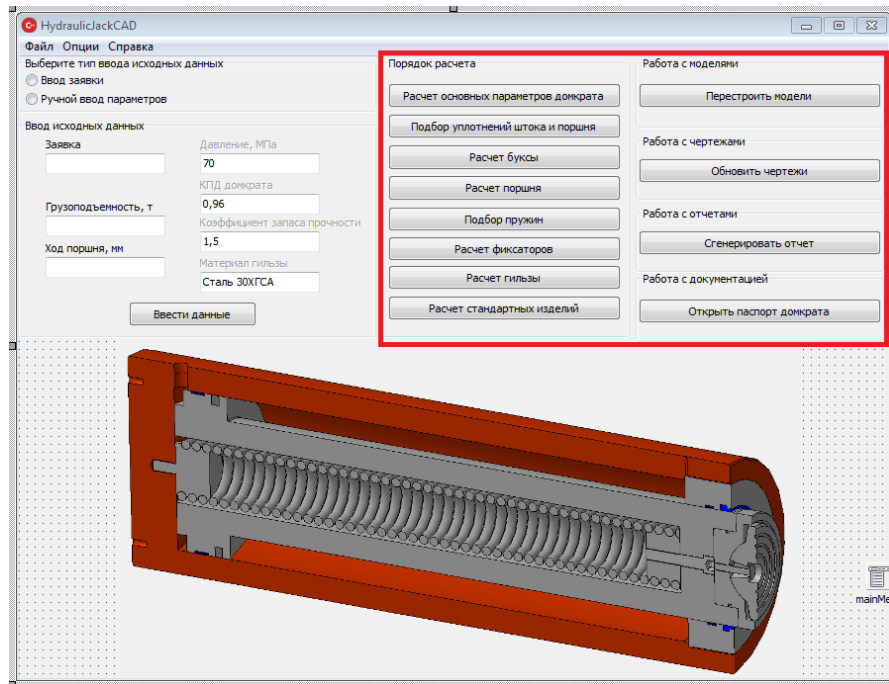


Рис. 2. Порядок работы с программой

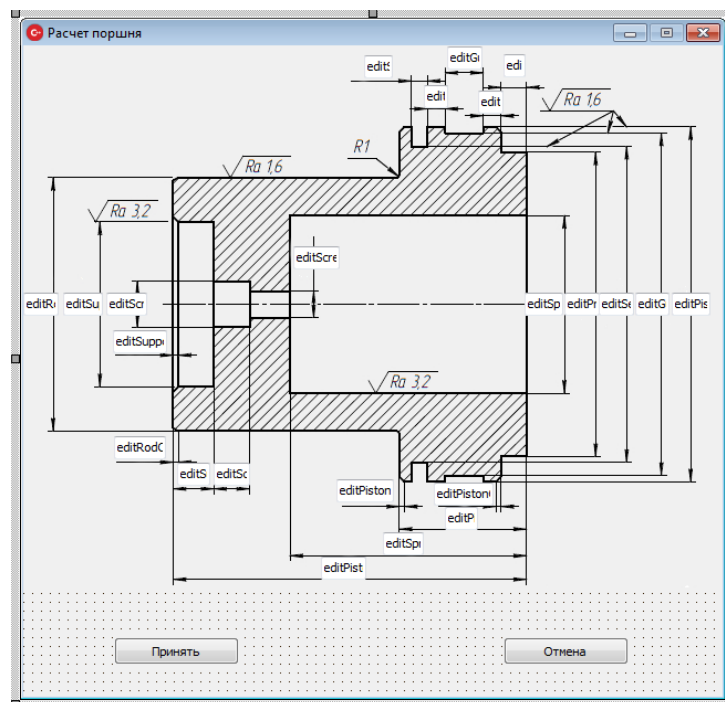


Рис. 3. Окно графического отчета

Список литературы

1. Кидрук, М. И. Компас-3D V10 на 100 % : учеб. пособие / М. И. Кидрук. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – СПб. : Питер, 2009. – 560 с.

2. **Норенков, И. П.** Основы автоматизированного проектирования : учеб. пособие для вузов / И. П. Норенков. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 336 с.
3. **Капустин, Н. М.** Автоматизация производственных процессов в машиностроении / Н. М. Капустин, П. М. Кузнецов, А. Г. Схиртладзе ; под общ. ред. Н. М. Капустина. – М. : Высш. шк., 2004. – 415 с.

References

1. Kidruk M. I. *Kompas-3D V10 na 100 %: ucheb. posobie* [One hundred per cent of KOMPAS-#D V10: tutorial]. Saint Petersburg: Piter, 2009, 560 p.
2. Norenkov I. P. *Osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniya: ucheb. posobie dlya vuzov* [Basic computer-aided design: tutorial for universities]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N. E. Bauman, 2002, 336 p.
3. Kapustin N. M., Kuznetsov P. M., Skhirtladze A. G. *Avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov v mashinostroyenii* [Automation of mechanical engineering production]. Moscow: Vyssh. shk., 2004, 415 p.

Терехов Максим Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра компьютерных технологий
и систем, Брянский государственный
технический университет (Россия,
г. Брянск, бульвар 50-летия Октября, 7)

E-mail: malt86@mail.ru

Terekhov Maksim Vladimirovich

Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of computer
technology and systems, Bryansk State
Technical University (7 50-letiya Oktyabrya
boulevard, Bryansk, Russia)

Колякин Владислав Валерьевич

аспирант, Брянский государственный
технический университет (Россия,
г. Брянск, бульвар 50-летия Октября, 7)

E-mail: Vladislavkol93@mail.ru

Kolyakin Vladislav Valer'evich

Postgraduate student, Bryansk State
Technical University (7 50-letiya
Oktyabrya boulevard, Bryansk, Russia)

Леонов Юрий Алексеевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра компьютерных технологий
и систем, Брянский государственный
технический университет (Россия,
г. Брянск, бульвар 50-летия Октября, 7)

E-mail: yorleon@yandex.ru

Leonov Yuriy Alekseevich

Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of computer
technology and systems, Bryansk State
Technical University (7 50-letiya
Oktyabrya boulevard, Bryansk, Russia)

УДК 658.512.22

Терехов, М. В.

Автоматизация проектирования гидравлических систем с использованием параметрического моделирования / М. В. Терехов, В. В. Колякин, Ю. А. Леонов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 4 (32). – С. 185–191.

ПУТИ СНИЖЕНИЯ ТЕПЛОНАПРЯЖЕННОСТИ РЕЖУЩЕГО КЛИНА ПРИ КОЛЕСОТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ

Аннотация.

Актуальность и цели. Технологический процесс колесотокарной обработки не предусматривает применения смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС), что существенно увеличивает температуру резания и ухудшает стойкость инструмента. Поэтому в работе рассматриваются методы повышения стойкости инструмента путем снижения температуры резания, исключающие применение СОТС. Актуальность данного исследования также подтверждается тенденциями экологически чистого резания «Зеленое резание» без применения СОТС.

Материалы и методы. Исследования проводили при обработке катальной части колесных пар на токарных станках типа «Rafamet» модели UDA-112. Объектом исследования были токарные резцы, оснащаемые сменными режущими пластинами формы LNMХ 301940 и BNМХ (ISO 513), часть из которых составила контрольную группу без покрытия, на другие наносили специально разработанные для этих целей нанодисперсные многослойно-композиционные покрытия (NMCC). Использовали режущие пластины, которые крепили в державки, при этом между опорной и режущей пластиной формировали специальный интерфейс, улучшающий теплоотвод в режущий инструмент. При проведении стойкостных испытаний критерием отказа инструмента служил предельный износ задней поверхности режущей пластины $h_3 = 0,6\text{--}0,8$ мм. Измерение фаски износа задней поверхности проводили на инструментальном микроскопе БМИ-1Ц. Оценку шероховатости обработанной поверхности производили при использовании профилографа-профилометра модели Hand-held Roughness Tester TR 200 (Япония).

Результаты. Установлена высокая эффективность твердосплавных режущих пластин формы LNMХ 301940 из твердого сплава AT15S с теплопроводным интерфейсом и разработанными NMCC на основе трехслойной системы Ti-TiN-(Ti,Al)N по сравнению с стандартными аналогами при тяжелой восстановительной обточке катальной поверхности колесных пар. В частности, отмечено не только более высокое среднее значение стойкости (88,1 мин) и коэффициента стойкости КСТ (103,12), но и снижение коэффициента вариации стойкости ($v = 3,25$). Отмеченное свидетельствует о существенном повышении работоспособности и надежности инструмента, оснащенного тангенциальными пластинами LNMХ 301940 из сплава AT15S с повышенной теплопроводностью твердого сплава и покрытия на основе системы Ti-TiN-TiAlN, разработанными для обточки поверхности катания колесных пар.

Выводы. Рассмотрено тепловое состояние режущего инструмента в процессе колесотокарной обработки, которое определяет его работоспособность. Предложены способы улучшения теплоотвода от режущей пластины в процессе обработки. Их применение позволяет снизить теплонапряженность режущего клина и, соответственно, увеличить стойкость инструмента при колесотокарной обработке.

Ключевые слова: колесотокарная обработка, разрушение режущего инструмента, теплоотвод, износостойкие покрытия.

M. Yu. Kulikov, A. Yu. Popov, A. V. Florov, San Maung

METHODS OF WEDGE'S CALORIFIC INTENSITY REDUCTION AT CAR-WHEEL PROCESSING

Abstract.

Background. The technology of car-wheel processing doesn't stipulate application of lubricant-cooling media (LCM), which significantly increases the temperature of cutting and deteriorates instrument's durability. Therefore, the article considers the methods instrument's durability improvement by decreasing the cutting temperature, without LCM application. Relevance of the research is also proved by the trend of ecological cutting "Green cutting" without LCM application.

Materials and methods. The research was performed at processing of wheel pairs on Rafamet lathes of UDA-112 series. The research object was lathe tools equipped with removable blades of LNMX 301940 and BNMX (ISO 513) forms, with some of them entering the control group without coating and the other being covered with specially designed nanodispersed multilayered composite coatings (NMCC). The authors used cutting blades fixed on holders; between a support blade and a cutting blade there was formed a special interface, improving heat extraction into the cutting tool. During durability tests the criterion of instrument failure was the limiting wear of the rear surface of the cutting blade $h_3 = 0,6-0,8$ mm. The rear surface's wear flat was measured by the toolmaker's microscope BMI-1Ts. Roughness of the processed surface was estimated by the Hand-held Roughness Tester TR 200 (Japan).

Results. The authors established high efficiency of hardmetal cutting blades of LNMX 301940 form made of AT15S alloy with the heat-extracting interface and the developed NMCC on the basis of Ti-TiN-(Ti,Al)N in comparison with standard analogs in conditions of hard reducing turning of wheel pairs. In particular, the researchers pointed out not just a high average durability value (88,1 min) and a durability coefficient (103,12), but also a decrease of the durability variation coefficient ($v = 3,25$). The emphasized information indicates a significant increase in operating ability and reliability of the instrument equipped with tangential LNMX 301940 blades of AT15S alloy with improved heat conductivity of the hard metal and coating on the basis of the Ti-TiN-TiAlN system, developed for wheel pairs' surface turning.

Conclusions. The researchers considered the cutting instrument's heat condition in the process of car-wheel processing that determines its operating ability. The authors suggested the ways to improve heat extraction from the cutting blade during processing. Application thereof allows to decrease calorific intensity of a cutting blade and, accordingly, to increase instrument's durability at car-wheel processing.

Key words: car-wheel processing, cutting instrument's disruption, heat extraction, wear resistant coatings.

Повышение температуры резания оказывает негативное влияние на выходные параметры процесса колесотокарной обработки. Одним из основных параметров является износ режущего клина сменных твердосплавных пластин. Поэтому поиск способов повышения стойкости режущих пластин путем снижения температуры резания при колесотокарной обработке является целью нашего исследования.

Исследования проводили при обработке катальной части колесных пар на токарных станках типа «Rafamet» модели UDA-112, $v = 40-80$ м/мин;

$S = 1,1\text{--}1,3$ мм/об, $t = 6\text{--}8$ мм. Объектом исследования были токарные резцы, оснащаемые сменными режущими пластинами формы *LNMX 301940* и *BNMX* (ISO 513), часть из которых составила контрольную группу без покрытия, на другие наносили специально разработанные для этих целей нанодисперсные, многослойно-композиционные покрытия (*NMCC*). Использовали режущие пластины, которые крепили в державки, при этом между опорной и режущей пластиной формировали специальный интерфейс, улучшающий теплоотвод в режущий инструмент. При проведении стойкостных испытаний критерием отказа инструмента служил предельный износ задней поверхности режущей пластины $h_3 = 0,6\text{--}0,8$ мм. Измерение фаски износа задней поверхности проводили на инструментальном микроскопе БМИ-1Ц. Оценку шероховатости обработанной поверхности производили при использовании профилографа-профилометра модели Hand-held Roughness Tester TR 200 (Япония).

Исследование механизма изнашивания режущего инструмента, оснащенного пластинами из твердого сплава при обработке контура колесных пар, показало, что изнашивание сопровождается пластическим деформированием режущего клина твердосплавного инструмента с последующим разрушением (рис. 1). В работе [1] также установлено, что одним из превалирующих видов отказа инструмента при колесотокарной обработке является его пластическое разрушение. При этом пластическая деформация сопровождается просадкой режущей кромки или выдавливанием главной задней поверхности [1].



Рис. 1. Кинетика развития очагов изнашивания контактных площадок режущей пластины из твердого сплава AT15S Ti-TiN при обработке катальной поверхности колесной пары с параметрами $t = 6,0$ мм; $S = 1,2$ мм; $v = 70$ м/мин

Впервые механизм пластического разрушения твердосплавного инструмента для тяжело нагруженных операций резания (резание труднообрабатываемых сплавов на никелевой основе) был рассмотрен Н. В. Талантовым [2], который показал, что изнашивание твердосплавного инструмента сопровождается пластическими деформациями режущего клина инструмента, обусловленными явлением ползучести. Полный отказ инструмента происходит в результате пластического разрушения режущего клина инструмента.

Известно [3], что ползучесть является термоактивированным процессом и определяется тепловыми полями, образующимися в режущем клине в процессе резания. Уровень теплового воздействия на режущий клин инструмента определяет начало механизма высокотемпературной ползучести инструментального материала, что в результате приводит к полному отказу инструмента из-за пластического разрушения режущего клина инструмента. Интенсификацию тепловых потоков, отводящих тепло из зоны обработки, обычно

осуществляют применением смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС). Однако по техническим требованиям использование жидких СОТС при обработке колесных пар не допускается [4]. Следует отметить, что теплопроводность двух-трех карбидных твердых сплавов (WC-TiC-Co, WC-TiC-TaC-Co) чрезвычайно низка, что предопределяет сильное снижение интенсивности теплоотвода в инструмент и концентрацию тепловых напряжений непосредственно в контактных областях твердого сплава.

В этой связи в работе предлагается комбинированный подход к проблеме повышения работоспособности твердосплавного инструмента для обработки колесных пар. Такой подход предусматривает введение в конструкцию инструмента элемента, интенсифицирующего теплоотвод из зоны обработки, и нанесение многослойно-композиционных покрытий с нанодисперсной архитектурой на режущем инструменте. Комбинированное улучшение свойств твердосплавного инструмента позволяет одновременно снизить напряжение, действующее на контактных площадках инструмента, и уровень тепла, формируемого от фрикционных источников на передней и задней поверхностях инструмента, а также заметно интенсифицировать тепловые потоки от рабочих слоев режущего инструмента.

В работе [5] было показано, что применение многослойно-композиционных покрытий снижает термомеханические нагрузки на режущий клин инструмента и значительно повышает его работоспособность, однако сам механизм изнашивания также сопровождается пластическими деформациями. В этой же работе было показано, что нанесение покрытий снижает уровень напряжений, действующих на контактные площадки инструмента, однако уровень теплового нагружения остается достаточно высоким.

Тепловое состояние режущего инструмента при нанесении покрытия улучшается, однако покрытие не предотвращает нагрева локальных объемов режущего инструмента, примыкающего к контактным площадкам, а только замедляет процесс распространения тепла в режущий клин.

В работе рассматриваются условия теплоотвода от границы между опорными поверхностями режущей пластины и державки инструмента. Как известно, площадь контактирования в любых парах трения определяется не номинальной, а фактической площадью контакта, которую составляет суммарная площадь контактирующих вершин микронеровностей пары трения и составляет несколько процентов от площади номинального контакта. В местах, где контакт отсутствует, образуются воздушные области (карманы). Теплопроводность воздуха в 3500 раз ниже, чем у металлов, используемых в сборных резцах. Поэтому граница между опорными поверхностями режущей пластины и инструментальной державки имеет высокое термическое сопротивление, что резко ухудшает условия теплоотвода из инструмента.

Уменьшить термическое сопротивление в узкой области контакта опорных поверхностей предлагается путем применения теплопроводного интерфейса, формируемого специальной теплопроводной пастой (рис. 2), которой тонким слоем покрывают опорные поверхности резцедержателя и твердосплавной режущей пластины.

Для обеспечения нормального отвода тепла весь воздух из зазоров должен быть вытеснен специальным теплопроводящим эластичным составом, имеющим гораздо более высокую теплопроводность. Однако, в любом слу-

чае, тепловые свойства самых лучших теплопроводных паст ниже, чем у металлов, поэтому качество сопрягаемых поверхностей и толщина слоя теплопроводной пасты имеют определяющие значение.

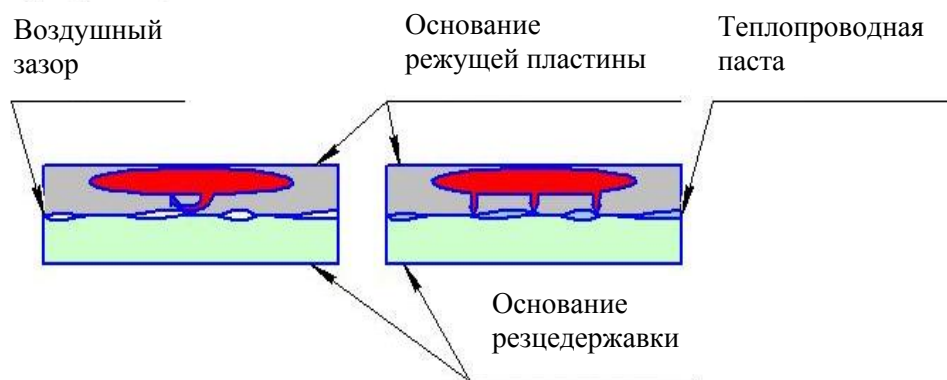


Рис. 2. Пример опорных поверхностей режущей пластины и инструментальной державки

Толщина пасты в месте контакта не должна превышать величины шероховатости на сопрягаемых элементах, наносить пасту необходимо равномерным слоем на обезжиренную поверхность, размазывая ее для гарантированного заполнения всех неровностей поверхности.

Одним из главных преимуществ показанного способа снижения тепловой напряженности в зоне резания путем отвода тепла от режущей пластины в резцедержатель является низкая себестоимость и отсутствие необходимости применения сложной оснастки. В процессе работы инструмента теплопроводный интерфейс не требует частой замены, так как его достаточно сформировать на весь срок службы режущей пластины, а замену производить только при демонтаже и замене изношенной режущей пластины. При этом перед формированием нового слоя теплопроводного интерфейса старую пасту следует удалить с использованием моющего средства, а поверхности обезжирить и полностью просушить. Указанное свидетельствует о большой технологичности использования теплопроводной пасты в производственных условиях.

Проведенные исследования показали, что использование теплопроводной пасты в сборном резце значительно улучшает теплоотвод из зоны резания и уменьшает теплонпряженность режущего клина инструмента. За счет этого значительно увеличивается работоспособность режущего инструмента при колесотокарной обработке.

Другим способом интенсификации отвода тепла от режущего клина является замена пасты на теплопроводные эластичные прокладки. В этом случае на переднюю поверхность режущей пластины наклеиваются теплопроводящие эластичные прокладки из листового армированного материала (например, из материала НОМАКОН КПТД-2) по форме и толщине, соответствующие размерам стружколомающих канавок. Данные прокладки из керамикополимерного теплопроводящего материала обладают большой эластичностью (не менее 50 %) и теплопроводностью (0,8–1,4 Вт/(м·К)), обеспечивают

эффективную теплопередачу по всей опорной поверхности, ликвидируя при этом воздушные зазоры (см. рис. 2). За счет армирования стекловолокном материал выдерживает сжатие до 40 МПа, что гарантирует надежное закрепление режущей пластины. При индексации режущей пластины, когда опорная поверхность пластины превращается в переднюю поверхность, части прокладки, находящиеся в контактной зоне, легко удаляются сходящей стружкой.

Исследования проводили при обточке поверхности катания колесной пары, $v = 50$ м/мин; $S = 1,2$ мм/об; $t = 6,0$ мм (рис. 3). Оценку работоспособности режущих пластин производили по коэффициенту стойкости относительно исходных пластин из AT15S без покрытия, стойкость которых была принята за единицу при испытаниях с указанными режимами обработки при предельном износе по задней поверхности $h_3 = 0,7$ мм. Сравнение производили с твердосплавными пластинами лучших мировых производителей со стандартными покрытиями, и пластин со сформированным интерфейсом, улучшающим теплопроводность твердого сплава.

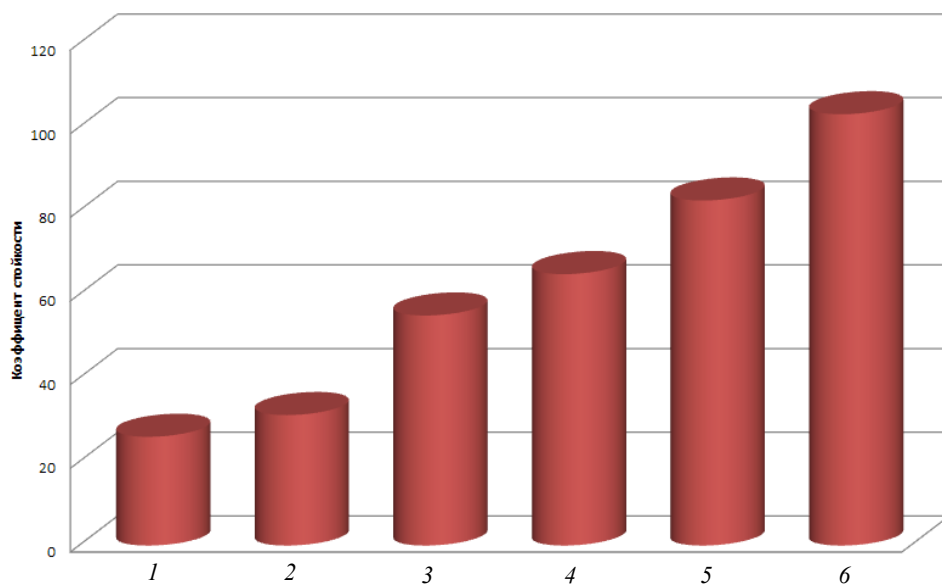


Рис. 3. Результаты сравнительных стойкостных испытаний твердосплавных пластин тангенциальной формы LNMХ 301940 при обточке профиля поверхности катания колесных пар мотор-вагонного подвижного состава с новыми бандажами при черновой обточке колесных пар, $v = 50$ м/мин; $S = 1,2$ мм/об; $t = 6,0$ мм:

1 – пластины без поверхностного износостойкого покрытия (средняя стойкость 3,25·8 колеса на режущую кромку); 2 – пластины с термоинтерфейсом – 3,900·8; 3 – пластины с покрытием TiN (PVD) – 6,875·8; 4 – пластины с покрытием TiN (PVD) + термоинтерфейс – 8,112·8; 5 – пластины с покрытием TiN – 10,312·8; 6 – пластины с покрытием TiN + термоинтерфейс – 12,89·8

Анализ результатов исследований позволяет отметить следующее. Установлена высокая эффективность твердосплавных режущих пластин формы LNMХ 301940 из твердого сплава AT15S с теплопроводным интерфейсом и разработанными *HMCC* на основе трехслойной системы Ti-TiN-(Ti,Al)N

по сравнению с стандартными аналогами при тяжелой восстановительной обточке катальной поверхности колесных пар. В частности, отмечено не только более высокое среднее значение стойкости (88,1 мин) и коэффициента стойкости $K_{ст}$ (103,12), но и снижение коэффициента вариации стойкости ($v = 3,25$). Отмеченное свидетельствует о существенном повышении работоспособности и надежности инструмента, оснащенного тангенциальными пластинами LNMХ 301940 из сплава АТ15S с повышенной теплопроводностью твердого сплава и покрытия на основе системы Ti-TiN-TiAlN, разработанными для обточки поверхности катания колесных пар.

Список литературы

1. **Попов, А. Ю.** Оптимизация элементов технологической системы при восстановлении профиля поверхности катания колесных пар подвижного состава : дис. ... канд. техн. наук / А. Ю. Попов. – М., 1998. – 309 с.
2. **Талантов, Н. В.** Физические основы резки и износа инструмента / Н. В. Талантов. – Волгоград : Изд-во ВТУ, 1994. – С. 3–37.
3. **Лоладзе, Т. Н.** Прочность и износостойкость режущего инструмента / Т. Н. Лоладзе. – М. : Машиностроение, 1982. – 320 с.
4. **Богданов, А. Ф.** Эксплуатация и ремонт колесных пар вагонов / А. Ф. Богданов, В. Г. Чурсии. – М. : Транспорт, 1985. – 270 с.
5. **Верещака, А. С.** Резание материалов : учебник / А. С. Верещака, В. С. Кушнер. – М. : Высш. шк., 2009. – 535 с.

References

1. Popov A. Yu. *Optimizatsiya elementov tekhnologicheskoy sistemy pri vosstanovlenii profilya poverkhnosti kataniya kolesnykh par podvizhnogo sostava: dis. kand. tekhn. nauk* [Optimization of technological system's elements at restoration of the surface profile of the rolling stock's wheel pairs: dissertation to apply for the degree of the candidate of engineering sciences]. Moscow, 1998, 309 p.
2. Talantov N. V. *Fizicheskie osnovy rezki i iznosa instrumenta* [Physical fundamentals of cutting and instrument wear]. Volgograd: Izd-vo VTU, 1994, pp. 3–37.
3. Loladze T. N. *Prochnost' i iznosostoykost' rezhushchego instrumenta* [Instrument's strength and wear resistance]. Moscow: Mashinostroenie, 1982, 320 p.
4. Bogdanov A. F., Chursii V. G. *Ekspluatatsiya i remont kolesnykh par vagonov* [Exploitation and repair of carriage's wheel pairs]. Moscow: Transport, 1985, 270 p.
5. Vereshchaka A. S., Kushner V. S. *Rezanie materialov: uchebnik* [Cutting of materials: textbook]. Moscow: Vyssh. shk., 2009, 535 p.

Куликов Михаил Юрьевич

доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник,
Институт конструкторско-
технологической информатики
Российской академии наук (Россия,
г. Москва, пер. Вадковский, корп. 1А)

E-mail: muk.56@mail.ru

Kulikov Mikhail Yur'evich

Doctor of engineering sciences, professor,
leading researcher, Institute of engineering
and design informatics of the Russian
Academy of Sciences (building 1a,
18 Vadkovsky lane, Moscow, Russia)

Попов Алексей Юрьевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра технологии транспортного
машиностроения и ремонта подвижного
состава, Московский государственный
университет путей сообщения (Россия,
г. Москва, ул. Образцова, 9 стр. 9)

E-mail: madrat@inbox.ru

Popov Aleksey Yur'evich

Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of transport
engineering and rolling stock repair,
Moscow State University
of Railway Engineering (building 9,
9 Obraztsova street, Moscow, Russia)

Флоров Алексей Вадимович

кандидат технических наук, младший
научный сотрудник, Институт
конструкторско-технологической
информатики Российской академии
наук (Россия, г. Москва,
пер. Вадковский, 18, корп. 1А)

E-mail: florovaleksey@mail.ru

Florov Aleksey Vadimovich

Candidate of engineering sciences, research
assistant, Institute of engineering
and design informatics of the Russian
Academy of Sciences (building 1a,
18 Vadkovsky lane, Moscow, Russia)

Сан Маунг

аспирант, Московский государственного
университета путей сообщения
(Россия, г. Москва, ул. Образцова, 9
стр. 9)

E-mail: sannmaung84@mail.ru

San Maung

Postgraduate student, Moscow State
University of Railway Engineering
(building 9, 9 Obraztsova street,
Moscow, Russia)

УДК 621.7

Куликов, М. Ю.

**Пути снижения теплонапряженности режущего клина при колесо-
токарной обработке** / М. Ю. Куликов, А. Ю. Попов, А. В. Флоров, Сан
Маунг // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Техниче-
ские науки. – 2014. – № 4 (32). – С. 192–199.

Вниманию авторов!

Редакция журнала «Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки» приглашает специалистов опубликовать на его страницах оригинальные статьи, содержащие новые научные результаты в области информатики, вычислительной техники, управления, электроники, измерительной техники, радиотехники, машиностроения, машиноведения, а также обзорные статьи по тематике журнала.

Статьи, ранее опубликованные, а также принятые к опубликованию в других журналах, редколлегией не рассматриваются.

Редакция принимает к рассмотрению статьи, подготовленные с использованием текстового редактора Microsoft Word for Windows (тип файла – RTF, DOC).

Необходимо представить статью в электронном виде (VolgaVuz@mail.ru) и дополнительно на бумажном носителе в двух экземплярах. Оптимальный объем рукописи 10–14 страниц формата A4. Основной шрифт статьи – Times New Roman, 14 pt через полуторный интервал. Статья **обязательно** должна содержать индекс УДК, ключевые слова и развернутую аннотацию объемом от 100 до 250 слов, имеющую четкую структуру **на русском** (Актуальность и цели. Материал и методы. Результаты. Выводы) **и английском языках** (Background. Materials and methods. Results. Conclusions).

Рисунки и таблицы должны быть размещены в тексте статьи и представлены в виде отдельных файлов (растровые рисунки в формате TIFF, BMP с разрешением 300 dpi, векторные рисунки в формате Corel Draw с минимальной толщиной линии 0,75 pt). Рисунки должны сопровождаться подрисуночными подписями.

Формулы в тексте статьи **обязательно** должны быть набраны в редакторе формул Microsoft Word Equation (версия 3.0) или MathType. Символы греческого и русского алфавита должны быть набраны прямо, нежирно; латинского – курсивом, нежирно; обозначения векторов и матриц прямо, жирно; цифры – прямо, нежирно. Наименования химических элементов набираются прямо, нежирно. Эти же требования **необходимо** соблюдать и в рисунках. Допускается вставка в текст специальных символов (с использованием шрифтов Symbol).

В списке литературы **нумерация источников** должна соответствовать **очередности ссылок** на них в тексте ([1], [2], ...). Номер источника указывается в квадратных скобках. **Требования к оформлению списка литературы** на русские и иностранные источники: **для книг** – фамилия и инициалы автора, название, город, издательство, год издания, том, количество страниц; **для журнальных статей, сборников трудов** – фамилия и инициалы автора, название статьи, полное название журнала или сборника, серия, год, том, номер, страницы; **для материалов конференций** – фамилия и инициалы автора, название статьи, название конференции, город, издательство, год, страницы.

К материалам статьи **должна** прилагаться следующая информация: фамилия, имя, отчество, ученая степень, звание и должность, место и юридический адрес работы (на русском и английском языках), e-mail, контактные телефоны (желательно сотовые).

Обращаем внимание авторов на то, что перевод имен собственных на английский язык в списке литературы осуществляется автоматически с использованием программы транслитерации в кодировке BGN (сайт translit.ru). Для обеспечения единообразия указания данных об авторах статей во всех реферируемых базах при формировании авторской справки при подаче статьи необходимо предоставить перевод фамилии, имени, отчества каждого автора на английский язык, или он будет осуществлен автоматически в программе транслитерации в кодировке BGN.

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается. Рукопись, полученная редакцией, не возвращается. Редакция оставляет за собой право проводить редакторскую и допечатную правку текстов статей, не изменяющую их основного смысла, без согласования с автором.

Статьи, оформленные без соблюдения приведенных выше требований, к рассмотрению не принимаются.